



All Sciences Academy



MÜHENDİSLİKTE ÇAĞDAŞ ARAŞTIRMALAR



MÜHENDİSLİKTE ÇAĞDAŞ ARAŞTIRMALAR

Editör

Dr. Öğr. Üyesi Umut ÖZKAYA





Mühendislikte Çağdaş Araştırmalar

Editör: Dr. Öğr. Üyesi Umut ÖZKAYA

Dizayn: All Sciences Academy Design

Basım Tarihi: Ağustos 2025

Yayıncı Sertifika Numarası: 72273

ISBN: 978-625-5794-11-6

© All Sciences Academy

www.allsciencesacademy.com

allsciencesacademy@gmail.com

İÇERİK

1. Bölüm	5
Yeni Nesil Ses Yalıtım Malzemeleri <i>Bünyamin DÖNMEZ, Ömer GÜNDOĞDU</i>	
2. Bölüm	44
Yüzey Plazmon Polaritonlarının Elektrokimyasal Biyosensörlerle Entegrasyonu <i>Zülfü TÜYLEK</i>	
3. Bölüm	62
Yüzey Plazmon Rezonansı (SPR) ve Kretschmann Konfigürasyonu <i>Zülfü TÜYLEK</i>	
4. Bölüm	96
Lotka-Volterra Sisteminin Asimptotik Kararlılık Analizi <i>Muhammet ATEŞ, Muzaffer ATEŞ</i>	
5. Bölüm	104
Elektron Mikroskop Türleri Ve Uygulama Alanları <i>Cengiz TEMİZ</i>	
6. Bölüm	128
Nöromorfik Devrelerde Yük Tabanlı Memristans ile RLC Sisteminin Kararlılık Analizi <i>Muhammet ATEŞ, Muzaffer ATEŞ</i>	
7. Bölüm	149
Yüksek Sıcaklıklara Sahip Yüzeylerin Çarpan Jet Çapraz Akiş Kombinasyonu İle Soğutulmasının Sayısal Olarak İncelenmesi <i>Yusuf ARINIK, Tolga DEMİRCAN</i>	

8. Bölüm	175
Mikrokontrolcü Tabanlı Optik Deney Sistem Tasarımı: Kutuplanma Ölçümü <i>Tayyar GÜNGÖR</i>	
9. Bölüm	189
Gıda Mühendislerinin Mesleki Memnuniyet Durumu <i>Volkan SEVİNÇ, Aydan DALBASTI, İsmail YILMAZ</i>	
10. Bölüm	233
Diyatomit Kullanımının Geopolimer Harçların Özellikleri Üzerine Etkisi <i>Fikriye AKYÜZ, Cenk KARAKURT</i>	

Yeni Nesil Ses Yalıtım Malzemeleri

Bünyamin DÖNMEZ¹
Ömer GÜNDOĞDU²

- 1- Prof. Dr. Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü,
bdonmez@atauni.edu.tr ORCID No : 0000-0002-7680-0755
- 2- Prof. Dr. Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
omergun@atauni.edu.tr ORCID No : 0000-0003-2656-4181

ÖZET

Bu çalışma, özellikle inşaat ve endüstriyel alanlarda gürültü kirliliği ile mücadele ederek yaşam kalitesini artırmak ve yeni nesil ses yalıtım malzemelerinin gelişimini ortaya koymak amacıyla yapılmıştır. Bu teknoloji, ses iletimini engelleyerek gürültü yalıtımının sağlanması esasına dayanan modern üretim yöntemlerine dayanmaktadır. Uygun yalıtım malzemelerinin seçimi ve kullanımı, binaların enerji performansını artırmakta ve enerji maliyetlerini azaltarak ekonomik tasarruf sağlamaktadır. Ses yalıtım malzemeleri aynı zamanda iyi birer termal yalıtkan malzemeleridir. Frekans, genlik ve dalga boyu açısından ölçülebilen ve dalgalar halinde yayılan ses, fiziksel bir büyüklüktür. Gürültü ise rahatsızlık veren ve zararlı olabilen sesleri ifade eder. Yerleşim birimlerinde ve işletmelerde rahatsızlıklara ve sağlık sorunlarına da yol açabilen bir çevre kirliliğidir. Dolayısıyla, son yıllarda önemli bir küresel sorun haline gelmiş olan gürültü kirliliğinin kontrol edilmesine yönelik büyük bir ilgi oluşmuş ve bu durum ses yalıtımı alanında yeni araştırmalar yapılmasını motive etmiştir. Etkin gürültü azaltma malzemelerinin ortak özelliği, yankılanmayı ve ses yoğunluğunu en aza indirirken yüksek yoğunluklu ses dalgalarını emebilen düşük yoğunluk ve yüksek gözeneklilik sunabilmesidir.

Yeni nesil yalıtım malzemelerinin kullanımı yaygınlaşmış ve teknolojik gelişmeler doğrultusunda daha yüksek performanslı birçok farklı malzeme türü geliştirilmiş, gürültü kirliliğini azaltmak ve çevresel sorunlarla mücadele etmek için gürültü duvarları, iyileştirilmiş kaldırım malzemeleri, bariyerler, ses emici malzemeler ve sönümleyiciler kullanılmaktadır. Ayrıca, sentetik elyaflar, hücresel, lifli, taneli kimyasallar, farklı gözenekli emiciler, metamalzemeler, delikli paneller, ses yalıtım membranları, polimer kompozitler veya ahşap bazlı kompozitler de uygulanmaktadır. Selüloz ve mantar gibi biyobazlı malzemeler, aerogeller ve vakum yalıtım panelleri gibi daha ileri teknolojiler de kullanılabilmektedir. Bu araştırmada, ses yalıtımı amacına yönelik güncel farklı malzeme türleri tanıtılmış ve karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler- Ses Ve Gürültü Kirliliği, Ses Yalıtımı, Ses Emicilerinin Prensipleri, Yalıtımı Etkileyen Faktörler, Ses Yalıtım Malzemeleri.

GİRİŞ

Ses; hava, su veya katı ortamlarında yayılan, bir canlı kulağına ulaştığında duyulabilen titreşimlerdir. Frekans, genlik ve dalga boyu açısından ölçülebilen mekanik bir dalgadır. Titreşim, farklı hava basınç seviyeleri (yüksek ve düşük) oluşturur ve değişen basınç seviyeleri, ses dalgaları olarak elastik bir ortamında hareket eder. Genellikle, müzik, konuşma veya çevresel gürültüler, sesin yayılmasına örnek olarak gösterilir. Ses seviyeleri desibel (dB) olarak elektronik cihazlar ile ölçülebilir. Ses, yüksek olduğunda ve

rahatsızlık verdiğinde gürültü olarak adlandırılır. Aksi takdirde istenen sinyale eşlik eden ve onu engelleme eğiliminde olan rastgele bir sinyal gibi davranırsa gürültü sinyali olarak adlandırılır (Schwarz vd., 2020:2). Gürültü, sürekli ve kesikli olabilen bir ses türüdür. Genellikle ses dalgalarındaki düzensizliklerle karakterize edilir ve bir tür gürültü kirliliği olarak kabul edilir. Gürültü, bir tahriş kaynağı olup, genellikle normal işitmeyi etkileyen ve hoş olmayan veya zararlı olabilen sesleri ifade eder. Sürekli gürültü, bir fanın uğultusu veya trafik sesi gibi sabit bir sestir. Kesikli gürültü ise, bir araba kornası veya bir patlama gibi ara sıra oluşan bir kirliliktir. Ses sinyali, kulaklar ile algılanan ve beynin sinirsel eylemleriyle bazı bilgilere dönüştürülen bir ortamdaki parçacıkların titreşimiyle üretilen bir sinyaldir. Algılanan sinyal anlamlıysa ve simetrik bir örüntüyü takip ediyorsa beyin bunu ses olarak kabul eder, eğer anlamsız ve herhangi bir simetriye sahip değilse rahatsızlığa neden olan gürültü olarak kabul edilir. Bir ses dalgasının özelliklerinin kapsamlı bir şekilde tanımlanması ve incelenmesine akustik denir.

Modern kentleşme ve teknolojik ilerlemelerle birlikte gelen gürültü kirliliği, son yıllarda önemli ve küresel bir sorun haline gelmiş ve bu da ses yalıtımı alanında yeni araştırmalar yapmayı çok önemli hale getirmiştir (Mago vd., 2024:6; Ang vd., 2023:2). Birçok ülkede, çok katlı konutların yerleşik nüfusu son yıllarda hızla artmış ve katlar arası veya bitişik yapı binalardan kaynaklanan gürültü kirliliği, çevre ve halk sağlığını tehdit eden ve sosyal çatışmaların da kaynağını oluşturan bir tehlike haline gelmiştir. Yani, günümüz dünyasında gürültü kirliliği, modern bir veba olarak ortaya çıkmıştır. Ayrıca kentsel ortamlarda, bina, araç, gemi, uçak ve modern makinelerden kaynaklanan aşırı gürültü; işitme kaybı, uyku bozuklukları, terleme, stres, sinirlilik, konsantrasyon eksikliği, kardiyovasküler hastalıklar ve bilişsel bozukluğu gibi sağlık risklerini doğurmuş, insanların günlük yaşamlarını olumsuz etkilemiştir Aynı zamanda bu tür gürültü ortamlarına maruz kalmak; baş ağrısı, kalp sorunları, yüksek tansiyon, üretkenlikte zafiyet ve işyerinde kaza riskinin artması gibi bir dizi fizyolojik zorluğa da yol açabilmektedir (Seciureanu vd., 2023:4; Mago vd., 2024:3). Dolayısıyla ses yalıtımı, aşırı gürültüye maruz kalmayı azaltmak, şehirlerde yaşayan sakinlerin sağlığını ve refahını korumak için oldukça önemlidir. Bu açıdan, tiyatro, hastane, oditoryum, düğün salonları, hava alanları, araba parçaları, elektrikli aletler, binalar ve diğer gürültüye duyarlı alanlardaki gürültü seviyelerini kontrol etmek için yapılan akustik uygulamalar oldukça önemlidir. Dünya çapındaki Çevre Koruma Otoritelerinin (EPA) çoğu, farklı ses sistemlerinden kaynaklanan gürültü kirliliği için yeni düzenlemeler gerektiğini ortaya koymaktadır (Chen ve Liu, 2022:132). Yapılan çalışmalar, 60 dB'nin üzerindeki ses biriminin rahatsız edici olduğunu ve 75 dB'nin üzerinde ise önemli düzeyde gürültü kirliliği oluşturduğunu ön görmektedir (Mago vd., 2024:4).

Gürültü kirliliği, Avrupa, Kuzey Amerika ve Güneydoğu Asya'da çeşitli hastalıklara sebep olan ve hava kirliliğinden sonra ikinci en önemli çevresel

faktördür. Binalarda gürültü kontrolü, dış ses kaynaklarından izolasyon ve sesin bir odadan diğerine iletilmesinin engellenmesi yoluyla bir mekânda oluşan sesin emilmesi yoluyla sağlanır (Tudor vd., 2020:3). Gürültü kirliliğini azaltmak ve çevresel sorunlarıyla mücadele etmek için gürültü duvarları, iyileştirilmiş kaldırım malzemeleri, bariyerler, ses emici malzemeler ve sönümleyiciler üzerine birçok bilimsel çalışma yapılmaktadır (Hosseinianpour vd., 2024:7; Zhang vd., 2018:4). İlk yalıtım malzemeleri yerel kaynaklardan elde edilen çamur ve taş gibi basit doğal malzemelerinden (örneğin saman, kil ve taş) yapılmış ve özellikle soğuk iklimlerde ısı yalıtım amacına yönelik olmuştur (Schwarz vd., 2020:5). Antik Roma'da, tuğla ve mermer, binaların yalıtımında yaygın olarak kullanılmış ve 19. yüzyılda “Sanayi Devrim”i ile yalıtım malzemeleri daha yaygın hale gelmiş ve daha farklı malzemeler geliştirilmiştir. Yalıtım, binalarda ısı kaybını önlemek, enerji tasarrufu sağlamak, gürültüyü engellemek ve çevresel etkileri azaltmak için kullanılan kritik bir uygulamadır. Yani yalıtım malzemeleri, çevresel etkileri azaltma, iç mekân sağlığını iyileştirme ve enerji verimliliğini artırma gibi birden fazla amaca hizmet eder hale gelmiştir. Günümüzde organik ve sentetik malzemelerin kullanımı yaygınlaşmış ve teknolojik gelişmeler doğrultusunda daha yüksek performanslı yalıtım malzemeleri üretilmiştir. Yalıtım malzemelerinin geliştirilmesi, enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik hedeflerine yönelik tarihsel ve teknolojik süreçler tarafından şekillendirilmiştir (Erzen vd., 2025:1539). Bu stratejilerin temeli, aktif ve pasif gürültü kontrolü arasında bir ayrım yapmayı gerektirmektedir. Gürültü kontrol stratejilerinde, aktif gürültü kontrolü, ses dalgalarını devreden çıkaracak elektronik araçların kullanılmasını içerirken, pasif gürültü kontrolü ise, ses enerjisini absorbe etmek veya yansıtmak için farklı türde malzemelerin kullanımını ve tasarımını ortaya koymaktadır (Mago vd., 2024:2; Sharma vd., 2023:445). Ne yazık ki geleneksel akustik malzemeler gürültü azaltmada önemli iyileştirmeler sunamamaktadır (Seciureanu vd., 2023:5). Pasif gürültü kontrolü açısından, ekstra bir enerji gerektirmeyen, ekonomik ve daha verimli olan ve ses enerjisini emen veya yansıtan akustik malzemeler kullanılmak daha pratiktir (Gao vd., 2022:4; Rajappan vd., 2017:2).

Yeni malzemelerin ve yenilikçi tasarımların kombinasyonu, konut alanlarından endüstriyel ortamlara kadar ulaşan uygulamalarda, etkili gürültü kontrol çözümlerinin yolunu açmaktadır. Ses emici malzemelerin kullanımı, çevresel gürültüyü kontrol etmek için kullanılan ana mühendislik yaklaşımlarından biridir (Arenas vd., 2020:3). Ses emici malzemeler binalarda yankılanan gürültünün azaltılmasında ve çeşitli uygulamalarda ticari olarak temin edilebilen gürültü izolasyon kompozitlerinin bileşenleri olarak giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Asbest liflerinin kullanımı 1970'lerde yasaklandığından beri, gürültü kontrolü için kullanılan ana malzemeler cam ve mineral liflerden yapılmıştır. Ancak, bu tür lifli malzemelerin çöp olarak atılması, önemli çevresel sorunları doğurmuştur. Mineral yün, fiberglas ve diğer sentetik liflere karşı bir alternatif olarak yenilenebilir kaynaklara dayalı

akustik malzemelerin geliştirilmesi, özellikle otomotiv uygulamalarında büyük ilgi görmüştür (Arenas vd., 2020:2).

Akustik engelleyici sistemler ve paneller özellikle kamusal alanlarda ve ticari binalarda kullanılmaktadır (Setunge ve Gamage, 2016:175). Ses emiciler genellikle gözenekli malzemelerden veya rezonans oluşturan yapılarından üretilmekte ve ses absorpsiyonu için, akustik empedans uyumu ve absorberlerin içindeki akustik enerji dağılımını çok önemli hale getirmektedir. Gözenekli emiciler/absorberler, ses yayılımının iç içe geçmiş gözeneklerden oluşan bir yapıya sahip olup viskoz ve termal etkilerin neden olduğu akustik enerjinin dağılmasını sağlayan aparatlardır (Mago vd., 2024:4). Tipik ses iletim kaybını etkileyen faktörleri ve gürültü kirliliğini azaltmadaki etkinliklerini ayrıntılı olarak ele almak için ses yalıtım malzemelerinin performans ölçütlerinin ortaya konması gerekmektedir. Tabi ki ses emilim katsayısı malzeme özellikleri ve katsayı ölçüm yöntemleri ile değişebilmektedir. Genellikle yüksek emilim katsayısına sahip ses yalıtım malzemelerinin bir listesi Tablo 1’de verilmektedir (Sharma vd., 2023:446). Ayrıca bazı yalıtım malzemelerinin farklı iki yöntem ile test edilmiş ses emilim katsayıları Tablo 2 ve 3’de verilmektedir (Sharma vd., 2023:447).

Tablo 1: Gözenekli Ses Emici Malzemelerin Özellikleri

Malzeme Tipi	Malzeme Türü	Kalınlık (mm)	Gözeneklilik (%)	Ses Emilim Katsayısı (α)
Hücreli	Köpüklü akustik poliüretan	24	95	0,54
	Geri dönüşümlü PU köpük	31	90	0,63
	Poliüretan köpük	30	-	0,50
	Alüminyum sünger	40	66	0,60
	Plastik (belirtilmemiş)	12	98	0,66
Lifli	Polyester, yün ve pamuk lifleri	15	-	0,60
	Jüt lifi	23	-	0,62
	Paslanmaz çelik fiber	26	81	0,57
	Polietilen tereftalat lifleri	30	-	0,59
	Bitüm mineral yün keçe	30	-	0,54
	Cam yünü	40	-	0,73
	Polietilen tereftalat lifleri	50	-	0,83
	Keten lifi	50	-	0,59
	Paslanmaz çelik fiber	50	91	0,62
	Paslanmaz çelik fiber	75	Dolu	0,78
	Paslanmaz çelik fiber	50	98	0,67
	Odun lifi	75	90	0,79
	Odun lifi	58	94	0,50
	Selüloz lifi	58	-	0,70
	Bazalt yünü	60	-	-
	Delikli bazalt yünü	-	-	0,73
	Polimer/metal/polimer esaslı lifli malzeme	65	-	0,57
	Polyester elyaf	80	98	0,8
	Selüloz lifi	30	48	0,52
	Çelik çürufu ve külleri	50	55	0,52
Taneli	Al ₂ O ₃ –SiO ₂ esaslı inorganik malzeme	60	-	0,68
	Metakaolin (%70) ve yüksek Cüruf tozu (%30)	-	-	-

Tablo 2: Statik Akış Özdirenç Yöntemi kullanılarak bazı gözenekli-lifli kompozitlerin ses emilim katsayıları

Kompozit Malzeme	Kalınlık (mm)	Ses Emilim Katsayısı (A) Frekans Aralığı (250-2000 Hz)
Polipropilen elyaf (dokumasız kumaş I)	5	0,005-0,116
Polipropilen elyaf (dokumasız kumaş II)	10	0,014-0,45
Köpük plastik polimer	25	0,086-0,833
Pamuk	10	0,002-0,334
Şeker kamışı posası	12	0,003-0,405
Köpük + dokusuz kumaş I	30	0,069-0,866
Dokumasız kumaş I+ köpük	30	0,069-0,872
Pamuk + Dokumasız kumaş	15	0,002-0,635

Tablo 3: Standart Test Yöntemi Kullanılarak Bazı Gözenekli Kompozitlerin Ses Emilim Katsayıları

Kompozit Malzeme	Kalınlık (Mm)	Ses Emilim Katsayısı (α) Frekans Aralığı (150-2000 Hz)
Cam elyaf yünü	25	0,4
Taş yünü	25-50	0,6
Şeker kamışı israfı lifi	5-15	0,45
Geri dönüştürülmüş poliester elyaf	25	0,25
Geri dönüştürülmüş köpük	20	0,28
Talaş +Hindistan cevizi lifi	15-25	0,48

Akustik metamalzemeler, ses dalgalarını kontrol etmek için yeni çözümler sağlamakta olup, özellikle gürültü yayılımını azaltmak için büyük bir potansiyele sahiptir. Son zamanlarda, akustik metamalzemelerin hızlı gelişimi nedeniyle, akustik gürültü azaltma malzemesi olarak dünya çapındaki araştırmacıların dikkatini çekmektedir. Bu tür malzemeler genellikle hem hafif hem de kompakt olup, geleneksel akustik malzemelerle kontrol edilmesi zor olan düşük frekanslı gürültüyü azaltmada mükemmeldir. Son gelişmeler, akustik metamalzemelerin ses dalgalarını etkili bir şekilde kontrol ettiğini ve yapılarının optimize edilmesinin yeni fiziksel olgulara dayalı işlevselliği mümkün kılabileceğini göstermiştir (Gao vd., 2022:5). Cam yünü, kaya yünü ve seramik yünü gibi inorganik yalıtımlar hafiflik, düşük ısı iletkenliği, yüksek ses emici performans, kimyasal dayanıklılık ve yanmazlık özelliklerine sahiptir. Fakat anorganik yalıtım malzemeleri, ulaşım sistemleri, nükleer enerji endüstrisi, soğutma ve binalarda yüksek kaliteli ısı yalıtım ve ses emici malzemeleri olarak yaygın olarak kullanılmaktadır (Chen ve Liu, 2022:125). Etkili gürültü kontrolü yalnızca konforu artırmakla kalmaz, aynı zamanda sağlık ve üretkenlik için de çok önemlidir. Aynı zamanda hem aktif hem de pasif kontrolleri kolaylaştıran potansiyel malzeme ve konfigürasyonların

araştırılmasına olan ilginin artmasına da yol açar (Kapoor vd., 2017:2; Habib ve Képesi, 2007:2).

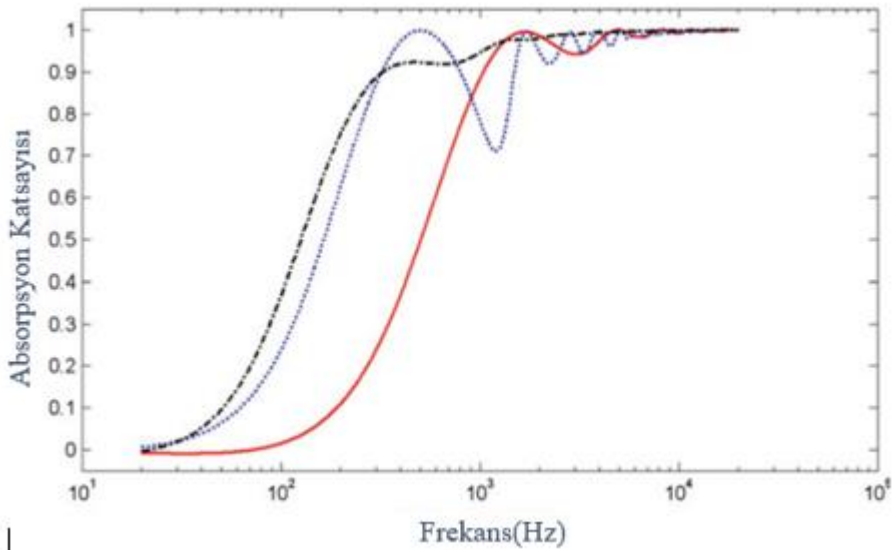
Fatmala vd, cerrahi maskelerin akustik paneller olarak geri dönüştürülmesinin potansiyelini araştırmak amacıyla, bazı polimer atık malzemelerin özellikle istenen frekans aralığında önemli ses emme yetenekleri sergilediğini vurgulamışlardır (Fatmala vd., 2022:33). Benzer bulgular, PET şişelerden elde edilen poliester elyafları analiz eden Siltumens (2025:2) tarafından da desteklenmiş ve bunların akustik konfor gerektiren ortamlarda çok önemli olan yüksek frekanslı ses emilimindeki etkinlikleri ortaya konmuştur. Ayrıca, Rusdi vd (2021:75), hindistan cevizi kabuğu atık tozu ve strafordan geliştirilen kompozit malzemelerin, umut verici sonuçlar sergilediğini, bu panellerin kalınlığının değiştirilmesinin, geliştirilmiş ses emme katsayıları ile ilişkili olduğunu savunmuş ve akustik panel performansını optimize etmede tasarım parametrelerinin önemini vurgulamışlardır. Yine yapılan bir araştırmada, %100 geri dönüştürülmüş termoplastik kompozitlerin geliştirilmesinin hem çevre güvenliği hem de etkili ses yalıtımına yönelik katkı sunan çevre dostu akustik panel üretimine ait avantajları kaydedilmiştir (Küçükali-Öztürk vd., 2022:355). Etilen vinil asetat paneller (EVA) ve EVA kopolimer bazlı köpükler üzerine yapılan çalışmalarda, bu tür polimer kompozitlerin zemin, duvar, döşeme ve tavanlarda ses yalıtım malzemesi olarak kullanılabileceği belirtilmiştir (Nadal vd., 2019:22; Kwon vd., 2021:71).

Son araştırmalar, bitkisel ve hayvansal elyaflar dahil olmak üzere ses emici eko-malzemelerin üretiminde doğal elyafların kullanımı üzerine yoğunlaşmıştır (Rahman vd., 2013:1310; Tang vd., 2018:63). Genel olarak, doğal elyaflar biyolojik olarak parçalanabilir ve işlenmesi daha ekonomik ve çevre dostu hale getirilebilir. Berardi ve Iannace (2017:860) ayrıca kenaf, odun, kenevir, hindistan cevizi, mantar, baston, karton ve koyun yünü dahil olmak üzere bazı doğal liflerin ses emme özellikleriyle ilgili literatürü incelemiştir. Biyo lif kabağı örneklerinin akustik özellikleri Koruk ve Genk tarafından değerlendirilmiş (2015:167), çay yaprağı atıkları, sisal, rami, mısır kabuğu, süpürge lifleri, bambu, saman ve baston, hindistan cevizi lifi ve hurma ağacı, ananas yaprağı ve keten gibi ses emici malzemeler için birçok doğal lif çalışılmıştır (Ersoy ve Küçük, 2009:218; Othmani vd., 2016:92; Putra vd., 2018:12). Teknoloji ilerledikçe, aktif ve pasif gürültü kontrol yöntemlerinin entegrasyonu, geniş bir frekans aralığını etkili bir şekilde ele almak için umut verici bir potansiyel göstermektedir. Ses yalıtımı konusundaki gelecekteki çabalar, muhtemelen her iki stratejinin de en iyi özelliklerinden yararlanacak ve daha çok yönlü, etkili gürültü kontrol çözümleriyle sonuçlanabilecek yenilikleri yönlendirecektir.

SES EMİCİLERİN PRENSİPLERİ

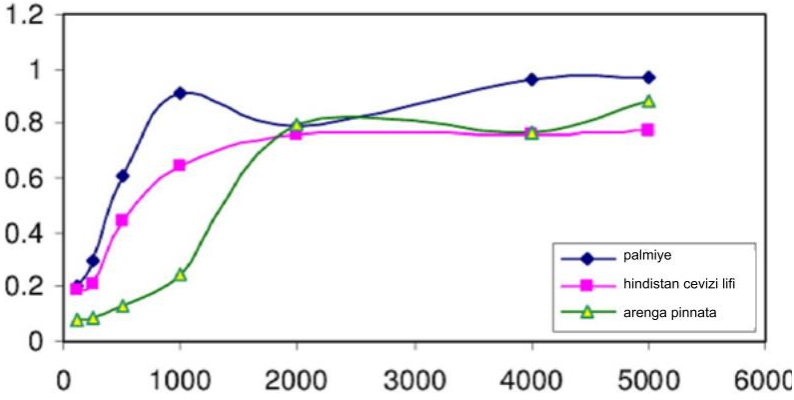
Yeni nesil ses yalıtım malzemeleri, özellikle inşaat ve endüstriyel alanlarda gürültü kirliliği problemini çözmek ve yaşam kalitesini artırmak amacıyla kullanılmaktadır. Bu malzemelerin çoğu kompozit türü malzeme olup, ses dalgalarını yönlendirerek ses yalıtımını artırmak ve uygun bir izolasyonu sağlamak amacıyla, daha modern ve teknolojik üretim yöntemleri ile elde edilmektedir. Ses yalıtım malzeme seçeneklerinin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlamak için performans, fiyat ve dayanıklılık özelliklerinin değerlendirilmesini içerir. Ses emici malzemelerin çalışma prensibi, ses dalgalarının, malzeme içindeki hava ve gözenek cidarındaki sürtünmesi sonucu, enerjisinin ısıya dönüşmesidir. Malzemenin yapısı, yoğunluğu, kalınlığı ve gözenekliliği gibi etkenler, hangi frekanstaki seslerin ne kadar absorbe edileceğini belirler. Ses emici ve yalıtım malzemelerinin gürültü azaltma verimliliğini değerlendirmek için ses emilim katsayısı ve ses iletim kaybı ölçülür (Hung vd., 2014:330; Hosseinianpour vd., 2024:8). Bir malzemenin ses emilim katsayısı gözenekliliğinden ve gözenek boyut dağılımından etkilenirken, ses iletim kaybı esas olarak yoğunluk ve kalınlık ile kontrol edilir. Uygulamada genellikle ses emici ve yalıtım malzemesi olarak; cam yünü, kaya yünü ve doğal bitki lifleri gibi lifli malzemeler ve polimerler, alüminyum, cam ve çimento köpükleri gibi oldukça gözenekli kompozitler kullanılır (Hosseinianpour vd., 2024:7). Bu nedenle, mevcut olanları değiştirmek için ucuz, yangına dayanıklı, enerji tasarrufu sağlayan ve çevre dostu malzemeler geliştirilmektedir. Ses yalıtım malzemelerinin çok önemli bir yönü, malzeme bileşimi ve konfigürasyonuna bağlı olarak önemli ölçüde değişebilen ses yalıtım özellikleri açısından performanslarıdır. Örneğin, Zheng ve Liang'ın (2020:5119) birlikte kürlenen sandviç kompozitler üzerine yaptığı araştırma, sönümleme performansının malzeme kombinasyonlarına göre nasıl değiştiğini ve dikkatli tasarım ile optimize edilebilecek ses yalıtım yetenekleri sergilediğini vurgulamaktadır. Son yıllarda, titreşim azaltma ve akustik gizlilik teknolojisi, havacılık ve gemi endüstrisinin geliştirilmesi son derece önemli hale gelmiştir. Yüksek özgül modül, büyük taşıma kapasitesi ve mükemmel sönümleme özelliklerine sahip kompozit yapılar, daha fazla dikkat çekmektedir. Sönümleme malzemeleri, gürültü ve titreşim sorunlarını ortadan kaldırmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle, hassas navigasyon ekipmanlarının geliştirilmesi için acilen yüksek performanslı titreşim ve gürültü azaltma malzemelerine ihtiyaç duyulmaktadır (Zheng ve Liang, 2020:5121). Ultra hafif gözenekli malzemeler; ses ve enerji emilimi, ısı yalıtımı, radyasyon kalkanı ve filtrasyon konusunda önemli uygulamalar bulmaktadır (Seciureanu vd., 2023:2). Selüloz lifleri, ses yalıtım ürünlerinde sıklıkla kullanılan doğal ve çevre dostu bir malzemedir. Ancak, yaygın olarak kullanılan diğer polimerik malzemelerle karşılaştırıldığında bazı olumsuz yönleri de vardır.

Bir malzeme ile temas eden ses dalgaları, ya yansıtılır (refleksiyon), ya soğurulur (absorpsiyon), ya da iletilir (transmisyon). Ses emici malzemeler, bu enerji dağılımında soğurma oranını maksimize etmeyi hedefler. Ses emilim katsayısı α olup, 0 ile 1 arasında değer alır ve farklı frekanslarda (125 Hz – 4 kHz arası) ölçülür. Gözenekli bir malzemenin, ses emilim katsayısının frekans ile değişimi Şekil 1’ de verilmiştir. Emilim katsayısı genellikle frekansla artmaktadır. (Akış direnci $10.000 \text{ N s m}^{-4}$ olup, kırmızı çizgi, 5 cm kalınlığında bir malzemenin doğrudan sert bir duvara yerleştirildiği, mavi çizgi, 5 cm kalınlığında gözenekli malzemenin sert duvardan 10 cm uzağa yerleştirildiği ve siyah çizgi ise aynı gözenekli malzemenin kalınlığı 15 cm olan ve doğrudan sert bir duvara yerleştirildiği durumları temsil etmektedir).



Şekil 1. Gözenekli Bir Malzemenin Frekansa Göre Ses Emilim Katsayısı (Qiu, 2016:55).

Ayrıca, Şekil 2 (Sharma vd., 2023:468), doğal elyaf polimerlerinden olan palmye, hindistan cevizi lifi ve Arenga Pinnata malzemelerinin akustik ses geçirmezlik özelliklerinin bir karşılaştırma sonuçlarını sunmaktadır.



Şekil 2. Bazı Doğal Elyaf Ürünlerinin Frekansa Göre Ses Yalıtım Özelliklerinin Karşılaştırılması

Polimer yapıların viskoelastik davranışı, enerji Emilimi ve titreşim sönümlenmesi gibi uygulamaların temel nedenidir. Sönümlenme, bir yapının mekanik enerjisinin termal enerjiye dönüşmesidir. Viskoelastik malzemeler gibi titreşim sönümlenme özelliği sergileyen malzemeler, iki mekanizma yoluyla işlev yapmaktadır: enerji Emilimi ve saçılması. Emilimde, dalga enerjisi parçacıkların elastik hareketiyle ısıya dönüştürülür; başka bir deyişle, malzemeler elastik olarak yüklendiklerinde enerji depolar ve boşaltıldığında mekanik enerjinin bir kısmı kaybolur ve ısı olarak çevreye yayılır. Saçılma; partikül yapısı, kristal düzeni, gözenek yapısı ve gözenek oranı gibi bir malzemedeki homojensizliğin bir sonucudur. Saçılma, düzenli dalgaların enerjisinin yansıma ve kırılma yoluyla tutarsız, ırsak dalgalara dönüşmesine neden olur (Dashtkar vd., 2021:7; Ensminger ve Bond, 2024:40). Dolayısıyla, gürültü azaltma için şok Emilimi, titreşim kontrolü ve yüksek sönümlenme katsayılarına sahip malzemeler gereklidir. Viskoelastik özellikler ve camı geçiş sıcaklığı, polimerlerin titreşim sönümlenmesini etkileyen iki önemli faktördür. Poliüretanlar, cam geçiş sıcaklıklarını değiştirmek için modifiye edilebildikleri için sönümlenme uygulamaları için çekicidir (Dashtkar vd., 2021:8).

Gözenekli malzemelerde (örneğin akustik sünger, cam yünü, taş yünü, melamin köpüğü), ses dalgası malzeme içindeki açık hücreli gözeneklerden geçerken hava molekülleri ve cidar ile sürtünmeye uğrar ve ısıya dönüşür. Bu tür malzemeler yüksek frekansları iyi emer, düşük frekanslarda malzeme kalınlığı önemlidir. Yine rezonatör tipi emicilerde belirli bir frekansta rezonansa girerek ses enerjisini absorbe eder. Tipik örneği Helmholtz tipi bir rezonatördür (örneğin ahşap paneldeki hava boşluğu, delikli metal veya ahşap paneller). Bu tip malzemeler, düşük frekanslarda etkilidir ve dar frekans bandında çalışır. Membran yapıları malzemelerde ise, ince bir zar (örneğin, kontrplak) düşük frekanslı ses dalgalarıyla titreşerek enerjiyi absorbe eder. Bunlar da düşük frekansta çalışır ve genellikle hava boşluğu ile birlikte

kullanılır. Düşük frekanslı emilim için malzeme boyutunu küçültmek genellikle zordur. Düşük frekanslı sesin dalga boyu oldukça uzun olduğundan, yalnızca akustik enerji dağıtma mekanizması devreye girdiğinde normal Mikro Delikli Panellerin boyutu önemli ölçüde küçültülemez. İnce paneller gibi mekanik enerji dağıtma bileşenleri faydalıdır; ancak elektrik enerjisi dağıtma bileşenleri kadar çok yönlü ve güçlü değildirler. Uzun dalga boylu sesi kontrol etmek için kompakt cihazların kullanılmasını mümkün kılan şey, elektrik bileşenlerinin güçlü enerji depolama ve dağıtma kapasitesi ve tasarım esnekliğidir.

Bina projelerinin ses yalıtımı çözümlerini seçerken, maliyetin, uzun vadeli performans ve dayanıklılıkla dengelemesi çok önemlidir. Isı yalıtım özelliklerini ses yalıtımı işlevleriyle birleştiren hafif betondaki gelişmeler, modern akustik ihtiyaçları karşılayan dayanıklı, etkili yapı malzemelerini oluşturmada önemlidir (Zou vd., 2024:378). Bu gelişmeler, malzeme biliminde, yalnızca akustik gereksinimleri karşılamakla kalmayıp aynı zamanda çevresel zorluklara karşı dayanıklılık ve yalıtım sağlayan kompozit malzemelerden yararlanmaya yönelik daha geniş bir eğilimi yansıtmaktadır. Akustik emilimi etkileyen faktörler ve ses absorberlerinin prensiplerinin ortaya konulduğu bir araştırmada, ses yayılımıyla ilgili yansıma, emilim ve saçılma gibi temel dalga olayları izah edilmiş ve sonrasında farklı tür emicilerin mekanizmaları ile birlikte emilim katsayısı, iletim kaybı, akış direnci ve saçılma katsayısı gibi parametrelere değinilmiştir (Qui, 2016:53).

Ses yutma katsayısı, ses yalıtım malzemelerinin etkinliğini değerlendirmede çok önemli bir ölçüttür. Yapılan bir çalışmada, gürültü azaltma katsayısını (NRC) tanımlayarak, tipik olarak 0 ile 1.0 arasındaki orta aralıktaki frekanslarda malzeme performansları değerlendirilmiştir (Seciureanu vd., 2023:3). Selüloz elyaf bazlı hafif köpükler üzerine yapılan bu araştırma, bu tür malzemelerin umut verici ses emme özellikleri sergilediğini ve gürültünün azaltılmasına katkıda bulunduğunu belirlemiştir. Serbest alanda, gürültüyü önlemek için, sesi yansıtmak veya ses dalgasını kırmak suretiyle ses bariyerleri kullanılabilir. Koruyucu kullanan ses emilim işlemleriyle, yankılanan ses basıncı ve yankılanma süresi azaltılabilir. Ses kaynakları ve yayılma yolları üzerindeki ses basıncı hala çok yüksekse, koruyucu veya kulaklık kullanma gibi kişisel koruma önlemleri alınabilir. Pasif ses kontrolü açısından, pratikte karşılaşılan iki önemli zorluk: düşük frekanslı ses kontrolü ve havalandırma ihtiyacıdır.

Aktif gürültü kontrolüne olan ilgi son yıllarda önemli ölçüde artmıştır. Aktif gürültü kontrolü, orijinal birincil gürültü kaynağının üretimi, yayılımı, iletimi vs. ye yönelik kontrol edilebilir ikincil kaynakların devreye girmesiyle mevcut gürültüyü azaltma yöntemidir. Aktif gürültü kontrolünün temel teorileri ve yöntemleri son 30 yılda iyice yerleşmiştir; ancak teknolojinin başarılı endüstri ve sivil uygulamaları hala kulaklıklar ve kulak tıkaçları, pervaneli uçaklar ve arabalar gibi bazı özel durumlarda sınırlıdır (Kapoor vd., 2023:C6, Qiu, 2016:52). Aktif ve pasif gürültü kontrol tekniklerinin

araştırılması, çeşitli ortamlarda istenmeyen sesi en aza indirmeyi amaçlayan malzeme ve metodolojilerde önemli ilerlemeler sergilemektedir. Aktif Gürültü Kontrolü (ANC), istenmeyen gürültüye karşı koymak için ses dalgaları üreten algoritmalar kullanır. Song vd (2022:4), bir delme işleminde üretilen gürültüleri (genellikle 2000 ila 6000 Hz arasında değişen) ters ses dalgalarıyla iptal ederek azaltabilmiştir. Aktif sistemlerin ayrıca maliyet ve karmaşıklık konusunda sınırlamaları vardır ve dikkatli sistem tasarımı gerektirir (Lee vd., 2018:3). Gürültü kontrolünde ortaya çıkan çözüm hem aktif hem de pasif yöntemleri birleştiren ve daha geniş bir frekans aralığına hitap etme yeteneklerini geliştiren hibrit sistemleridir.

Pasif gürültü kontrolü, ses enerjisini absorbe etmek veya engellemek üzere tasarlanmış birtakım malzemelere yöneliktir. Bu, ses emici panelleri, yalıtım malzemelerini ve fiziksel engelleri içerebilir. Uygulamalar, kabin gürültüsünü azaltmak için ağır yalıtım malzemelerinin kullanılmasından, önemli ölçüde gürültü azaltma sağlarken yakıt verimliliğini koruyan hafif malzemelerin dahil edilmesine kadar uzanır (Kapoor vd., 2023:C4). Viskoelastik polimerler ve akustik köpükler gibi malzemeler, ses sönümleme özellikleri ve ısı yalıtımı kapasiteleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Hem pasif absorpsiyon yeteneklerini hem de aktif iptali kullanan hibrit paneller, çeşitli senaryolarda performansı optimize ederek malzeme maliyetlerini ve genel etkinliği dengeleyebilir (Lee vd., 2002:943; Tauber vd., 2016:541).

Otomotiv ve bina akustiğinde gürültü kontrol uygulamaları için yaygın olarak kullanılan akustik malzemeler düşük frekanslı gürültü açısından daha baskındır. Bu amaçla kullanılan akustik malzemeler, genellikle 500 Hz'in altındaki bu düşük frekanslı gürültüyü azaltamaz. Bu sorunu çözmek için hava boşlukları ve geçirimsiz filmler kullanılır. Daha düşük frekanslarda, daha büyük derinliklere ihtiyaç duyulmasına rağmen, hava boşluğu iyi ses emme özellikleri sağlar (Sharma vd., 2023:445). Ses yalıtımı uygulamaları için çeşitli kompozit malzemelerin vibroakustik sönümleme özelliklerini ilaveten hafifliği, geniş frekans aralığı ve yüksek ses emme kapasitesi gibi özellikleri nedeniyle gözenekli malzemeler ses emiliminde çok dikkat çekmektedir. İç ve dış mekân uygulamaları için kullanılan granüler, hücresel veya lifli kompozitler, üç önemli ticari ses emici malzeme türüdür. Lifli malzemelerde hem doğal hem de yapay alternatifler bulunabilir. Doğal lif akustik paneller daha az sağlık riski oluşturdukları ve geleneksel sentetik liflere göre daha çevre dostu oldukları için daha popüler hale gelmiştir (Sharma vd., 2023:447).

Son zamanlardaki bazı araştırmalar, plastik ve kauçuk granül malzemelerini karıştırarak fiber kompozitler üretmeye yoğunlaşmışlardır. Kauçuk kırıntısı gibi granül bileşenler, kompozitin yığın yoğunluğunu ve akış direncini artırarak düşük frekanslı akustik emilimi önemli ölçüde iyileştirebilir. Düşük frekanslı ses emilimini iyileştirmede, kimyasal bileşim, lif-tane oranı, lif boyutu ve tane boyutu gibi değişkenler de önemli rol oynar. Düşük frekans aralığında doğal veya sentetik lifleri granül kauçuk

malzemelerle birleştirmek, saf doğal veya granül kompozitlerden daha iyi performans göstererek umut verici bir ses emme performansı sergiler. Ancak, hava kirliliğine neden oldukları ve küresel ısınmaya katkıda bulunan CO₂ salınımı yaptıkları için geri dönüştürülemeyen geleneksel emici malzemelerle bağlantılı  evre üzerindeki olumsuz etkileri ve sağlık risklerini dikkate almak çok önemlidir. Doğal lifler, sentetik liflere göre daha hafif, biyolojik olarak parçalanabilir ve  evre dostu oldukları için tercih edilir. Bu açıdan, son yıllarda gürültü azaltma uygulamaları için doğal lif takviyeli polimer kompozitlerin kullanımı giderek artmıştır (Sharma vd., 2023:447).

Ses dalgaları ve gürültünün tamamı veya bir kısmı, yalıtımlı veya yalıtımsız, sesi az geçiren veya geçirmez koruyucu ve bariyerler tarafından bastırılabilir ve azaltılabilir. Gürültüyü önemli ölçüde azaltmak için, bariyer duvarının gürültü kaynağına bakan tarafı akustik emilim maddesiyle kaplanabilir. Gözenekli malzemeler, sert olanlara ( rneğin, gözenekli beton) göre daha fazla ses emebilir. Genellikle gelen ses enerjisini ısıya dönüştüren gözenekli malzemeler olan emiciler kullanılarak, ses dalgalarını yansıtan yüzeylerden kaçınılabılır. Sert gözenekli malzemelerden yalnızca bir dalga yayılabilir ve sınır koşulları, bu tür malzemelerin modellenmesi için önemlidir (Sharma vd., 2023:444). Sert malzeme tipleri: sert keçe, hücresel kauçuk, gözenekli seramikler ve sinterlenmiş metalleri içermektedir. Gevşek gözenekli malzemelerde, akustik bir dalga gevşek gözenekli bir malzeme içinde yayıldığında, akışkan faz, katı fazı viskoz ve eylemsiz kuvvetler aracılığıyla hareket edebilir . Ancak, bu tür malzemeden katı fazı boyunca bağımsız bir dalga üretilemez ve bu nedenle, bu malzemelerden yalnızca sıkıştırma dalgası yayılabilir. Bu malzemelerde, hacim modülü havadan daha düşüktür ve sınır koşulları daha az önemlidir. Bu malzemeler arasında hafif cam elyaf malzemesi, PET keçeler bulunur. Elastik gözenekli malzemelerde,    tür ses dalgası yayılabilir. Sınır koşulu, malzemenin modellenmesi sırasında kritiktir. Malzemeler arasında melamin ve otomobil ve havacılık uygulamalarında kullanılan poliüretan gibi çoğu köpük bulunur.

Gözenekli malzemeler jeofizik, termal bilim ve petrol endüstrisi gibi uygulamalı bilimin farklı alanlarında incelenmiştir. Gözenekli malzeme teorilerini geliştirmedeki en büyük çaba, bu malzemelerin akustik özelliklerini tanımlamaya adanmıştır. Rayleigh'in modeli gözenekli-emici ve geçirgen malzemeler için ilk model olarak kabul edilir. Bu modelde Rayleigh, dairesel kesitli minik tüplerde ses yayılımını tanımlamak için mikro yapısal bir yaklaşım düşündü. 1947'de, esnek veya lifli malzemeler için sert malzeme teorisinin kullanılmasının imkânsız olduğu ortaya konmuş ve yumuşak malzemeleri tanımlayan, gevşek olarak adlandırılan kriterleri önerilmiştir (Sharma vd., 2023:445). Düzgün dairesel silindirik gözeneklere sahip sert bir çerçeveden oluşan bir ortamda yayılan ses enerjisindeki termal ve viskoz kayıpları ele alınmış ve hava akışındaki gözeneklilik ve dirençle ilişkilenmiş,

frekansın, gözenek boyutu ve şekil faktörüne bağlı olduğu belirlenmiştir (Sharma vd., 2023:448).

Sualtı akustik kompozit malzemeleri, PU (Poliüretan) matrisinde gözenekli polimer boncuklara sahiptir. PU köpüklerin ses emisyon özellikleri sinema salonlarında, ofislerde ve ses stüdyolarında kullanılır. Esnek köpük yapıların bazı boş noktaları vardır, bu nedenle iyi ses emisyon özellikleri sağlarlar. Ses dalgaları gözenekli emici yüzeye çarptığında, malzemenin içine geçer ve bükülmeye zorlayan hücre duvarı stresine neden olur. Bu nedenle, seslerin girişi veya çıkışı kolayca kontrol edilir. PU, su altı akustik malzemeler için de kullanılır. PU köpüğü için en yüksek akustik değer 1000 ile 2000 Hz arasındaki frekans aralığı olarak kaydedilir. İnsan kulağı 3000 ile 4000 Hz arasındaki bir ses frekansını duyar. Akustik sönümlemedeki iyileştirme derecesi yüzey işlevselliğine bağlıdır (Ates vd., 2022:1159; Moradi vd., 2019:215).

Akıllı yalıtım malzemeleri, çevresel değişikliklere uyum sağlayabilme yetenekleri sayesinde enerji verimliliğini artırmada ve sürdürülebilir bina tasarımlarında önemli rol oynamaktadır. Bu malzemelerin özellikleri, işlevleri ve çevresel değişikliklere nasıl uyum sağladıkları incelenmiştir. Akıllı yalıtım malzemeleri, çevresel koşullardaki değişikliklere yanıt vererek termal, akustik veya diğer yalıtım özelliklerini dinamik olarak ayarlayabilen ileri teknoloji ürünleridir. Bu malzemeler sıcaklık, nem ve ışık gibi dış etkenlere karşı duyarlıdır ve binaların enerji tüketiminin optimize edilmesine yardımcı olabilir (Gencel vd., 2025:13).

SES YALITIMINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Ses emilim katsayısı, bir malzemenin akustik etkinliği hakkında bilgi verir ve malzeme tarafından emilen olay ses dalgalarının enerjisinin kesri olarak tanımlanır (Tudor vd., 2020:8). Ses yalıtımı (iletim kaybı faktörü olarak ifade edilir) ve emilim iki farklı özelliktir. Malzemelerin tipik ses iletim kaybını (STL) etkileyen faktörleri kavramak, bina inşaatı, otomotiv endüstrisi ve gürültü kontrol sistemleri dahil olmak üzere çeşitli uygulamalarda ses yalıtım özelliklerini geliştirmek için önemlidir. Bu faktörlerin tam olarak kavranması, ses yalıtımı için uygun malzemelerin seçilmesini ve tasarımını kolaylaştırır ve performansların uygun şekilde optimize edilmesine yardımcı olur (Natsuki ve Natsuki, 2019:4; Garg vd., 2015:168).

Ses emicilerin içindeki akustik enerji dağılımını en üst düzeye çıkarmak için, sınırlar boyunca viskoz, ısı değişimleri, mekanik titreşim, manyetik ve elektriksel sönümleme gibi çeşitli fiziksel etkiler uygun şekilde ayarlanmalıdır. Örneğin tekstil malzemeleri için; elyaf türü, malzeme kalınlığı, elyaf boyutu, gözeneklilik, yoğunluk, kıvrımlılık ve sıkıştırma gibi birçok faktör malzemenin ses emilimini etkiler fakat ses emilim katsayısının

değeri ile bu faktörler arasında doğrudan basit bir ilişki yoktur (Seddeq, 2009:4614). Viskoz ve termal etkiler; gözenek çapı, ağ şekli ve düzeni, yoğunluk ve malzemenin diğer fiziksel özelliklerinden çok karmaşık şekillerde etkilendiğinden, gözenekli malzemelerde ses emiliminin fiziksel mekanizmalarını ortaya koyan mikro modeller oldukça karmaşıktır. Ses emilimi ile tekstil ürünlerinin fiziksel ve geometrik özellikleri ile arasında direkt bir ilişki olmamasına rağmen, tek tür bir tekstil katmanına ait ses emilimi için yaklaşık bir makro nicelikle, yani özgül akış direnciyle temsil edilebilir. Bir tekstil katmanının akış direnci, havanın gözenekli bir tekstil malzemesine ne kadar kolay girebileceğinin ve malzeme boyunca hava akışının karşılaştığı direncin bir ölçüsüdür. Akış öz direnci ile ses emilimi arasındaki ilişki çok karmaşıktır. Lineer olmayan karmaşık bir bölge için, karakteristik empedans ve yayınım sabiti, akış öz direnç yolu ile hesaplanabilir (Qiu, 2016:53).

Malzemelerin STL'sini ve ses yalıtım etkinliğini etkileyen temel faktörler şunlardır:

Yoğunluk ve Kütle: Daha ağır ve daha yoğun malzemeler genellikle daha yüksek STL'ye sahiptir. Bu, bir ses engelinin kütle artışı, sesi engelleme yeteneği ile orantılı olan "kütle yasası" ilkesine göre belirlenebilir. Ancak, belirli bir değerden sonra, kütle artışı olumsuz sonuçlar da doğurabilir.

Kalınlık: Tekstil yapıların kalınlığı, ses emilimini etkileyen önemli parametrelerden biridir. Yani malzeme ne kadar kalınsa, ses emilimi o kadar yüksek olur. Daha düşük frekanslar için, belli bir yoğunluğa sahip bir malzeme kalınlığı, STL ile orantılıdır. Daha kalın bariyerler daha az titreşebilir ve bu dolayısıyla daha az ses iletilir.

Sertlik ve Elastik Özellikler: Daha yumuşak malzemeler, çakışma bölgesinde sesi daha uygun bir şekilde iletebilir ve bu durum, STL'nin daha düşük olmasını sağlayabilir.

Lif Boyutu: Akış direnci, lif çapıyla ters orantılı görünse de akış direnci ile ses emilimi arasındaki ilişki basit değil, karmaşıktır. Bu, yapının diğer tüm parametreleri aynı kalsa da daha ince liflerin yüksek akış direncine neden olacağı anlamına gelir.

Gözeneklilik: Bir malzemenin gözenekliliği, yapıda bulunan boşluk oranı ile ifade edilir. Yani, boşluk miktarının numunenin toplam hacmine oranı olarak ifade edilir.

Sıcaklık ve Nem: Bu tür etkenler, malzemenin fiziksel özelliklerini ve dolayısıyla STL'yi etkileyebilir. Örneğin, nemin yüksek olması, sesin havadaki hızını değiştirir ve sesin yayılımını etkileyebilir.

İç Sönümleme: İç sönümlenmesi yüksek olan malzemeler, ses enerjisini daha fazla ısıya dönüştürür ve akabinde ses iletiminde azalmaya sebep olabilir. Köpük, kauçuk ve fiberglas türü malzemelerin sönümleme özellikleri yüksektir.

Rezonans: Her bir yalıtım malzemesinin uygun bir şekilde titreştiği bir rezonans frekans değeri vardır. Malzeme bu frekansta sesi yükselterek STL'yi

azaltabilir. Malzemelerin yaygın ses frekanslarında rezonansı önleyecek şekilde tasarlanması gerekmektedir.

Ses Frekansı: Malzemeler farklı frekanslarda değişen STL özellikleri sergiler. Malzemeler yüksek frekanslı sesleri engellemede çok etkili olabilir ancak düşük frekanslarda daha az etkili olabilir ve bunun tersi de geçerlidir.

Tasarım ve İşçilik: Bir malzemenin tasarlanma şekli, ses yalıtım özelliklerini önemli seviyede değiştirebilir. Yani, gözenekler, delikler veya zayıf contalarlanmış uygunsuz düzenlemeler, bir bariyerin STL'sini ciddi anlamda zayıflatabilir.

Kompozit Yapılar: Kompozit malzemeler (örneğin, farklı malzemelerden oluşan katmanlar) kullanmak, her katman için gelişmiş ses yalıtımının belirli frekansları veya ses türlerini hedefleyecek şekilde tasarlanabilme özelliği STL'yi artırabilir.

Sınır Koşulları ve Yan Yollar: Bir yalıtım malzemesinin etkinliği, farklı yapısal elemanlarla nasıl bir etkileşim içinde olduğu ile yakinen ilişkilidir. Ses; tavan, zemin ve bitişik duvarlar gibi ses iletimi için dolaylı yolları ifade eden "yan yollar" aracılığıyla azalabilir veya oldukça etkilenebilir.

SES YALITIMINDA KULLANILAN MALZEMELERİN KARŞILAŞTIRILMASI

Çağdaş dünyadaki birtakım temel ihtiyaçlardan kaynaklanan gürültü kirliliği, çevre ve insan sağlığını ve günlük yaşamı olumsuz olarak etkilemekte ve ciddi anlamda işitme kaybına varan ciddi hasarlara yol açabilmektedir (Goines ve Hagler, 2007:290; Han vd., 2015:95S). Dolayısıyla, modern kentleşme ve teknolojik ilerlemeler sonrası gürültü seviyelerinde önemli artışlar görülmekte ve bu da gürültü kontrolü için hayati önem taşıyan farklı arayış ve yeniliklere yol açmaktadır. Yeni nesil ses yalıtım malzemeleri, özellikle inşaat ve endüstriyel alanlarda gürültü kirliliği ile mücadele etmek ve yaşam kalitesini artırmak amacıyla geliştirilmiştir. Bu malzemeler, verimli bir ses izolasyonu sağlayabilmeleri için daha modern ve teknolojik yöntemlerle üretilmektedirler. Modern ısı ve ses yalıtım malzemeleri her an gelişme içerisinde olup, bu yapıların nasıl ve neye göre iyileştirilmesi gerektiği çok önemlidir (Sharma vd., 2023:447)., Ses emilimi ve iletim kaybı uygulamalarına yönelik son on yılda birçok farklı malzeme türü de geliştirilmiştir. Bu malzemelerin çoğu ses yayılımını azaltmak için pasif emiciler olarak işlev görmektedir. Bunlar arasında, doğal ve sentetik elyaflar gibi akustik malzemeler, nanomalzemeler, dokumasız kumaşlar da vardır (Qiu, 2016:55).

Akustik veya gürültü kontrol malzemeleri, ses dalgalarını, yönlendirme, manipülasyon ve sınırlama yoluyla gürültüyü azaltmak için tasarlanmıştır. Bu tür malzemelerin gürültü azaltma konusundaki etkinliği, ses dalgalarının

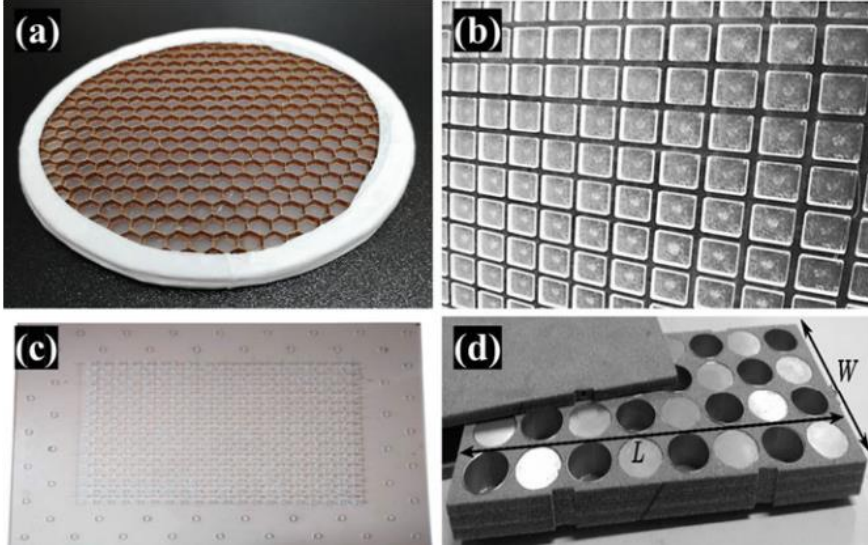
yansıması, dağılımı ve temas esnasındaki iletimini uygun bir şekilde yönetme kabiliyetine bağlıdır. Gürültü kontrolünde, bu tür malzemeler genel olarak; emiciler (absorberler) ve yalıtkanlar/bariyerler olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Ses emiciler, ses dalgalarını sönümleyerek ve bunları ısıya dönüştürme şeklinde gürültüyü azaltmaya yönelik tasarlanmıştır (Raj vd., 2020:11; Mago, 2024:5). Bu malzemelerin çoğu katı olup, vinil esaslı veya yoğun köpük gibi kimyasallardan üretilir. Yoğun veya katı formda olmaları, sesi yansıtma ve dağıtma açısından oldukça önemlidir ve bu durum bu yapıların, gürültüyü azaltmaya yönelik uygulamalar için uygun olmasını sağlamaktadır (Xu vd., 2017:82; Yang vd., 2023:5). Ticari olarak kullanılan yeni nesil ses yalıtım malzemeleri aşağıdaki gibi 5 farklı türde incelenebilir:

1. Akustik Paneller: Sesin emilmesini sağlamak için genellikle özel kumaş kaplı, içi akustik özellikler taşıyan malzemelerle doldurulmuş panellerdir. Bu paneller, ofislerde, müzik stüdyolarında ve konferans salonlarında yaygın olarak kullanılır.
2. Hafif Beton ve Kompozit Malzemeler: Bu malzemeler, ses yalıtımını sağlamak için geliştirilmiş özel beton türleridir. Hafif yapıları sayesinde daha az maliyetli ve kolay uygulanabilirler.
3. Ses Yalıtım Membranları: İnce ve elastik yapıya sahip bu membranlar, sesin yayılmasını engeller ve özellikle binaların duvarlarında, zeminlerinde ve çatılarında kullanılır.
4. Polimer Bazlı Yalıtım Malzemeleri: Polimerler, genellikle sesin iletimini engelleyen, hafif ve dayanıklı malzemelerdir. Bu tür malzemeler, özellikle araç içi yalıtımlarda ve küçük alanlarda etkili olabilir.
5. Özel İzolasyon Malzemeleri: Bu tür malzemeler, titreşimleri azaltarak sesin yayılmasını engellemeye yardımcı olur. Poliüretan veya nitril kauçuktan yapılmış katmanlı universal sönümleme malzemeleridir. Genellikle makineler ve ağır ekipmanlar çevresinde kullanılır.

Ticari olarak kullanılan farklı ses yalıtım malzemelerinin frekans aralığı ve maliyet açısından karşılaştırılması Tablo 4’ de sunulmuştur. Bu veriler, ses yalıtımı konusunda birçok çalışmaya da ışık tutabilir. Hafif çok katmanlı petek membran tipi akustik metamalzemeler (Şekil 3) düşük bir ağırlığı korurken olağanüstü STL elde etmek için geleneksel kütle yasasına meydan okumaktadır (Li vd., 2020:6).

Tablo 4: Ticari Olarak Kullanılan Ses Yalıtım Malzemeleri ve Bazı Özellikleri-
(Mago Vd., 2024:4)

Ses Yalıtım Malzemesi	Ses İletim Sınıfı (STC)	Frekans Aralığı	Metrekare Maliyeti (m ² Başına, \$)
Fiberglas izolasyon	25-45	Düşük-orta	10-30
Akustik köpük paneller	20-35	Orta-yüksek	15-50
PVC veya EVA vinil panel (dolgu katkılı)	20-30	Düşük-orta	20-40
Yeşil tutkal	50+	Orta-yüksek	30-60
Akustik mineral yünü	30-60 45-70	Düşük-orta Düşük-orta	10-30 20-40
Ses geçirmez alçıpan			
Akustik kontrplak	25-50	Düşük-orta	20-40
Akustik tavan döşemeleri	Değişken	Orta	10-30
Çift camlı pencereler	35-50	Orta-yüksek	100-300
Akustik perdeler	15-25	Orta	20-60
Ses geçirmez duvar kağıdı	Değişken	Orta	10-30
Akustik yalıtım battaniyeleri	20-30	Orta	10-30



Şekil 3. (a) Çok Katmanlı Petek Zar (b) Hücresel Yapı (c) Yerel Olarak Rezonanslı Metamalzeme Plakaları (d) Meta-Gözenekli Malzeme

Akustik tekstil kavramı, özellikle yüksek ses emilimi ve yalıtım sağlamaya yönelik kullanılan malzemelere uygulanmaktadır. Akustik tekstilin ana bileşeni, doğal veya sentetik olabilen elyaf türleridir. Ulaşım amaçlı olan yaygın akustik tekstil türleri; dokuma, örme ve dokusuzdur. Çok katmanlı kompozitlerdeki ilerlemeler daha iyi performans sağlıyor ve hafif malzemeler üretiyor. Bu anlamda, karbon fiber takviyeli kompozitlerin kullanımı çok ümit vericidir (Arenas, 2016:147). Ses emici malzemeler ayrıca susturucuları da içerebilir. Hava, susturucu bileşenlerindeki girintili yollar aracılığıyla yönlendirildiğinde, hızı ve basıncı azalır. Ses yalıtımında istenilen sonucu alabilmek için dikkat edilmesi gereken en önemli faktörler; ses frekansı ve yoğunluğu ve ses bariyeri malzemesinin emilim katsayısıdır (Sharma vd., 2023:445).

"Metamalzeme" kavramı, genellikle yapay kompozit malzemelerini tanımlamak amacıyla kullanılır. Akustik metamalzemeler ses dalgalarını kontrol etmek için yeni çözümler sağlar ve özellikle gürültü yayılımını azaltmak için büyük bir potansiyele sahiptir. Son zamanlarda, akustik metamalzemelerin hızlı gelişimi nedeniyle, akustik gürültü azaltma için bu malzemeler dünya çapındaki araştırmacıların dikkatini çekmektedir. Bu metamalzemeler genellikle hem hafif hem de kompakt olup, geleneksel akustik malzemelerle kontrol edilmesi zor olan düşük frekanslı gürültüyü azaltmada mükemmeldir. Son gelişmeler, akustik metamalzemelerin ses dalgalarını etkili bir şekilde kontrol ettiğini ve yapılarının optimize edilmesinin yeni fiziksel olgulara dayalı işlevselliği mümkün kılabileceğini

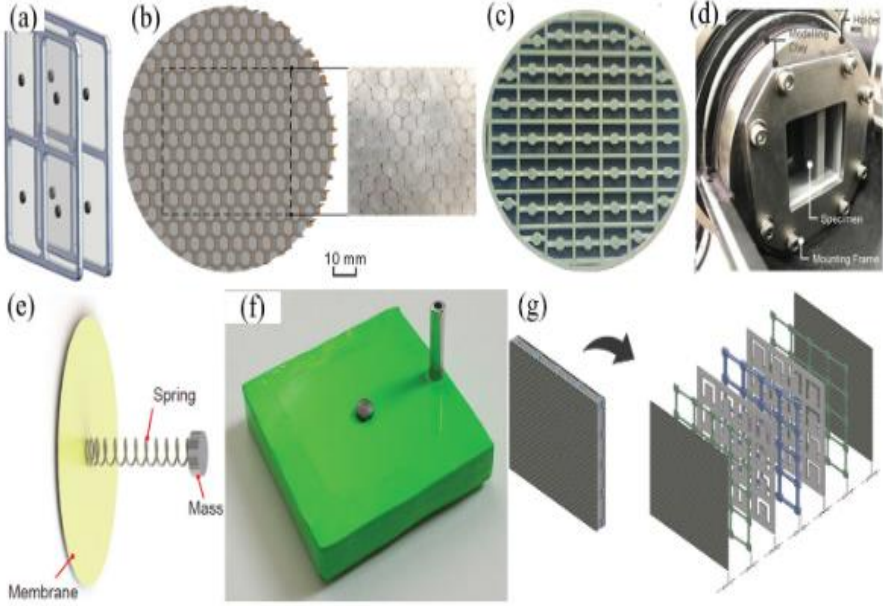
göstermiştir (Gao vd., 2022:5). Liu vd (2019:3), membran tipi akustik metamatallerin geliştirilmesini araştırmış ve geleneksel yöntemlere kıyasla ses yalıtımında beş kattan fazla bir iyileşme sağladığını belirleştirmiştir. Benzer şekilde, Zheng ve Liang (2020:5123), birlikte kürlenmiş sandviç kompozitlerin sönümleme özelliklerinin daha iyi ses yalıtımı sonuçları elde etmek için manipüle edilebileceğini göstermiştir ki bu, üretim metodolojilerinin akustik performansı önemli ölçüde etkilediğini düşündürmüştür. Polimerik köpükler günlük hayatımızda hemen hemen her alanda kullanılır: yatak, mobilya, araba koltuğu ve ayakkabı tabanları. Polimer köpüklerin özellikle ısı yalıtımı alanında kullanıldığı bilinmektedir. Katkı maddelerinin PU köpüklerle birleştirilmesi, inşaat, bina, radar emici, yağ emiciler, yangına dayanıklılık, otomotiv endüstrisi, elektromanyetik girişim kalkanı, sensörler ve biyomedikal malzemeler gibi birçok alanda uygulama sürecini artırır. Polimerik köpüğün hafiflik, ses ve enerji yalıtımı gibi üstün özellikleri nedeniyle bu endüstri hızla büyümüştür (Ates vd., 2022:1161). Gözenekli poliüretan köpüklerin ses emisyon özellikleri sinema salonları, ofis ve ses stüdyolarında kullanılır ve iyi ses emisyon özelliklerine sahiptirler. Ses dalgaları gözenekli emici yüzeye çarptığında, malzemeye absorbe olur ve bükülmeye zorlayan hücre duvarından dolayı seslerin girişi veya çıkışı kolayca kontrol edilir. PU, su altı akustik malzemeler için de kullanılır. PU köpüğü için en yüksek akustik değer 1000 ile 2000 Hz arasındaki frekans aralığı olarak kaydedilir (Verdejo vd., 2009:1567).

.Pasif Ses Yalıtım Metamatalleri

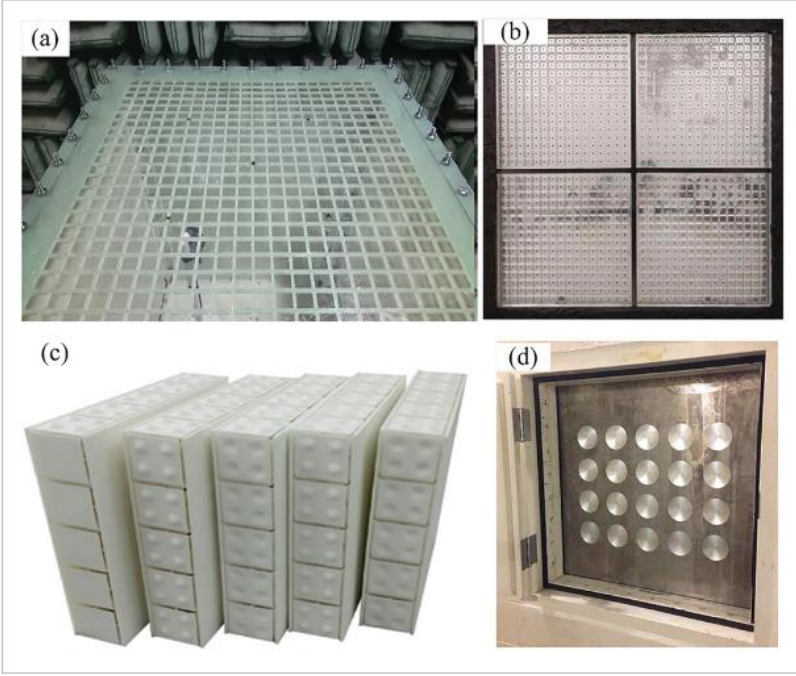
Bazı araştırmacılar daha iyi akustik özellik elde etmek için membran tipi akustik metamatalleri geliştirmeye devam etmiş ve mükemmel ses yalıtımına sahip hafif, petek tipi akustik metamatalleri (Ates vd., 2022:1160) üretmişlerdir (Şekil 4b). Bazı çalışmalarda, hafif bir petek tipi akustik metamatallerin ses iletim kaybı değerlendirilmiştir. Wang vd (2016:4), 6 kg m⁻² statik alan yoğunluğunda 140 Hz'de 26 dB'lik bir ses iletim kaybı tepe noktası elde etmek için kısıtlanmış bir membran tipi akustik metamataller (Şekil 4c) ürettir. Roca vd (2021:6), birleştirilmiş rezonans mekanizmasına dayalı yeni bir akustik metamataller olarak çok rezonanslı katmanlı bir akustik metamataller (Şekil 4g) konseptini önerdiler.

Lin vd (2021:3), rezonanslı akustik metamataller içeren bir sandviç yapı kompoziti (Şekil 5b) önermiş ve ses iletim kaybının analitik bir modelini oluşturmuştur. Ses yalıtım testleri sonucu, sandviç yapının 370–670 Hz düşük frekans aralığında mükemmel ses yalıtım performansı gösterdiği vurgulanmıştır. Rezonansın neden olduğu ses iletim kaybındaki düşüşü engelleyen ve geniş bir frekans aralığında yüksek ses yalıtım performansına ve mekanik mukavemete sahip yeni bir metamataller sandviç yapısı (Şekil 5c) önerilmiştir. Yukarıda belirtilen membran veya ince levha akustik metamatallerlere ek olarak, labirent tipi akustik metamataller dünya

apında araştırmacıların dikkatini çekmiştir. Yine, Chen vd (2015:4), yaptıkları bir araştırmada, ana borunun bir tarafına yerleştirilmiş labirent borulara sahip bir akustik metamazemenin dūřuk frekans ve geniş bant aralığında mūkemmel ses izolasyon özellikleri gösterdiği gözlenmiştir. Membran ve ince levha tipi akustik metamazemelere ek olarak, 2 boyutlu akustik-kara delik plakaların (şekil 5) ses yalıtımı performansı, ses dalgası kateterleri veya akustik yankı odaları kullanılarak değerlendirilmiştir (Du vd., 2019:6).

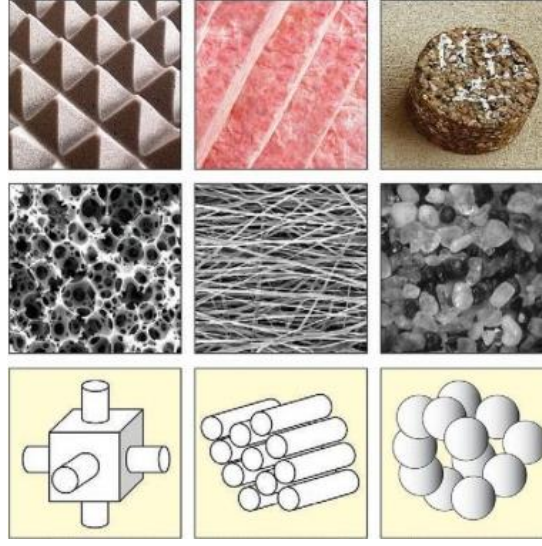


şekil 4. Membran tipi ses izolasyon metamazmeleri. a) Dört niteli bir membran metamazeme b) Hafif petek tipi akustik metamazeme c) kısıtlı membran tipi akustik metamazeme d) Gerilimsiz membran e) İnce membrandan oluşan akustik bir metayüzey f) Ayarlanabilir membran tipi akustik metamazeme g) ok rezonanslı-katmanlı akustik metamazeme



Şekil 5. İnce levha ses izolasyonu metamalzemeleri a) Kare levha tipi akustik metamalzeme paneli. b) Rezonanslı akustik metamalzeme ile birleştirilmiş sandviç yapı c) Yeni metamalzeme sandviç yapısı d) 2 boyutlu akustik kara delik ince levha

Özet olarak, üç yaygın pasif ses yalıtımı metamalzemesi türü şunlardır: 1) ön gerilimli membranlar ve sert çerçeveler; 2) akustik kara delik plakaları da dahil olmak üzere ince levhalar ve ek yapılar ve 3) kapalı ve havalandırılmış labirent veya spiral metamalzemeler. Gözenekli ses emici malzemeler arasında üç ana grup ayırt edilebilir: hücresel, lifli ve granüler (Sharma vd., 2023:444). Şekil 6'da üç ana gözenekli ses emici malzeme türü, karşılık gelen mikro fotoğraflar ve ses emici özelliklerini tanımlamak için kullanılan modeller gösterilmektedir.



Şekil 6. Üç Tip Gözenekli Ses Emici Malzeme Örnekleri ve Fiziksel Modelleri

Sert bir duvarla birleştirilmiş ses emici malzeme, kapalı alanlarda (örneğin tiyatro odaları, makine odaları ve diğer çeşitli işlevsel binalar) ses yalıtımı için yaygın olarak kullanılır (Setunge ve Gamage, 2016:169). Hindistan cevizi lifi paspasları, geri dönüştürülmüş yün lif paspasları, halılar ve kumaşlar, güçlü duvarlara ve zeminlere monte edildiğinde, duvardan geçen gürültü iletimini azalttığı ve ses emilim katsayısını önemli ölçüde iyileştirerek yankılanmayı azalttığı kanıtlanmıştır. Gürültünün önemli ölçüde kontrol edilmesinde, malzemenin gözenek yapısı ve dokuma türü oldukça önemlidir (Şekil 7)



a

b

c

Şekil 7. Lif ve Dokunmuş Paspaslar a. Yün Lifi b. Hindistan Cevizi Lifi c. Sert Duvar Destekleyici

Pasif Ses Emilim Metamalzemeleri

Gürültü kontrolünü tam olarak sağlamak için yalnızca ses yalıtımlı bir malzeme kullanmak yeterli olmamakta ve dolayısıyla bu tür yapıları bir ses emici ile birleştirmek gerekmektedir. Son on yıldaki gelişmelerden, hafif yapıların tipik bir temsilcisi olan membran akustik metamalzemeler daha da önemsenmektedir. Chen vd (2014:2929), membran akustik metamalzemelerindeki ses enerjisi emilim mekanizmasını araştırmak için teorik bir titreşimli ses plakası modeli oluşturdular. Mevcut araştırmalara göre, dört tür pasif ses emici metamalzeme vardır, bunlar: ön gerilimli membranlar, delik ve dikiş özellikleriyle birleştirilmiş çok katmanlı ince plakalar, kapalı labirent ve spiral metamalzemeler ve gözenekli malzemelerdeki yanal plakalar veya rezonatörler. Şu anda, çoğu pasif ses emici metamalzeme, düzlem dalgalarının normal olay koşulları altında işlev görmektedir. Tekstil malzemeleri daha esnek ve daha az maliyetli olup kullanım açısından tasarlanması daha kolaydır. Tekstil malzemelerinin bu avantajları, ses yalıtımı ve ses emilimi özelliklerinin araştırılmasını ön plana çıkarmıştır. Tekstiller, ses bariyeri malzemeleri için çok iyi bir aday olmasa da doğal gözenekli yapıları ses emiliminde bazı avantajlar sağlar. Lifli paspaslar, iğneyle delinmiş dokunmamış kumaşlar ve dokunmamış kumaşlardan yapılmış polimer kompozitler, günümüzde yaygın olarak araştırılan tekstil malzemeleri arasındadır. Kompozit üretiminde, elyaf türü, elyaf içeriği ve boşluk oranı gibi faktörleri optimize etmek amacıyla birtakım çalışmalar da yürütülmektedir. Akustik özelliği iyi olan geri dönüşümlü malzemeler ve sıra dışı aktif karbon esaslı keçeler üzerine de çalışmalar yapılmaktadır. Özellikle akustik tekstiller, ulaşım alanında, iç gürültü ve titreşimi kontrol etmek ve konforlu bir seyahat sunmak için kullanılır (Singh ve Mukhopadhyay, 2016:101).

Aktif Akustik Metamalzemeler

Gürültü kontrolü için lifli malzeme kullanan yöntemlerin incelenmesi birçok fırsatı doğurmaktadır. Granüler, hücreli veya lifli malzemeler, iç ve dış mekân uygulamaları için kullanılan üç ana ticari ses emici malzeme türüdür. Lifli malzemelerde hem doğal hem de yapay alternatifler bulunabilir. Doğal lif akustik paneller daha az sağlık riski oluşturdıkları ve geleneksel sentetik liflere göre daha çevre dostu oldukları için daha popüler hale gelmiştir. Bu nedenle, insan sağlığı ve güvenliği için, üreticiler ve mühendisler sentetik malzemelerin yerini alacak doğal liflerden yapılmış alternatifler aramaktadır (Sharma vd., 2023:443). Bazı araştırmacılar son zamanlarda plastik ve kauçuk granül malzemelerini birleştirerek fiber kompozitleri üretmeye yoğunlaştılar (Jung vd., 2019:151; Sharma vd.,

2023:443). Düşük frekanslı ses emilimini iyileştirmek için kimyasal bileşim, lif-tane oranı, lif boyutu ve tane boyutu gibi ek değişkenlerin tümü önemli roller oynar. Doğal lifler, sentetik liflere göre daha hafif, biyolojik olarak parçalanabilir ve çevre dostu oldukları için tercih edilir. Akustik emilim malzemeleri açısından, doğal lif takviyeli polimer kompozitler şu anda en popüler olanlardır (Sharma vd., 2023:445).

Gürültü kontrol uygulamaları için birçok gözenekli malzeme kullanılmaktadır. Gözenekli elastik malzemeler köken ve kapsamına göre sert, gevşek ve elastik olarak kategorize edilmiştir. Sert gözenekli malzeme tipleri şunları içerir: sert keçe, hücresel kauçuk, gözenekli seramikler ve sinterlenmiş metaller. Gevşek Gözenekli Malzemeler hafif cam elyaf malzemesi, PET keçeler bulunur. Elastik gözenekli malzemeler arasında melamin ve otomobil ve havacılık uygulamalarında kullanılan poliüretan gibi çoğu köpük bulunur. Gözenekli malzemeler jeofizik, termal teknoloji ve petrol endüstrisi gibi uygulamalı olan farklı alanlarında incelenmiştir (Sharma vd., 2023:444). Ses dalgaları ve gürültü tamamı veya bir kısmı, yalıtımlı veya yalıtımsız, ses geçirmez vb. olabilen muhafazalar ve bariyerler tarafından bastırılabilir ve azaltılabilir. Gürültüyü önemli ölçüde azaltmak için, bariyer duvarının gürültü kaynağına bakan tarafı akustik emilim maddesiyle kaplanır. Örneğin kurşun levhalar yüksek yoğunluklu yapıları nedeniyle ses geçişini etkili bir şekilde engellerler. Kullanım alanları özel projelerde, makine daireleri gibi alanlarda tercih edilebilir (Erzen vd., 2025:1539). PVC ses bariyerleri polivinil klorür bazlı esnek bir malzemedir. Hafif ve ince olup montajı kolaydır. Kullanım alanlarına örnek olarak duvar içi ve tavan uygulamaları verilebilir. Beton paneller yüksek yoğunluklu, ağır ve sert bir yapıya sahiptir. Gürültü iletimini etkili bir şekilde önlerler. Endüstriyel alanlarda açık hava bariyeri olarak kullanılabilirler. Akustik alçıpan ses bariyeri olarak kullanılır ve hafif ve ince bir yapı ve estetik bir görünüm sunar. Ev, ofis ve okullarda yaygın olarak kullanılır. Kauçuk bazlı malzemeler, yüksek yoğunluklu kauçuk bazlı katmanlardır. Esnek, dayanıklı ve ses iletimini engelleyen bir yapıya sahiptir. Zemin kaplamaları gibi uygulamalarda tercih edilirler (Erzen vd., 2025:1541).

Biyobazlı ve nanoteknoloji destekli malzemeler ile olan çözümler, geleneksel seçeneklere kıyasla daha düşük çevresel etki ve üstün performans sunuyor. Bunlar, modern teknolojilerle geliştirilen yenilikçi malzemelerdir. Ses geçirmez paneller çok katmanlı bir yapıya sahiptir, ses emici ve engelleyici özellikler sağlar. Hafif ve yüksek performanslıdır ve stüdyolarda ve ticari binalarda tercih edilirler. Akustik jeller ve membranlar, levhalar ve ince membranlar ses iletimini en aza indirir. İnce yapıları ile yer kaybını önler ve duvar içi ve kaplama sistemlerinde kullanılır. Faz değişim malzemeleri (PCM) hem termal hem de akustik izolasyon sağlar. Yüksek teknolojili binalarda ve endüstriyel alanlarda yaygın olarak kullanılırlar. Şekil 8, bazı ses yalıtım malzeme örneklerini göstermektedir (Erzen vd., 2025:1541).

Akıllı yalıtım malzemeleri, çevresel değişikliklere uyum sağlayabilme yetenekleri sayesinde enerji verimliliğini artırmakta ve sürdürülebilir bina tasarımlarında önemli rol oynamaktadır. Bu malzemelerin özellikleri, işlevleri ve çevresel değişikliklere nasıl uyum sağladıkları incelenmiştir. Akıllı yalıtım malzemeleri, çevresel koşullardaki değişikliklere yanıt vererek termal, akustik veya diğer yalıtım özelliklerini dinamik olarak ayarlayabilen ileri teknoloji ürünleridir. Bu malzemeler sıcaklık, nem ve ışık gibi dış etkenlere karşı duyarlıdır ve binaların enerji tüketiminin optimize edilmesine yardımcı olur (Erzen vd., 2025:1539).

Polimerik köpükler genellikle yataklar ve arabalarda yastıklama ve oturma malzemeleri olarak kullanılır. Bu tür polimerler, yaşam alanlarını oldukça kolaylaştırmaktadır. Gözenekli veya gevşek yapılı polimer köpük tipi malzemeler; araba, pompa, kompresör, jeneratör, elektrik bağlantı parçaları ve diğer cihazlarda yaygın olarak kullanılır (Gripp, 2018; Sharma vd., 2023:445). Polimer köpük malzemesinin uygulama alanına göre üretilme yeteneği, önemli bir ayırt edici özelliktir.



Şekil 8. Ses Yalıtım Malzemeleri.

Çevre dostu ve sürdürülebilir özellikleriyle öne çıkan doğal malzemeler de ses yalıtımında kullanılmaktadır. Hindistan cevizi lifleri doğal liflerden üretilir ve yüksek ses emme kapasitesine sahiptir. Çevre dostudur ve geri dönüştürülebilir. Evlerde ve ticari alanlarda yaygın olarak kullanılır (Erzen vd., 2025:1544). Mantar paneller gözenekli ve hafif bir yapıya sahiptir.

Hem ses hem de ısı yalıtımı sağlarlar. Genellikle duvar ve zemin uygulamalarında tercih edilirler. Yün malzemeler doğal, yenilenebilir ve nefes alabilir. Hem çevre dostu hem de etkili ses yalıtımı sağlarlar. Çatı, tavan ve duvar yalıtımında kullanılırlar (Erzen vd., 2025:1544).

Maliyet değerlendirmesi

Yalıtım malzemeleri hem inşaat sektöründe hem de diğer endüstrilerde büyük bir pazar payına sahiptir. Yalıtım malzemelerinin seçimi sadece teknik ve performans kriterlerine dayanmaz, aynı zamanda ekonomik ve çevresel maliyetler de önemli rol oynar. Yalıtım malzemelerinin maliyeti; malzemenin üretim maliyeti, nakliye ve uygulama maliyetlerini içerir. Ayrıca, malzemenin kullanım esnasında sağladığı enerji tasarrufu ekonomik analizlerde önemli bir faktördür. Uygulama aşamasında dikkate alınması gereken en önemli maliyet faktörleri işçilik, uygulama süresi ve kullanılan malzemenin verimliliğidir. Literatürdeki çalışmalarda farklı yalıtım malzemelerinin maliyet analizleri yapılmış ve ekonomik verimlilikleri karşılaştırılmıştır. Yalıtım malzemelerinin ilk maliyeti ile uzun vadeli enerji tasarrufları arasındaki dengeler değerlendirilmiştir (Erzen vd., 2025:1546). Örneğin, Shanaz ve Rana (2020:496) nanokompozitlerin iyi akustik özellikleri mekanik dayanıklılığa göre maliyet ve gelişmiş ses yalıtımı için karbon nanotüpler (CNT) ile zenginleştirilmiş kompozit malzemelerin ekonomik uygulanabilirliğini belirlemişlerdir. Ayrıca, Hu vd (2019:4) mikro hücreli köpürtücü malzemelerin ses yalıtım performansı üzerine maliyet ve ses yalıtım etkilerini ortaya koyarak, teknolojiye ilerlemelerin kaliteden ödün vermediğini öne sürmüşlerdir. Doğal ve geri dönüştürülmüş malzemeler genellikle daha düşük maliyetlidir ancak ısı yalıtım performansı açısından bazı sınırlamalara sahip olabilir. Yalıtım malzemesinin doğru ve etkili bir şekilde uygulanması maliyetleri etkileyen önemli bir faktördür. Ayrıca bazı yalıtım malzemelerinin uzun vadeli bakım maliyetleri düşüktür. Yalıtım malzemelerinin verimliliği enerji tasarrufu sağlar ve yalıtımın ömrü boyunca sağlanan tasarruflar yüksek ilk yatırım maliyetlerini telafi edebilir. Farklı yalıtım malzemelerinin karşılaştırmalı özelliklerine ilişkin önemli veriler Tablo 5’ de verilmektedir (Chen ve Liu, 2022:133).

Tablo 5: Farklı Yalıtım Malzemelerinin Maliyet ve Ömürlerinin Karşılaştırması.

Ses Yalıtım Malzemesi	Başlangıç Maliyeti	Uygulama Süresi (Saat/m ²)	Bakım Maliyeti (€/Yıl)	Ortalama Ömrü (Yıl)
Taş yünü	15	20	1,2	50-100
Cam yünü	13	22	1,0	30-50
Poliüretan	18	15	1,5	25-40
Köpük	12	18	0,8	30-50
Polistiren Köpük				

UYGULAMALAR

Ses emiciler genellikle kapalı alanlarda örneğin ses basınç seviyesi ve yankılanma süresi gibi özellikleri kontrol etmek için kullanılır. Sürdürülebilirliğin inşaat ve tasarımda önem arz ettiği bir çağda, çevre dostu ses yalıtımı uygulamalarını geliştirmek zorunludur. Geri dönüşümlü malzemeler kullanmak, enerji açısından verimli tasarımlar sunmayı ve çevre dostu üretim süreçlerini benimseyerek ses yalıtımı çözümlerinin ekolojik anlamda faydalı kılmayı hedefler (Arenas vd., 2020:4). Ses yalıtımı ile sürekli gelişen yapılaşma arasındaki karmaşık ilişki, bu tür imar planlamanın ve mimari yeniliklerin, gürültü kirliliğini nasıl kontrol edebileceğini ve kentlerdeki yaşam kalitesini nasıl etkileyebileceğini ortaya koymaktadır. Bilimsel olarak uygun bir kentsel akustik tasarım çabaları oldukça etkili olacaktır. Bir mekandaki yüzeyleri akustik olarak emici malzemelerle kaplamanın gerekli olup olmadığı, birtakım faktörlere göre belirlenir. Örneğin bir binek otomobili içinde birçok türde ses özellikle motor sesi, baskın gürültü kaynaklarından biridir ve iç ortamın ses kalitesini etkiler. Motor gürültüsü ile dönüş hızı arasındaki korelasyon ilişkisi, aktif kontrol sistemleri kullanılarak motor sesinin kontrol edilmesini sağlar (Lee, 2018).

Dünya enerji krizi; hafifliği, yüksek çalışma sıcaklığı ve mükemmel ısı yalıtım özellikleri nedeniyle cam yününün geliştirilmesi için, mikro siklon ve santrifüj üfleme işlemleri gibi elyaf hazırlama yöntemlerine yönlendirdi. Günümüzde cam yünü, kaya yünü ve seramik yünü için üretim teknolojileri esas olarak santrifüj üfleme işlemi ve alev üfleme işlemine dayanmaktadır. Elyaf çapı, üretim sıcaklığı, soğutma süresi, bileşim ve ortam koşullarına bağlıdır. Ultra ince cam yünü, hafif, mükemmel ısı ve ses yalıtımına sahip ve kimyasal açıdan dirençlidir (Erzen, 2025). Örneğin uçak sanayinde konforlu bir sıcaklık, sessiz ve güvenli bir uçuş ortamı sağlar. Cam yünü, taş yünü ve seramik yünü farklı özellikler göstermektedir. Pamuk, levha, kemer, battaniye, keçe ve tüp kabuk gibi farklı kimyasal bileşenleri ve üretim

süreçleri nedeniyle birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Chen ve Liu, 2022:132). Yine, ses yalıtımının davranışı konusunda, inorganik partikül dolgulu polimer kompozitler, bazı bilim adamları tarafından da ayrıntılı bir şekilde araştırılmıştır (Liang ve Zhu, 2016:2140). Örneğin, karbon nanotüplerin, Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) kompozitlerine katılması sonrası, ses yalıtım özelliğinin önemli ölçüde arttığı gözlenmiştir (Lee vd., 2008:1470).

İyi ses yalıtım özelliklerine sahip daha hafif malzemelerin kullanılması ile, gürültü duvarları inşa edilebilir. Otoyol gürültü azaltma duvarları için kereste veya gözenekli beton kullanılırken, hücresel veya gözenekli duvarlar, bina veya duvar uygulamaları için ise gözenekli beton daha uygundur (Setunge ve Gamage, 2016:176). Otoyol gürültü kontrolü için ahşap ve ahşap paneller, yaygın bir şekilde gürültü azaltma bariyerleri olarak kullanılır. Malzemenin uygunluğunu test etmek amacıyla, her ülke farklı standart kullanabilir. Örneğin, Avustralya'da, otoyol gürültüsünden kaynaklanan rahatsızlığı en aza indirmek için yaygın olarak ahşap tabanlı gürültü azaltma bariyerleri kullanılır. Bu gürültü bariyerleri için, amaca ve inşaat maliyetine bağlı olarak tek kanatlı, çift kanatlı veya emici çekirdekli tek kanatlı kullanılır (Watts, 2007). Ahşap veya kompozit ahşap malzemeler, makine muhafazaları, kirişler arası duvarlar ve bölmeler gibi çeşitli iç mekân uygulamalarında gürültü azaltma amacı ile yaygın olarak kullanılır. Paneller arasında veya panelin içinde hava boşluklarının olması, diğer malzemeler için de ses iletim kaybını belirginleştirmiştir (Setunge ve Gamage, 2016:176).

Suntalar genellikle düşük yoğunluklu ve yumuşak odun atıklarının formaldehit reçinesi veya izosiyanat reçinesi ile birleştirilmesiyle üretilir. Bu kompozit, yoğun bir şekilde konutların zemininde ve çok katlı konutlarda zemin panelleri olarak kullanılır. Düşük reçine içeriği kullanılarak üretilen düşük yoğunluklu suntalar, birçok araştırmacı tarafından yapısal zeminler dışında ses ve ısı yalıtımı özellikleri amaçları gibi çeşitli uygulamalar için araştırılmış ve çeşitli ahşap kompozit malzemelerin ses emilim katsayıları karşılaştırılmış ve Tablo 6'da verilmiştir (Setunge ve Gamage, 2016:174). Düşük frekanslı sesler için, genel amaçlı levhalara göre daha yüksek yoğunluklu ticari sunta ve kontrplaklar, daha iyi ses direncine sahiptir. Yoğun sesleri absorbe etmek amacı ile düşük yoğunluklu levhanın kalınlığı ayarlanabilir.

Tablo 6: Ahşap Esaslı Malzemelerin Ses Absorpsiyon Katsayıları

Kompozit Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Kalınlık (mm)	Ses Absorpsiyon Katsayısı (α) (125-2000 Hz Frekans Aralığı için)
Kenaf bağlayıcısız yonga levha	0,15	12	0,02-0,04
Ahşap levha (çam)	0,52	19	0,09-0,08
Kontrplak	0,55	12	0,25-0,10
Ticari sunta	-	20	0,26-0,08
Düşük yoğunluklu sunta	0,30	30	0,06-0,52
Yalıtım suntası	0,22	12,7	0,04-0,69
Düşük yoğunluklu lif levha	0,20	12	0,006-0,71

Ses yalıtımında çığır açma potansiyeline sahip yeni akustik malzemeleri, sadece ses engelleme özelliklerini geliştirmekle kalmayıp aynı zamanda sürdürülebilirlik, maliyet etkinliği ve çok yönlülük ilkelerini de benimsemesi öngörülmektedir. Malzeme bilimindeki atılımların, çeşitli endüstrilerde üstün gürültü azaltma ve akustik performans sunan yenilikçi çözümlere öncülük etmesi beklenir (Mago vd., 2024:5; Cho vd., 2024:3). Akıllı teknolojileri ses yalıtım sistemlerine entegre etmek, gelecek için kaçınılmaz bir yol olarak ön plana çıkar. Bunlar, uyarlanabilir akustik ortamlar oluşturmak için gelişmiş sensörler, aktüatörler ve yapay zekâ algoritmaları kullanmayı içerir. Bu akıllı sistemlerin gerçek zamanlı gürültü kontrolü ve kişisel konfor sunması, dinamik olarak sürekli değişen akustik koşullara uyum sağlaması öngörülmektedir. Pratik uygulamaları çeşitli olup birçok endüstri ve ortamda kullanılmaktadır (Mago vd., 2024:5; Mago vd., 2022:3; Ghassabi ve Talebitooti, 2023:4). Kritik uygulamalardan bazıları aşağıda sıralanmıştır:

- *İnşaat ve Mimarlık:* Ses yalıtım malzemeleri, duvar, zemin ve tavanlar aracılığıyla gürültü iletimini azaltmak amacıyla kullanılmaktadır. Bu tür yapı malzemeleri, özellikle konfor ve mahremiyetin ön plana çıktığı çok üniteli konut, otel, okul, hastane ve ofisler gibi mekanlar için son derece önemlidir.
- *Otomotiv Endüstrisi:* Bu alanda ses yalıtım malzemeleri; yol, rüzgâr ve motor gürültüsünü azaltmak ve araç içerisindeki konfor düzeyini artırarak daha keyifli bir sürüş sağlamak amacıyla kullanılır.
- *Üretim ve Endüstriyel Ortamlar:* Fabrika ve endüstriyel tesislerde makine gürültüsünü azaltmak için de ses yalıtım malzemeleri kullanılır. Bu malzemeler, yalnızca çalışanların konforu için değil, aynı zamanda gürültü kirliliği ile ilgili mesleki sağlıklardan korunmak ve güvenlik standartlarına uymak için gereklidir.

- *Ev Aletleri:* Ses yalıtımı, bulaşık ve çamaşır makineleri, süpürge ve buzdolapları gibi ev aletlerinden kaynaklanan gürültüyü azaltmak ve konut ortamlarında bunları kullanıcı dostu hale getirmek için kullanılır.
- *HVAC Sistemleri:* Binalarda gürültü kaynakları genellikle, havalandırma, ısıtma ve klima sistemleri olarak görülebilir. Ses yalıtım malzemeleri bu sistemlerin ürettiği gürültüyü en aza indirerek iç ortamların konforunu artırabilir.
- *Ulaşım:* Ses yalıtım malzemeleri olarak kullanılan ses bariyerleri, otoyol, demiryolları ve yerleşim alanlarındaki trafik gürültüsünden korunmak ve ulaşımdaki farklı gürültü etkilerini azaltmaya yardımcı olmak için kullanılır.
- *Hassas Ortamlar:* Sessizliğin önemli olduğu kütüphane, hastane, okul ve büyük işyerleri gibi ortamlarda, ses yalıtım malzemeleri çalışma, dinlenme veya iyileşme için elverişli bir atmosfer oluşturmaya yardımcı olur.
- *Ses Ekipmanı:* Genellikle bozulmayı ve parazitlenmeyi en az seviyeye çekerek ses kalitesini iyileştirmek için ses yalıtım malzemeleri olarak yüksek kaliteli hoparlörler ve ses ekipmanları kullanılır.
- *Kişisel Koruyucu Donanım (KKD):* Yüksek gürültü seviyelerine sahip endüstrilerde, çalışanları sürekli maruz kaldıkları bu problemde, ses yalıtım malzemelerinden yapılmış kulaklık ve kulak tıkaçları gibi cihazlar ile koruyabilmektedir.

SONUÇ

Yirminci yüzyıldan itibaren yapı yönetmelikleri, özellikle insan sağlığı ve çevresel refahı korumaya yönelik olarak binalarda gürültü kontrolü ve ses yalıtımına artan bir önem atfetmiştir. Bu bağlamda, yalıtım malzemelerinin evrimi yalnızca akustik konfor sağlamakla sınırlı kalmayıp, aynı zamanda enerji verimliliği ve çevresel etkilerin azaltılması gibi küresel ölçekteki sürdürülebilirlik hedefleriyle de örtüşen çözümler sunmaktadır. Nitekim birçok ses yalıtım malzemesi aynı zamanda yüksek termal yalıtım kapasitesine sahip olup, bu özelliğiyle çoklu faydalar sağlamaktadır. Ancak, geleneksel yalıtım malzemeleri—örneğin mineral yün ve poliüretan köpük—çevresel ve insan sağlığı açısından bazı olumsuzluklar barındırdığı için eleştiri odağı hâline gelmiştir. Yalıtım teknolojileri her ne kadar çok sayıda avantaj sunsa da başlangıç maliyetleri, teknik karmaşıklıklar ve düzenleyici engeller gibi çeşitli sınırlılıklara sahiptir. Buna karşın, sürdürülebilir inşaat uygulamalarına yönelik küresel eğilimler, yalıtım malzemelerinde inovasyona ve pazarın genişlemesine yönelik önemli fırsatlar doğurmaktadır. Gelecekte

yalıtım malzemeleri, yenilenebilir kaynaklara dayanan, uyarlanabilir ve akıllı teknolojilerle desteklenen çözümlerle şekillenecektir.

Dijital üretim teknikleri ile veri odaklı tasarım ve optimizasyon süreçlerinin entegrasyonu, yalıtım malzemelerinde köklü bir dönüşümü tetiklemektedir. Bu gelişmelerin, sürdürülebilir bina teknolojileri açısından yeni standartların oluşmasına öncülük etmesi beklenmektedir. Yıllık %6'nın üzerinde öngörülen büyüme oranı ile yalıtım sektörü; geri dönüştürülmüş, biyolojik olarak parçalanabilir ve doğal içerikli ürünlerin artan benimsenmesiyle yön değiştirmektedir. Konut, ticari ve çok katlı yapılarda kullanılan ses emici sistemler, genellikle gözenekli yapılar veya rezonans esaslı mekanizmalarla gerçekleştirilir. Mevcut malzeme çeşitliliğine rağmen, özellikle düşük frekanslarda etkili ses emilimi açısından hâlâ iyileştirilmeye açık pek çok yön mevcuttur. Bu noktada aktif gürültü kontrol sistemleri, geleneksel pasif yöntemlere kıyasla düşük frekanslı gürültüler için daha etkili bir çözüm sunmakta ve sınırlı alanlarda uygulanabilirliği ile öne çıkmaktadır. Aktif kontrol, orijinal sesin üretim, iletim ve alıcıya ulaşım aşamalarında müdahale edilerek gürültünün azaltılmasını sağlar.

Teknolojik ilerlemeler, yalıtım malzemelerinin performansını artırmak amacıyla yeni nesil çözümler sunmaktadır. Vakum yalıtım panelleri (VIP'ler) ve nanoteknoloji temelli malzemeler, yüksek termal performans, düşük çevresel etki ve optimize edilmiş enerji kullanımı gibi özellikleriyle dikkat çekmektedir. Faz değişim malzemeleri, adaptif yalıtım teknolojileri ve nanomalzemeler, yapıların enerji taleplerine ve çevresel koşullara dinamik biçimde uyum sağlamasına olanak tanıyarak hem verimliliği hem de dayanıklılığı artırmaktadır. Bu bağlamda kullanılan malzeme çeşitliliği de önemli ölçüde artmıştır. Ahşap bazlı kompozitler, havalandırılmış beton, çok katmanlı plastik mikro kılcal filmler (MCF), tekstil bazlı elyaf ve dokuma yapılar hem iç mekân akustiklerini iyileştirmekte hem de dış kaynaklı gürültüyü sınırlamaktadır. Selüloz ve mantar gibi biyobazlı hammaddeler ile aerojeller ve vakum yalıtım sistemleri, binaların karbon ayak izini azaltma potansiyeli taşımaktadır. Bu tür malzemeler yalnızca enerji tasarrufu sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda iç mekân hava kalitesini ve kullanıcı sağlığını da iyileştirmektedir.

Son yıllarda tekstil malzemeleri, akustik uygulamalarda alternatif yalıtım çözümleri olarak ön plana çıkmaktadır. Ancak bu malzemelerin, geleneksel cam elyaf paspaslar ve poliüretan köpüklerle rekabet edebilmesi için performans açısından daha da geliştirilmesi gerekmektedir. Çok katmanlı kompozit yapılarıdaki ilerlemeler sayesinde daha hafif ve yüksek performanslı tekstil ürünleri üretilmektedir. Bu çerçevede, özellikle karbon fiber takviyeli kompozitlerin kullanımı oldukça umut vericidir. Geri kazanılmış malzemelerin yeniden değerlendirilmesi ve çevre dostu içeriklerin otomotiv sektörü gibi farklı alanlarda kullanımı, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşma yolunda önem taşımaktadır. Bununla birlikte, lifli malzemelerin akustik özelliklerinin daha kesin şekilde tahmin edilmesine yönelik teorik ve yarı

deneysel modellerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Daha güvenilir modelleme yaklaşımları, ileri düzey akustik tekstillerin tasarımında mühendislik sürecini destekleyerek malzemelerin kullanım alanlarını genişletecektir. Ayrıca, akıllı tekstillerin geliştirilmesi günümüzde önemli bir araştırma alanı hâline gelmiştir. İletken ipliklerle donatılmış kumaşlar sayesinde elektriksel devreler tekstil yüzeylerine entegre edilebilmekte, bu da aktif gürültü kontrol sistemlerine veri ileten sensör işlevli çözümleri mümkün kılmaktadır.

Sonuç olarak, yalıtım malzemelerinin geleceği; teknolojik gelişmeler, çevresel sürdürülebilirlik hedefleri ve ekonomik faktörler arasında sağlanacak dengeye bağlıdır. Performans, dayanıklılık ve maliyet etkinliği açısından optimize edilen ses yalıtım malzemeleri, sektördeki inovasyonun ana eksenini oluşturmaktadır. Geri dönüştürülebilir, enerji tasarruflu ve nanoteknoloji destekli çözümlerin yaygınlaşmasıyla birlikte, yalıtım sektörü büyümeye ve dönüşmeye devam edecektir. Bu süreçte, mühendislerin modern yapıların ve ulaşım araçlarının gereksinimlerine uygun estetik, teknik, ekonomik, çevresel ve güvenlik kriterlerini karşılayan akustik malzemelerin geliştirilmesine odaklanması kritik öneme sahiptir.

REFERANSLAR

- Ang, L. Y. L., Cui, F., Lim, K. M., & Lee, H. P. (2023). A systematic review of emerging ventilated acoustic metamaterials for noise control. *Sustainability*, 15(5), 4113.
- Arenas, J. P., del Rey, R., Alba, J., & Oltra, R. (2020). Sound-absorption properties of materials made of esparto grass fibers. *Sustainability*, 12(14), 5533.
- Arenas, J. P. (2016). Applications of acoustic textiles in automotive/transportation. *Acoustic textiles*, 143-163.
- Ates, M., Karadag, S., Eker, A. A., & Eker, B. (2022). Polyurethane foam materials and their industrial applications. *Polymer International*, 71(10), 1157-1163.
- Berardi, U.; Iannace, G.; Di Gabriele, M. The acoustic characterization of broom fibers. *J. Nat. Fibers* 2017, 14, 858–863.
- Chen, Y., Huang, G., Zhou, X., Hu, G., & Sun, C. T. (2014). Analytical coupled vibroacoustic modeling of membrane-type acoustic metamaterials: Plate model. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 136(6), 2926-2934.
- Chen, Z., & Liu, T. (2022). Development and application status of glass wool, rock wool, and ceramic wool. In *Thermal Insulation and Radiation Control Technologies for Buildings* (pp. 129-161). Cham: Springer International Publishing.
- Chen, Z., Fan, L., Zhang, S. Y., Zhang, H., Li, X. J., & Ding, J. (2015). An open-structure sound insulator against low-frequency and wide-band acoustic waves. *Applied Physics Express*, 8(10), 107301.
- Cho, J., Song, K., Kwon, N., Park, M., & Kim, T. W. (2024). Effects of periodic materials on distance attenuation in wall-slab structures: an experiment. *Buildings*, 14(3), 694.

- Dashtkar, A., Hadavinia, H., Barros-Rodriguez, J., Williams, N. A., Turner, M., & Vahid, S. (2021). Quantifying damping coefficient and attenuation at different frequencies for graphene modified polyurethane by drop ball test. *Polymer testing*, 100, 107267.
- Du, X., Huang, D., Fu, Q., & Zhang, J. (2019). Effects of acoustic black hole parameters and damping layer on sound insulation performance of abh circular plate. *Applied Sciences*, 9(24), 5366.
- Ensminger, D., & Bond, L. J. (2024). *Ultrasonics: fundamentals, technologies, and applications*. CRC press.
- Ersoy, S., & Küçük, H. (2009). Investigation of industrial tea-leaf-fibre waste material for its sound absorption properties. *Applied Acoustics*, 70(1), 215-220.
- Erzen, B., Karataş, M., Orhan, R., & Aydoğmuş, E. (2025). Innovative Insulation Materials: A Comprehensive Review of Current Trends, Challenges, and Future Directions in Sustainable Building Technologies. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 1-24.
- Fatmala, R. I., Yulianti, I., & Fianti, F. (2022). Recycling Surgical Mask as Acoustic Panel using Hand Lay-Up Methods. *Physics Communication*, 6(1), 30-36.
- Gao, N., Zhang, Z., Deng, J., Guo, X., Cheng, B., & Hou, H. (2022). Acoustic metamaterials for noise reduction: a review. *Advanced Materials Technologies*, 7(6), 2100698.
- Garg N, Kumar A, Maji S (2015) Parametric sensitivity analysis of factors affecting sound transmission loss of multi-layered building elements using Taguchi method. *Arch Acoustics* 39:165–176.
- Gencel, O., Güler, O., Ustaoglu, A., Erdoğmuş, E., Sarı, A., Hekimoğlu, G., ... & Subaşı, S. (2025). Characteristics of cement-based thermo-concretes containing capric acid impregnated hemp for thermal energy storage and sound isolation in buildings. *Energy*, 136837.
- Ghassabi, M., & Talebitooti, R. (2023). Acoustic insulation characteristics improvement of a thick CNT-reinforced doubly-curved shell by using GPLRC and MEE composite layers. *Smart Materials and Structures*, 32(3), 035004.
- Goines L, Hagler L (2007) Noise pollution: a modern plague. *South Med J*. 100:287–294.
- Gripp, J. A. B., & Rade, D. A. (2018). Vibration and noise control using shunted piezoelectric transducers: A review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 112, 359-383.
- Habib, T., & Kepesi, M. (2007, April). Open IEN issues of active noise control applications. In 2007 17th International Conference Radioelektronika (pp. 1-4). IEEE.
- Han Z-X, Lei Z-H, Zhang C-L et al (2015) Noise monitoring and adverse health effects in residents in different functional areas of Luzhou, China. *Asia Pacif J Public Health* 27:93S–99S.
- Hosseinianpour, M., Maghsoud, Z., & Khadar, P. F. (2024). Damping and acoustic properties of nanosilica filled poly (styrene-acrylate) interpenetrating polymer networks (IPNs): Effect of nanocomposite preparation method. *Polymer Testing*, 140, 108569.
- Hu, S., Cai, J., Liao, G., & Fu, Q. (2019). Preparation and sound insulation performance of superfine metal powder/nitrile-butadiene rubber-polyvinyl chloride microcellular foaming material. *Advances in Polymer Technology*, 2019, 1-8.

- Hung, T. C., Huang, J. S., Wang, Y. W., & Lin, K. Y. (2014). Inorganic polymeric foam as a sound absorbing and insulating material. *Construction and Building Materials*, 50, 328-334.
- Jung, W., Elliott, S. J., & Cheer, J. (2019). Local active control of road noise inside a vehicle. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 121, 144-157.
- Kapoor, J., Mishra, G., & Rai, M. (2017, November). Characteristics and properties of audio signal and noise cancellation techniques: A theoretical review. In 2017 international conference on emerging trends in computing and communication technologies (icetct) (pp. 1-4). IEEE.
- Kapoor, J., Pathak, A., Rai, M., & Mishra, G. R. (2023). Vehicle Cabin Noise Cancellation Model Using Pre-Filter for Improved Convergence Rate and Better Stability. *COMMUNICATIONS*, 25(1), C1-C12.
- Koruk, H.; Genc, G. Investigation of the acoustic properties of bio luffa fiber and composite materials. *Mater. Lett.* 2015, 157, 166–168.
- Kucukali-Ozturk, M., Yalcin-Enis, I., & Sezgin, H. (2022). Development of 100% recycled thermoplastic composites for sound insulated acoustic panels. *Materials Science Forum*, 1053, 352-357.
- Kwon, M. J., Lim, D. H., Choi, I. C., Kwon, H. W., & Ha, C. S. (2021). Preparation and properties of ethylene-vinyl acetate copolymer-based blend foams. *Journal of Elastomers & Plastics*, 53(1), 68-82.
- Lee, J. C., Hong, Y. S., Nan, R. G., Jang, M. K., Lee, C. S., Ahn, S. H., & Kang, Y. J. (2008). Soundproofing effect of nano particle reinforced polymer composites. *Journal of Mechanical science and Technology*, 22, 1468-1474.
- Lee, J. K., Kim, J., Rhee, C. J., Jo, C. H., & Choi, S. B. (2002). Noise reduction of passive and active hybrid panels. *Smart Materials and Structures*, 11(6), 940.
- Lee, S. K., Lee, S., Back, J., & Shin, T. (2018). A new method for active cancellation of engine order noise in a passenger car. *Applied Sciences*, 8(8), 1394.
- Li, Y., Zhang, Y., & Xie, S. (2020). A lightweight multilayer honeycomb membrane-type acoustic metamaterial. *Applied Acoustics*, 168, 107427.
- Liang, J. Z., & Zhu, B. (2016). Estimation of sound transmission loss of polymer/hollow microsphere composites. *Journal of Composite Materials*, 50(15), 2137-2142.
- Lin, Q., Lin, Q., Wang, Y., & Di, G. (2021). Sound insulation performance of sandwich structure compounded with a resonant acoustic metamaterial. *Composite Structures*, 273, 114312.
- Liu, Y., Chen, M., Xu, W., Yang, T., Pei, D., Jiang, H., & Wang, Y. (2019). Fractal acoustic metamaterials with subwavelength and broadband sound insulation. *Shock and Vibration*, 2019(1), 1894073.
- Mago, J., Sunali, Negi, A., Bolton, J. S., & Fatima, S. (2024). Sound Insulation: Key Concepts and Technologies. *Handbook of Vibroacoustics, Noise and Harshness*, 1-44.
- Mago J, Negi A, et al (2022) Development of natural rubber-bamboo biochar composites for vibration and noise control applications. *J Clean Prod.*, 373:133760.
- Moradi, G., Omidi, L., Vosoughi, S., Ebrahimi, H., Alizadeh, A., & Alimohammadi, I. (2019). Effects of noise on selective attention: The role of introversion and extraversion. *Applied Acoustics*, 146, 213-217.

- Nadal, A., Segura, J., Juliá, E., Gadea, J. M., & Montava, I. (2019). Evaluation of acoustic and dynamic behaviour of ethylene vinyl acetate panels. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 50(1), 14-24.
- Natsuki T, Natsuki J (2019) A theoretical investigation on sound transmission loss through multi-walled plates with air space. *Asian J Res Rev Phys* 2:1–8.
- Othmani, C., Taktak, M., Zein, A., Hentati, T., Elnady, T., Fakhfakh, T., & Haddar, M. (2016). Experimental and theoretical investigation of the acoustic performance of sugarcane wastes-based material. *Applied Acoustics*, 109, 90-96.
- Putra, A.; Or, K.H.; Selamat, M.Z.; Nor, M.J.M.; Hassan, M.H.; Prasetyo, I. Sound absorption of extracted pineapple-leaf fibres. *Appl. Acoust.* 2018, 136, 9–15.
- Qiu, X. (2016). Principles of sound absorbers. *Acoustic textiles*, 43-72.
- Rahman, L.A.; Raja, R.I.; Rahman, R.A. Experimental study on natural fibers for green acoustic absorption materials. *Am. J. Appl. Sci.* 2013, 10, 1307–1314.
- Raj M, Fatima, S, Tandon N (2020) Recycled materials as a potential replacement to synthetic sound absorbers: a study on denim shoddy and waste jute fibers. *Appl Acoust* 159:107070.
- Rajappan, S., Bhaskaran, P., & Ravindran, P. (2017). An insight into the composite materials for passive sound absorption. *Journal of Applied Sciences*, 17(7), 339-356.
- Roca, D., Cante, J., Lloberas-Valls, O., Pàmies, T., & Oliver, J. (2021). Multiresonant layered acoustic metamaterial (MLAM) solution for broadband low-frequency noise attenuation through double-peak sound transmission loss response. *Extreme Mechanics Letters*, 47, 101368.
- Rusdi, S., Bafadal, F., Chafidz, A., Amin, T., & Hartanto, D. (2021). Fabrication of acoustic panel from composites of coconut husk waste powder and styrofoam resin and its sound absorption performance. *Materials Science Forum*, 1029, 73-79.
- Schwarz, M., Nakhle, C., & Knoeri, C. (2020). Innovative designs of building energy codes for building decarbonization and their implementation challenges. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119260.
- Seciureanu, M., Nastac, S. M., Guiman, M. V., & Nechita, P. (2023). Cellulose fibers-based porous lightweight foams for noise insulation. *Polymers*, 15(18), 3796.
- Seddeq HS (2009) Factors influencing acoustic performance of sound absorptive materials. *Aust J Basic Appl Sci* 3(4):4610–4617.
- Setunge, S., & Gamage, N. (2016). Application of acoustic materials in civil engineering. *Acoustic Textiles*, 165-183.
- Shanaz, H. A., & Rana, M. S. (2020). Acoustic and thermal insulation of nanocomposites for building material. *Baghdad Science Journal*, 17(2), 494-501.
- Sharma, S., Sudhakara, P., Singh, J., Singh, S., & Singh, G. (2023). Emerging progressive developments in the fibrous composites for acoustic applications. *Journal of Manufacturing Processes*, 102, 443-477.
- Siltumens, K. (2025, April). Acoustic Performance of Panels Made from Recycled Polyester Fiber Derived from PET Bottles. In IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science* (Vol. 1474, No. 1, p. 012011). IOP Publishing.
- Singh, V. K., & Mukhopadhyay, S. (2016). Manufacturing methods for acoustic textiles. *Acoustic textiles*, 93-113.

- Song, Y. (2022, December). Active noise cancellation and its applications. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2386, No. 1, p. 012042). IOP Publishing.
- Tang, X.; Zhang, X.; Zhang, H.; Zhuang, X.; Yan, X. Corn husk for noise reduction: Robust acoustic absorption and reduced thickness. *Appl. Acoust.* 2018, 134, 60–68.
- Tauber, C., Bajraktari, E., Lechleitner, J., Pont, U., & Mahdavi, A. (2016). Double skin facades with natural ventilation capability: a case study of acoustical enhancement via passive and active (noise cancelling) methods. *Applied Mechanics and Materials*, 861, 537-544.
- Tudor, E. M., Dettendorfer, A., Kain, G., Barbu, M. C., Réh, R., & Krišťák, Ľ. (2020). Sound-absorption coefficient of bark-based insulation panels. *Polymers*, 12(5), 1012.
- Verdejo, R., Stämpfli, R., Alvarez-Lainez, M., Mourad, S., Rodriguez-Perez, M. A., Brühwiler, P. A., & Shaffer, M. (2009). Enhanced acoustic damping in flexible polyurethane foams filled with carbon nanotubes. *Composites Science and Technology*, 69(10), 1564-1569.
- Wang, X., Zhao, H., Luo, X., & Huang, Z. (2016). Membrane-constrained acoustic metamaterials for low frequency sound insulation. *Applied Physics Letters*, 108(4).
- Watts, G., & Morgan, P. (2007). Measurement of airborne sound insulation of timber noise barriers: Comparison of in situ method CEN/TS 1793-5 with laboratory method EN 1793-2. *Applied acoustics*, 68(4), 421-436.
- Xu, L., Han, T., Li, J., Xiong, Y., & Guo, S. (2017). The cell growth-induced orientation of mica in lightweight flexible poly (vinyl chloride) foams and its enhancement on sound insulation. *Composites Science and Technology*, 145, 78-88.
- Yang, X., Tang, S., Shen, X., & Peng, W. (2023). Research on the sound insulation performance of composite rubber reinforced with hollow glass microsphere based on acoustic finite element simulation. *Polymers*, 15(3), 611.
- Zhang, J., Shen, Y., Jiang, B., & Li, Y. (2018). Sound absorption characterization of natural materials and sandwich structure composites. *Aerospace*, 5(3), 75.
- Zheng, C., & Liang, S. (2020). Fabrication and investigation on damping performance of novel co-curing sandwich composites. *Polymer Composites*, 41(12), 5116-5125.
- Zou, J., Zheng, K., & Li, S. (2024). Research on a kind of lightweight heat-insulating, sound-insulating and light-transmitting concrete interior partition wall block. *Academic Journal of Science and Technology*, 10(1), 376-383.

Yüzey Plazmon Polaritonlarının Elektrokimyasal Biyosensörlerle Entegrasyonu

Zülfü TÜYLEK¹

1- Öğr. Gör.; Malatya Turgut Özal Üniversitesi Yeşilyurt MYO Elektronik ve Otomasyon Bölümü.
Zulfu.tuylek@ozal.edu.tr ORCID No: 0000-0002-9086-1327

ÖZET

21. yüzyıl, bilgi teknolojileri, yapay zekâ, otomasyon ve Nesnelerin İnterneti (IoT) gibi dijital dönüşüm unsurları tarafından şekillendiriliyor. Bu dönüşüm, bireysel yaşam tarzlarından kamu yönetimine kadar birçok alanı etkiliyor ve sensör teknolojileri bu dönüşümde kritik bir rol oynuyor. Sensörler, fiziksel, kimyasal ve biyolojik değişkenleri algılayıp bunları elektrik sinyallerine dönüştüren cihazlardır. Bu sayede sıcaklık, nem ve ışık gibi çevresel parametreler gerçek zamanlı olarak izlenip yönetilebilir.

Modern sensör sistemleri, akıllı sistemler oluşturmak için mikrodenetleyiciler, kablosuz iletişim ve bulut bilişim altyapılarıyla entegre edilmiştir. Yapay zekâ destekli akıllı sensörler yalnızca veri toplamakla kalmaz, aynı zamanda karar alma süreçlerini analiz eder ve optimize eder. Bu özellikler, karar destek sistemlerinde, kestirimci bakımda ve adaptif kontrol uygulamalarında kullanılır.

Sensör teknolojileri, endüstriyel otomasyon, sağlık, tarım, akıllı şehirler, çevresel izleme ve güvenlik gibi birçok kritik alanda kullanılmaktadır. Kitap bölümü, sensörlerin tanımı, sınıflandırılması, yapısal bileşenleri, çalışma prensipleri, geçmişi, performans kriterleri, IoT sistemlerindeki rolleri ve veri birleştirme gibi konuları ayrıntılı olarak ele alacaktır.

Sensörler, dijital dünyanın çevresiyle etkileşime girmesini sağlayan "duyu organları" haline gelmiştir. Bu nedenle, teknolojik ilerlemelerinin yanı sıra sosyal, ekonomik ve çevresel etkileri de önemlidir.

Anahtar Kelimeler – Sensör Teknolojileri, Akıllı Sistemler, Nesnelerin İnterneti (Iot), Yapay Zekâ Destekli İzleme, Gerçek Zamanlı Veri Analizi.

GİRİŞ

21. yüzyıl, bilgi teknolojileri, yapay zekâ, otomasyon ve Nesnelerin İnterneti (IoT) gibi alanlardaki devrimlerin yönlendirdiği dijitalleşmenin egemen olduğu bir çağ haline geldi. Bu dönüşüm, yalnızca endüstri ve üretim hatlarını değil, aynı zamanda bireylerin günlük yaşamlarından kamu yönetimine kadar birçok alanı doğrudan etkiliyor. Sensör teknolojileri, şüphesiz dijital sistemlerin çevresel değişkenleri algılayıp anlamlı verilere dönüştürmesi için gerekli temel yapı taşlarından biridir (Yick, Mukherjee ve Ghosal, 2008).

Sensörler, ortamdaki fiziksel, kimyasal veya biyolojik değişkenleri algılayan ve bu bilgileri ölçülebilir elektrik sinyallerine dönüştüren cihazlardır. Bu sayede sıcaklık, basınç, ışık, nem, gaz konsantrasyonu, pH, manyetik alan ve diğer birçok parametre gerçek zamanlı olarak izlenip yönetilebilir. Modern sensör sistemleri, mikrodenetleyiciler, kablosuz

iletişim protokolleri ve bulut bilişim altyapılarıyla entegre edilerek akıllı ve etkileşimli sistemler oluşturur (Islam vd., 2015).

Gelişmiş sensör teknolojileri yalnızca veri toplamakla kalmaz, aynı zamanda verileri işler, yorumlar ve yerel olarak merkezi veri analiz platformlarına iletir. Bu özellikler, karar destek sistemleri, öngörücü bakım ve uyarlanabilir kontrol gibi uygulamalarda önemli roller oynar. Özellikle yapay zekâ ve makine öğrenimi algoritmalarıyla desteklenen akıllı sensörler, karar alma süreçlerini otomatikleştirerek sistem verimliliğini ve tepki hızını artırır (Jan, Nanda, He ve Liu, 2017).

Günümüzde sensör teknolojileri aşağıdaki alanlarda kritik roller oynamaktadır:

- Endüstriyel otomasyon: Üretim hattı izleme, arıza öncesi tespit ve enerji yönetimi
- Sağıık: Hasta izleme, mobil teşhis cihazları, biyobelirteç izleme sistemleri
- Tarım ve gıda güvenliğı: Toprak nemi, sıcaklık, besin seviyeleri ve hastalık erken uyarı sistemleri
- Akıllı şehir uygulamaları: Trafik akışı, hava kalitesi izleme, enerji tüketimi optimizasyonu
- Çevresel izleme: Su ve hava kirliliğı, toprak erozyonu ve radyasyon ölçümleri
- Savunma ve güvenlik: Sınır güvenliğı, biyolojik ajan tespiti, gözetim sistemleri

Bu kitap bölümü şunları kapsamaktadır: Sensörlerin temel tanımı, sınıflandırılması, yapısal bileşenleri, çalışma prensipleri, tarihsel gelişimi ve performans parametreleri ayrıntılı olarak incelenecektir. Ayrıca, akıllı sensörlerin IoT sistemlerindeki rolü, çoklu sensör verilerinin entegrasyonu (veri füzyonu) ve gerçek zamanlı izleme sistemleriyle ilişkileri kapsamlı bir şekilde değıerlendirilecektir (Wang, Zhang ve Zhang, 2015).

Sensörler artık yalnızca ölçüm cihazları değıil; dijital dünyanın çevresiyle etkileşime girmesini sağılayan duyuusal organlar haline gelmiştir. Bu nedenle, sensör teknolojisinin geliştirilmesi yalnızca teknolojik açıdan değıil, aynı zamanda toplumsal, ekonomik ve çevresel etkiler açısından da kritik öneme sahiptir. Sensör performansı, modern dijital altyapının güvenilirliğini ve sürdürülebilirliğini doğrudan belirler.

TANIM ve GENEL KAVRAMLAR

Sensör, ortamda meydana gelen fiziksel, kimyasal veya biyolojik değişiklikleri algılayan ve bu değişiklikleri elektriksel veya diğer ölçülebilir sinyallere dönüştüren bir cihaz olarak tanımlanır (Fraden, 2016). Sensörlerin temel amacı, insan algısının erişemediği veya zor olduğu parametreleri ölçmek, bunları dijital verilere dönüştürmek ve bu verilere dayanarak sistemlerin otomatik kontrolünü sağlamaktır.

Sensörler, sıcaklık, nem, basınç, gaz konsantrasyonu, hareket, ışık, pH ve iyon yoğunluğu gibi çok çeşitli parametreleri izleyebilir (Patel, 2019). Bu çok yönlülük, sensörlerin endüstriyel otomasyon, sağlık hizmetleri, çevre izleme, savunma sistemleri ve tüketici elektroniği dâhil olmak üzere çok çeşitli uygulamalarda kullanılmasını sağlar.

Sensörler genellikle bir kontrol sisteminin parçası olarak işlev görür. Tespit edilen fiziksel veya kimyasal değişiklikler, belirli bir eşik aşıldığında değerlendirilip etkinleştirildikleri bir kontrol ünitesine iletilir. Örneğin, ortam sıcaklığı belirli bir seviyeyi aştığında, sıcaklık sensörleri bu bilgiyi kontrol sistemine göndererek soğutma sistemini otomatik olarak etkinleştirir (Jones ve Smith, 2021). Bu mekanizma, enerji tasarrufu ve proses optimizasyonu açısından önemli avantajlar sunar.

Üstelik modern sensörler yalnızca ölçüm yapmakla kalmaz, aynı zamanda veri işleme, analiz ve kablosuz iletişim gibi akıllı özellikleri de bünyesinde barındırabilir. Bu tür akıllı sensörler, Nesnelerin İnterneti (IoT) uygulamalarında yaygın olarak kullanılır ve gerçek zamanlı veri izleme yoluyla daha etkili sistem yönetimi sağlar (Wang ve diğerleri, 2018).

SENSÖR TÜRLERİ

Sensörler, algıladıkları değişkenlerin niteliğine göre üç ana kategoriye ayrılır: fiziksel, kimyasal ve biyolojik sensörler. Her tür farklı prensipler ve uygulama alanlarıyla karakterize edilir.

Fiziksel Sensörler

Fiziksel sensörler, ortamdaki fiziksel nicelikleri algılar ve ölçer. En yaygın ve çeşitli sensör türlerinden biridir. Bu sensörler genellikle sıcaklık, basınç, ışık, ivme, ses ve manyetik alanlar gibi fiziksel parametreleri izlemek için kullanılır (Fraden, 2016).

Örnekler:

Termokupl: İki farklı metal arasındaki sıcaklık farkına dayalı bir voltaj üreten bir sensördür. Endüstriyel proses kontrolünde yaygın olarak kullanılır (Patel, 2019).

Fotodiyot: Işık miktarına duyarlı yarı iletken elemanlardır. Elektrik akımı geçirgenlikleri ışık yoğunluğuna bağlı olarak değişir. Optik iletişim ve aydınlatma sistemlerinde tercih edilirler (Sze ve Ng, 2007).

İvmeölçerler: Bu sensörler titreşimi, hareketi ve konum değişikliklerini ölçer. Mobil cihazlarda, otomotiv sistemlerinde ve yapısal sağlık izleme uygulamalarında kullanılırlar (Lynch ve Loh, 2006).

Kimyasal Sensörler

Kimyasal sensörler, ortamdaki kimyasal bileşiklerin varlığını ve konsantrasyonunu tespit etmek için tasarlanmıştır. Bu sensörler, gaz sensörleri, iyon seçici elektrotlar ve pH sensörleri gibi kategorilere ayrılır (Griffiths ve de Haseth, 2007).

Örnekler:

Gaz Sensörleri: Karbon monoksit (CO), metan (CH₄) ve hidrojen sülfür (H₂S) gibi tehlikeli veya endüstriyel gazların konsantrasyonunu ölçerler. Ev ve endüstriyel güvenlikte kritik bir rol oynarlar (Korotcenkov, 2007).

PH Sensörleri: Asit-baz dengesini ölçerler ve laboratuvar, çevresel izleme ve biyomedikal uygulamalarda kullanılırlar (Bakker, Pretsch ve Bühlmann, 2000).

İyon Seçici Elektrotlar: Elektrolit çözeltilerindeki belirli iyonları seçici olarak tespit eder ve iyon konsantrasyonunu ölçerler (Miller, 2010).

Biyolojik Sensörler (Biyosensörler)

Biyosensörler, biyolojik malzemeler kullanarak hedef molekülleri tespit eden cihazlardır. Canlı organizmalardan elde edilen enzimler, antikorlar ve DNA dizileri gibi biyolojik tanıma elemanlarını sensör yüzeyine sabitleyerek çalışırlar (Turner, 2013). Biyosensörler, tıbbi teşhis, çevresel izleme ve gıda güvenliğinde büyük önem taşır.

Örnekler:

Glikoz Sensörü: Diyabet hastalarında kan şekerini ölçmek için en yaygın kullanılan biyosensördür. Glikoz oksidaz enzimini kullanarak glikoz konsantrasyonunu elektrik sinyaline dönüştürür (Wang, 2008).

DNA Sensörleri: Genetik analizde belirli DNA dizilerini belirleyerek hastalık tespiti ve biyolojik araştırmalarda kullanılırlar (Tuerk ve Gold, 1990).

Antikor Bazlı Sensörler: Antikorlar, belirli hastalık belirteçlerini veya patojenleri tespit etmek için kullanılır. Kanser belirteci olarak veya bulaşıcı hastalıkların erken teşhisinde kullanılırlar (Mishra ve ark., 2018).

TEMEL BİLEŞENLER ve ÇALIŞMA PRENSİPLERİ

Bir sensör, her biri sensörün algılama, dönüştürme ve veri işleme işlevlerini yerine getiren üç ana bileşenden oluşur. Bu bileşenler, sensörün doğru ve güvenilir çalışması için kritik öneme sahiptir.

Tanıma Elemanı (Reseptör)

Tanıma elemanı, sensörün algılaması amaçlanan fiziksel, kimyasal veya biyolojik parametreyi doğrudan algılayan parçadır. Bu eleman, ortamdaki değişiklikleri seçici olarak algılamalı ve mümkün olduğunca dış etkilere izole edilmelidir. Örneğin, biyosensörlerde glikoz oksidaz enzimi glikoz molekülünü tanıır ve bir biyokimyasal reaksiyon başlatır (Turner, 2013). Fiziksel sensörler ise termokupllardaki sıcaklık farklılıklarına duyarlı metal kontaklar kullanırken, manyetik sensörler manyetik alan değişikliklerini algılayan malzemeler kullanır (Fraden, 2016).

Dönüştürücü (Transdüser)

Dönüştürücü, tanıma elemanından gelen fiziksel veya kimyasal bilgileri ölçülebilir bir elektrik sinyaline dönüştürür. Bu sinyal genellikle voltaj, akım, direnç veya frekans biçimindedir. Örneğin, piezoelektrik sensörlerde mekanik basınç uygulandığında kristaller elektrik yükü üretir; elektrokimyasal sensörlerde ise hedef molekülde bir redoks reaksiyonu sonucunda elektrik akımı oluşması transdüksiyona bir örnektir (Patel, 2019). Transdüserler, sinyal doğruluğu ve hassasiyeti açısından sensör performansını doğrudan etkiler (Jones ve Smith, 2021).

İşlem Birimi (İşlemci/Okuma)

İşlem birimi, transdüserden gelen elektrik sinyalini alır, işler ve kullanıcı tarafından anlaşılabilir bir formatta çıktı olarak verir. Bu birim, analog-dijital dönüştürücü (ADC), mikrodenetleyici, sinyal işlemcisi veya dijital arayüzlerden oluşabilir. Modern sensörlerde, işlem birimleri veri filtreleme, kalibrasyon, hata düzeltme ve kablosuz iletişim gibi gelişmiş işlevleri de üstlenir (Wang ve ark., 2018). Bu nedenle sensörler, akıllı sistemlerin önemli bir bileşeni haline gelmiştir.

Çalışma Prensipleri

Sensörlerin çalışma prensipleri, ölçülen niceliğin fiziksel veya kimyasal yapısına bağlı olarak değişir. Yaygın olarak kullanılan bazı prensipler şunlardır:

Piezoelektrik Etki: Bazı kristal yapılar, mekanik stres uygulandığında elektrik yükü üretir. Bu özellik, basınç ve ivmeölçerlerde kullanılır (Lynch ve Loh, 2006).

Optik Soğurma: Bu prensip, belirli dalga boylarındaki ışığın malzemeler tarafından soğurulmasına dayanır. Bu prensip kullanılarak gaz sensörlerinde

veya biyosensörlerde optik ölçümler yapılabilir (Griffiths ve de Haseth, 2007).

Elektrokimyasal Reaksiyonlar: Hedef molekülün elektrot yüzeyinde meydana gelen redoks reaksiyonundan kaynaklanan elektrik akımı veya potansiyel değişimi ölçülür. Glikoz sensörleri ve gaz sensörleri bu prensiple çalışır (Wang, 2008).

Manyetik İndüksiyon: İletken bir bobinde manyetik alandaki değişikliklerle indüklenen elektromotor kuvveti algılanır. Metal algılama ve konum ölçümlerinde kullanılır (Fraden, 2016).

Diğer algılama yöntemleri arasında kapasitif, piezorezistif, termoelektrik ve ultrasonik bulunur. Sensör tasarımı bu prensiplerin uygun kombinasyonu, uygulamanın gereksinimlerine göre seçilir (Patel, 2019).

SENSÖR TEKNOLOJİSİNİN TARİHÇESİ ve EVRİMİ

Sensör teknolojisi, ilk olarak mekanik algılayıcılarla (örneğin sarkaçlar, barometreler) başlamış, ardından elektronik devrelerin gelişimiyle hız kazanmıştır. 20. yüzyılda mikroişlemcilerin yaygınlaşması ile birlikte dijital sensörler devreye girmiştir.

Günümüzde sensörler:

- Mikro-Elektromekanik Sistemler (MEMS) sayesinde mikron boyutlarında üretilebilmektedir.
- Nanoteknoloji ile yüzey alanı ve hassasiyet artırılmıştır.
- Yapay zeka (AI) ve makine öğrenmesi (ML) ile sensör verileri daha hızlı analiz edilmektedir.

Özellikle otonom araçlar, akıllı telefonlar ve giyilebilir cihazlarda kullanılan sensörler, bireysel yaşamın vazgeçilmez unsurları hâline gelmiştir.

Tablo 1: Sensör teknolojisinin tarihçesi - önemli dönüm noktaları

Dönem	Gelişme	Açıklama	Kaynaklar
Antik Çağ	Basit mekanik sistemler	Su saatleri, teraziler gibi ölçüm araçları kullanıldı	Fraden, 2016
1800'ler	Termoelektrik ve manyetik etkilerin keşfi	Seebeck etkisi ile sıcaklık farkından elektrik üretimi gözlemlendi	Fraden, 2016
1920–1950	İlk elektronik sensörler	Termistör ve fotoresistör gibi basit elektriksel sensörler geliştirildi	Fraden, 2016
1960–1970	Entegre devrelerle dijital sensör sistemleri	Analog-dijital dönüşümle birlikte otomasyon başladı	Fraden, 2016
1980'ler	Mikrodenetleyicilerle akıllı sensör kavramı	Sensörler veri işleyebilmeye başladı	Wang et al., 2018
1990–2000	MEMS teknolojisinin yükselişi	Mikro boyutta entegre sensörler geliştirildi	Wang et al., 2018
2010–Günümüz	IoT ve nanoteknoloji destekli sensörler	Kablosuz iletişimli, yüksek duyarlılıklı sensör ağları yaygınlaştı	Wang et al., 2018

Bu tablo, sensör teknolojisinin tarihsel gelişim sürecini kronolojik olarak özetlemektedir. Antik çağdaki temel ölçüm araçlarından günümüzdeki akıllı ve nanoteknoloji destekli sensörlere kadar uzanan bu süreç, teknolojik ilerlemelerle birlikte sensörlerin hem işlevsellik hem de uygulama alanları açısından büyük evrim geçirdiğini göstermektedir.

Tablo 2: Sensör teknolojisinin evrimi - teknolojik açıdan gelişim süreci

Gelişim Aşaması	Özellikler	Uygulama Alanları	Kaynaklar
Mekanik Sensörler	Fiziksel kuvvetlere tepki veren, tamamen mekanik sistemler	Teraziler, barometreler, gösterge sistemleri	Fraden, 2016
Analog Elektronik	Fiziksel değişkeni analog elektrik sinyaline dönüştürür	Termistörler, piezo sensörler	Patel, 2019
Dijital Sensörler	Analog sinyalleri dijital veriye çevirip işleyebilir	HVAC sistemleri, otomasyon	Wang et al., 2018
Akıllı Sensörler	Mikrodenetleyici ve iletişim modülü ile veri analiz ve karar mekanizması içerir	Endüstri 4.0, robotik, uzaktan sağlık izleme	Wang et al., 2018

Bu tablo, sensör teknolojilerinin teknik özellikler açısından geçirdiği evrimi sınıflandırarak açıklamaktadır. Mekanik ölçüm cihazlarından analog-

dijital sensörlere, ardından yapay zekâ ve nanomalzeme entegreli akıllı sistemlere geçiş süreci detaylandırılmıştır. Bu yapı, farklı dönemlerin teknolojik ihtiyaçlarını karşılayan sensör yapılarını göstermektedir.

AKILLI SENSÖRLER ve NESNELERİN İNTERNETİ (IoT) UYGULAMALARI

Günümüzün dijitalleşen ve bağlantılı teknolojileri, fiziksel dünya ile dijital sistemler arasında etkili bir köprü kurulmasını zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, akıllı sensörler ve Nesnelerin İnterneti (IoT), modern mühendislik sistemlerinin kritik bileşenleri haline gelmiştir. Akıllı sensörler, yalnızca veri toplamakla kalmayıp aynı zamanda analiz edebilen, yorumlayabilen ve uzak sistemlere iletebilen gelişmiş cihazlardır.

Bu sensörler, veri işleme ve kablosuz iletişim yetenekleri sayesinde doğrudan IoT sistemlerine entegre edilebilir. IoT ile birleştirildiğinde, bu sensörler enerji yönetimi, sağlık izleme, akıllı şehir planlama ve endüstriyel otomasyon gibi birçok alanda gerçek zamanlı, etkili ve otonom çözümler sunar.

Bu bölümde, akıllı sensörlerin tanımını, temel işlevlerini ve bileşenlerini açıkladıktan sonra, IoT ve çeşitli uygulama senaryolarıyla entegrasyon mekanizmalarını ayrıntılı olarak ele alacağız. Ayrıca, bu teknolojilerin çeşitli sektörlerde sunduğu avantajları ve teknolojinin mevcut rolünü ve gelecekteki potansiyelini tartışacağız.

Akıllı Sensörler

Akıllı sensörler, yalnızca algılama ile sınırlı olmayan gelişmiş sensör sistemleridir; Ayrıca verileri kablosuz olarak işleyebilir, analiz edebilir ve iletebilirler. Bu sensörler, gömülü mikrodenetleyiciler, bellek üniteleri ve iletişim modülleri gibi bileşenlerle donatılmıştır. Geleneksel sensörlerin aksine, yalnızca veri toplamakla kalmaz, aynı zamanda belirli eşik değerlerine göre kararlar alabilir ve sistemi uyabilirler. Genellikle üç temel özellikleri vardır:

Ölçüm ve algılama: Ortamdaki fiziksel, kimyasal veya biyolojik değişkenleri tespit ederler.

Veri işleme: Algılanan verileri analiz eder ve filtreleme, doğrulama ve özetleme işlemlerini gerçekleştirirler.

Kablosuz iletişim: Bluetooth, ZigBee, Wi-Fi ve LoRaWAN gibi iletişim protokolleri kullanılarak ağ sistemlerine bağlanabilirler (Patel, 2019).

Bu, akıllı sensörlerin enerji verimliliği, hızlı tepki süresi, azaltılmış insan müdahalesi ve yüksek doğruluk gibi avantajlar sunmasını sağlar (Wang ve ark., 2018).

Nesnelerin İnterneti ile Entegrasyon

Nesnelerin İnterneti (IoT), fiziksel cihazların internet ağına bağlandığı ve birbirleriyle ve merkezi sistemlerle iletişim kurduğu bir ekosistemdır. Akıllı sensörler bu ekosistemin önemli bir bileşenidir. Nesnelerin İnterneti (IoT) sistemlerinde, sensörler sürekli olarak ortamdan veri toplar ve bu bilgileri gerçek zamanlı olarak bulut sistemlerine veya merkezi sunuculara iletir. Toplanan veriler, büyük veri analizi ve yapay zekâ algoritmaları aracılığıyla değerlendirilerek karar destek sistemlerine katkıda bulunur (Gubbi vd., 2013).

Başlıca Uygulama Alanları:

Akıllı Şehirler:

- Trafik yoğunluğu izleme
- Hava kirliliği ölçümü
- Atık toplama optimizasyonu
- Sokak aydınlatmasının otomatik kontrolü

(Batty vd., 2012)

Tarım (Akıllı Tarım / Tarım 4.0):

- Toprak nemi, sıcaklığı ve pH ölçümü
- Bitki büyüme süreci izleme
- Sulama sistemlerinin otomasyonu

(Zhang vd., 2017)

Sağlık (IoMT – Tıbbi Nesnelerin İnterneti):

- Hasta konum takibi
- Kalp atış hızı, kan basıncı ve glikoz seviyesi ölçümü
- Uzaktan teşhis ve tedavi

(Lee ve Lee, 2015)

Endüstri 4.0:

- Arıza öncesi makine koşullarının izlenmesi
- Üretim hatlarının enerji verimliliği analizi
- Otonom robotların koordinasyonu

(Xu vd., 2018)

Bu sistemler sayesinde; Üretim, enerji, sağlık ve kamu hizmetleri gibi sektörlerde verimlilik artarken, kaynak tüketimi ve çevresel etkiler azalıyor.

PERFORMANS PARAMETRELERİ

Sensör teknolojilerinde performans, tek bir değişkeni tespit etme yeteneğiyle sınırlı değildir. Gerçek dünya uygulamaları, bir sensörün ne kadar hassas, hızlı, kararlı ve tekrarlanabilir olduğunu doğrudan etkiler. Bu nedenle, bir sensör seçerken, uygulamanın gerektirdiği belirli performans parametreleri dikkatlice değerlendirilmelidir (Fraden, 2016).

Hassasiyet

Bu, bir sensörün ölçülen fiziksel, kimyasal veya biyolojik bir değişime verdiği tepkinin büyüklüğünü tanımlar. Başka bir deyişle, giriş değişkenindeki küçük bir artışın çıkış sinyalindeki ne kadar önemli bir değişikliğe neden olduğunu ifade eder. Örneğin, bir sıcaklık sensörü için, 0,1°C'lik bir artışa karşılık gelen çıkış sinyalindeki milivoltluk değişim hassasiyet seviyesini belirler. Yüksek hassasiyet, özellikle biyosensörlerde ve çevresel gaz ölçümlerinde kritik öneme sahiptir (Patel, 2019).

Seçicilik

Bu, bir sensörün yalnızca hedeflenen bir maddeye veya parametreye tepki verme yeteneğidir. Yüksek seçicilik, özellikle kimyasal ve biyolojik sensörlerde, birden fazla bileşen içeren ortamlarda çalışırken önemlidir. Örneğin, bir glikoz sensörü yalnızca glikoza tepki vermeli ve laktat veya askorbat gibi benzer molekülleri hariç tutmalıdır (Grieshaber ve ark., 2008). Seçicilik genellikle sensör tasarımında kullanılan tanıma elemanlarının özgülüğüyle sağlanır.

Tepki Süresi

Bu, sensörün harici bir değişikliğe ne kadar hızlı tepki verdiğini gösterir. Bu süre genellikle tespit edilen olayın başlangıcı ile ölçüm değerinin %90'a ulaşması arasındaki süre olarak tanımlanır. Hızlı tepki süresi, endüstriyel otomasyon sistemlerinde, tıbbi cihazlarda ve araç içi sensörlerde güvenlik ve doğruluk için hayati önem taşır (Wang ve ark., 2018).

Kararlılık

Bu, sensörün ölçüm performansını zaman içinde ne ölçüde koruduğunu gösterir. Çevresel koşullar, fiziksel aşınma veya kimyasal bozulma, uzun süreli kullanımda ölçüm sapmalarına neden olabilir. Düşük kararlılığa sahip sensörler, sık kalibrasyon ve bakım gerektirir ve bu da işletme maliyetlerini artırır (Fraden, 2016).

Tekrarlanabilirlik

Bir sensörün aynı çevre koşulları altında ve aynı parametre düzeyinde yapılan birden fazla ölçümde benzer sonuçlar üretme yeteneği.

Tekrarlanabilirlik, özellikle kalibrasyon sonrası testlerde, sensörün üretim kalitesini ve güvenilirliğini yansıtır. Bu parametre genellikle standart sapma veya varyans analizi kullanılarak ölçülür (Lee ve Lee, 2015).

SENSÖR TEKNOLOJİLERİNİN GÜNCEL UYGULAMA ALANLARI ve KRİTİK ROLLERİ

Sensör teknolojileri, 21. yüzyılın dijital dönüşüm sürecinde stratejik ve operasyonel öneme sahip sistem bileşenleri haline gelmiştir. Günümüzde fiziksel, kimyasal ve biyolojik değişkenlerin gerçek zamanlı izlenmesi ve kontrolü, neredeyse tüm modern teknolojik uygulamaların temelini oluşturmaktadır. Bu nedenle sensörler, yalnızca veri toplama araçları değil, aynı zamanda karar destek sistemlerinin, otomatik kontrol mekanizmalarının ve yapay zekâ destekli analiz platformlarının vazgeçilmez bileşenleri olarak kabul edilmektedir.

Yeni ortaya çıkan teknolojik trendler, özellikle Nesnelerin İnterneti (IoT), Yapay Zeka (AI), Makine Öğrenimi (ML), Endüstri 4.0, Biyoteknoloji ve Akıllı Şehir uygulamaları gibi trendler, sensör sistemlerinin performansını, güvenilirliğini ve entegrasyon kapasitesini doğrudan etkileyerek gelişimlerini hızlandırmıştır (Gubbi vd., 2013; Xu vd., 2018).

Sensörlerin geniş etki alanının temel nedenlerinden biri, değişen koşullara hızla uyum sağlama, çevresel olayları yorumlanabilir dijital verilere dönüştürme ve karar alma süreçlerine girdi sağlama yetenekleridir. Bu bağlamda, sensörlerin aşağıdaki sektörlerde oynadığı kritik roller dikkat çekicidir:

Endüstriyel Üretim: Sensörler, otomasyon, proses kontrolü, enerji verimliliği ve makine arızalarının erken tespitinde hayati bir rol oynar. Basınç, sıcaklık, titreşim, gaz ve sıvı seviyelerini algılayan sensörler, üretim hatlarının güvenli ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlar (Lee ve Lee, 2015).

Sağlık ve Biyomedikal Uygulamalar: Vücut ısısı, kan şekeri ve kalp ritmi gibi fizyolojik parametrelerin izlenmesi, teşhis ve tedavi süreçlerinde önemli avantajlar sağlar. Özellikle giyilebilir teknolojilerle entegre sensörler, kişiselleştirilmiş tıbbın geliştirilmesinde kilit bir rol oynamaktadır (Heikenfeld ve ark., 2018).

Tarım ve Gıda Teknolojileri: Toprak nemi, pH, sıcaklık ve hastalık tespiti gibi unsurlar sensör teknolojileriyle hassas bir şekilde izlenebilir, böylece tarımsal verimlilik artırılabilir ve su gibi doğal kaynakların daha verimli kullanılması sağlanabilir (Zhang ve ark., 2017).

Akıllı Şehirler ve Altyapı Sistemleri: Trafik yönetimi, hava kalitesi izleme, atık yönetimi ve enerji dağıtımı gibi alanlarda sensör tabanlı çözümler, şehirlerde sürdürülebilirliği ve yaşam kalitesini artırmak için

kullanılmaktadır. Nesnelerin İnterneti (IoT) ile entegre sensör ağıları, şehirleri "akıllı" hale getirmektedir (Batty vd., 2012).

Savunma ve Askeri Uygulamalar: Radar, kızılötesi, manyetik ve akustik sensörler, tehdit tespiti, hedef takibi ve sınır güvenliği gibi görevlerde kullanılmaktadır. Otonom insansız hava/kara araçları da sensör sistemleriyle navigasyon, hedefleme ve çevresel algı sağlamaktadır (Yick vd., 2008).

Uzay Teknolojileri: Uydu sistemlerinde, uzay mekiklerinde ve gezegen keşif araçlarında sıcaklık, radyasyon, ivme ve manyetik alanlar gibi parametreleri ölçen sensörler, hem navigasyon hem de bilimsel veri toplama için vazgeçilmezdir. Bu sensörler, uzay aracının güvenliğini ve görev başarısını doğrudan etkiler (NASA, 2022).

Çevresel İzleme: Hava, su ve toprak kalitesini izleyen sensör sistemleri, iklim değişikliği, kirlilik ve afet yönetimi gibi alanlarda karar vericilere bilimsel destek sağlar. Gerçek zamanlı veri akışı, özellikle mobil sensör ağıları ile mümkündür (Akyildiz vd., 2002).

Aşağıdaki tablo, bu sektörlerin temel uygulama alanlarını ve sensör teknolojisinin bu alanlardaki işlevsel rollerini özetlemektedir.

Tablo 3. Sensör teknolojilerinin günümüzdeki uygulama alanları ve kritik rolleri

Uygulama Alanı	Kritik Roller	Örnek Sensör Türleri	Kaynaklar
Endüstriyel Üretim	Otomasyon, proses kontrolü, makine arızalarının önlenmesi için sıcaklık, basınç, titreşim sensörleri kullanılır.	Basınç sensörü, sıcaklık sensörü, titreşim sensörü	Akyildiz et al., 2002
Sağlık ve Biyomedikal	Hasta takibi, tanı ve tedavi süreçlerinde glikoz, EKG, oksijen sensörleri kullanılır.	Glikoz sensörü, EKG sensörü, vücut sıcaklık sensörü	Lee & Lee, 2015
Tarım ve Gıda Teknolojileri	Toprak nemi, sıcaklık, pH ve hastalık tespiti için çevresel sensörler kullanılarak verim artırılır.	Toprak nem sensörü, pH sensörü, optik hastalık sensörü	Zhang et al., 2017
Akıllı Şehirler ve Altyapı	Trafik, hava kalitesi, enerji yönetimi gibi verilerin gerçek zamanlı takibi sağlanır.	NOx sensörü, sıcaklık/hareket sensörü, akıllı sayaç	Gubbi et al., 2013
Savunma ve Askerî Sistemler	Hedef tespiti, sınır güvenliği, silah sistemleri ve İHA'larda radar, IR ve ses sensörleri kritik önemdedir.	Radar sensörü, kızılötesi (IR) sensör, akustik sensör	NASA, 2022
Uzay Teknolojileri	Navigasyon, ortam ölçümü ve bilimsel analizler için manyetik, radyasyon ve ivme sensörleri kullanılır.	Radyasyon sensörü, manyetometre, ivmeölçer	NASA, 2022
Çevresel İzleme	Hava, su ve toprak kalitesinin izlenmesinde gaz, sıcaklık ve partikül sensörleri kullanılır.	CO ₂ sensörü, partikül madde sensörü, su pH sensörü	Gubbi et al., 2013

SONUÇ

Sensör teknolojileri, giderek dijitalleşen ve akıllı hale gelen bir dünyada kritik bir rol oynamaktadır. Endüstriyel otomasyondan sağlık hizmetlerine, tarımdan çevresel izleme sistemlerine, savunma ve uzay teknolojilerinden akıllı şehir uygulamalarına kadar sensörler, çevremizdeki fiziksel, kimyasal ve biyolojik değişiklikleri hassas ve hızlı bir şekilde tespit ederek veriye dönüştürür. Bu veriler, yapay zekâ ve büyük veri analitiğiyle bir araya gelerek karar destek sistemlerinin ve otonom uygulamaların temelini oluşturur.

Özellikle Nesnelerin İnterneti (IoT) ve akıllı sensör teknolojilerinin entegrasyonu, gerçek zamanlı veri toplama ve analizini mümkün kılarak sistemleri daha verimli, esnek ve sürdürülebilir hale getirir. Bu gelişmeler, sağlık hizmetlerinde erken teşhis ve kişiselleştirilmiş tedavi, endüstride enerji tasarrufu ve süreç optimizasyonu, tarımda ise ürün veriminde artış gibi önemli kazanımlar sağlar.

Ayrıca, nanoteknolojinin sensör gelişimine katkısı, sensörlerin boyutunu küçültürken hassasiyetlerini ve seçiciliklerini artırarak giyilebilir ve taşınabilir sağlık cihazları, çevresel izleme araçları ve gelişmiş biyosensör sistemleri gibi yenilikçi uygulamaların önünü açmıştır.

Sonuç olarak, sensör teknolojilerini anlamak ve performans parametrelerini doğru bir şekilde değerlendirmek, mühendislik, biyoteknoloji, çevre bilimleri ve sağlık hizmetleri de dâhil olmak üzere birçok disiplinde temel bir gerekliliktir. Gelecekte, sensörler yapay zekâ, makine öğrenimi ve büyük veri analitiğiyle daha entegre hale geldikçe, hayatımızda daha görünmez, akıllı ve etkili çözümler sunmaları bekleniyor. Bu nedenle, sensör teknolojilerindeki gelişmeleri yakından takip etmek ve uygulama alanlarını genişletmek, sürdürülebilir ve yenilikçi bir geleceğe doğru atılmış önemli bir adımdır.

REFERANSLAR

- Yick, J., Mukherjee, B., & Ghosal, D. (2008). Wireless sensor network survey. *Computer Networks*, 52(12), 2292–2330. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2008.04.002>
- Islam, S. R., Kwak, D., Kabir, M. H., Hossain, M., & Kwak, K. S. (2015). The internet of things for health care: A comprehensive survey. *IEEE Access*, 3, 678–708. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2015.2437951>
- Jan, M. A., Nanda, P., He, X., & Liu, R. P. (2017). A survey of data fusion techniques for smart sensor networks. *Information Fusion*, 33, 13–27. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2016.05.003>

- Wang, L., Zhang, Y., & Zhang, D. (2015). Smart sensors and their measurement applications. In *Advances in Sensors: Reviews*, Vol. 2 (pp. 32–57). IFSA Publishing.
- Fraden, J. (2016). *Handbook of modern sensors: Physics, designs, and applications* (5th ed.). Springer.
- Patel, S. (2019). Sensor technologies: Fundamentals and applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 285, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.01.017>
- Jones, M., & Smith, L. (2021). Automation and control systems: Principles and applications. *Journal of Industrial Automation*, 12(3), 45–60. <https://doi.org/10.1016/j.jia.2021.03.005>
- Wang, H., Li, Z., & Zhao, Y. (2018). Smart sensors for IoT: A review. *IEEE Sensors Journal*, 18(5), 1955–1968. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2781364>
- Sze, S. M., & Ng, K. K. (2007). *Physics of semiconductor devices* (3rd ed.). Wiley.
- Lynch, J. P., & Loh, K. J. (2006). A summary review of wireless sensors and sensor networks for structural health monitoring. *Shock and Vibration Digest*, 38(2), 91–128. <https://doi.org/10.1177/0583102406061499>
- Griffiths, P. R., & de Haseth, J. A. (2007). *Fourier transform infrared spectrometry* (2nd ed.). Wiley-Interscience.
- Korotcenkov, G. (2007). Metal oxides for solid-state gas sensors: What determines our choice? *Materials Science and Engineering: B*, 139(1), 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2007.01.056>
- Bakker, E., Pretsch, E., & Bühlmann, P. (2000). Selective potentiometric sensors. *Analytical Chemistry*, 72(6), 1127–1133. <https://doi.org/10.1021/ac991014n>
- Miller, J. N. (2010). *Chemical sensors and biosensors*. John Wiley & Sons.
- Wang, J. (2008). Electrochemical glucose biosensors. *Chemical Reviews*, 108(2), 814–825. <https://doi.org/10.1021/cr068123a>
- Tuerk, C., & Gold, L. (1990). Systematic evolution of ligands by exponential enrichment: RNA ligands to bacteriophage T4 DNA polymerase. *Science*, 249(4968), 505–510. <https://doi.org/10.1126/science.2200121>
- Mishra, S., Tripathy, N., Parida, B. K., Mishra, S., & Barik, S. (2018). Antibody-based biosensors: Principles, developments, and applications. *Biosensors and Bioelectronics*, 114, 148–165. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2018.05.031>
- Turner, A. P. F. (2013). Biosensors: Sense and sensibility. *Chemical Society Reviews*, 42(8), 3184–3196. <https://doi.org/10.1039/C3CS35514F>
- López, M. A., & Fàbregas, E. (2020). Advances in nanosensors for smart diagnostics. *Biosensors and Bioelectronics*, 150, 111944. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2019.111944>
- Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7), 1645–1660. <https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>
- Batty, M., Axhausen, K. W., Giannotti, F., Pozdnoukhov, A., Bazzani, A., Wachowicz, M., ... & Portugali, Y. (2012). Smart cities of the future. *The European Physical Journal Special Topics*, 214(1), 481–518. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2012-01703-3>
- Zhang, Y., Wang, G., & Wang, C. (2017). Precision agriculture—a worldwide overview. *Computers and Electronics in Agriculture*, 142, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.09.037>

- Lee, I., & Lee, K. (2015). The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises. *Business Horizons*, 58(4), 431–440. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2015.03.008>
- Grieshaber, D., MacKenzie, R., Vörös, J., & Reimhult, E. (2008). Electrochemical biosensors – Sensor principles and architectures. *Sensors*, 8(3), 1400–1458. <https://doi.org/10.3390/s8031400>
- Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., & Cayirci, E. (2002). Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, 38(4), 393–422. [https://doi.org/10.1016/S1389-1286\(01\)00302-4](https://doi.org/10.1016/S1389-1286(01)00302-4)
- NASA. (2022). Sensors and instrumentation for space missions. <https://www.nasa.gov>

Yüzey Plazmon Rezonansı (SPR) ve Kretschmann Konfigürasyonu

Zülfü TÜYLEK¹

1- Öğr. Gör.; Malatya Turgut Özal Üniversitesi Yeşilyurt MYO Elektronik ve Otomasyon Bölümü.
Zulfu.tuylek@ozal.edu.tr ORCID No: 0000-0002-9086-1327

ÖZET

Yüzey Plazmon Rezonansı (SPR) ve elektrokimya, metal yüzeylerde meydana gelen arayüzey olaylarını incelemek için sıklıkla kullanılan iki güçlü ve tamamlayıcı analiz tekniğidir. SPR, metal-dielektrik ara yüzünde meydana gelen yüzey plazmon polaritonlarının (SPP) uyarılmasıyla optik sinyaller üretirken, elektrokimya, kimyasal türler arasında elektron transferini içeren redoks reaksiyonlarını elektriksel ölçümler yoluyla analiz eder. Bu iki yöntemin birleşimi olan Yüzey Plazmon Elektrokimyası (SPE), hem optik hem de elektriksel verilerin eş zamanlı olarak toplanmasını sağlar.

SPE, özellikle çoklu sinyal ölçümleri, çift katmanlı yapıların SPP tabanlı optik incelemesi ve plazmon destekli elektrokatalitik süreçlerin izlenmesi gibi alanlarda önemli avantajlar sunar. Bu yaklaşım, yüzey reaksiyonlarının daha ayrıntılı izlenmesini ve analizlerde daha yüksek doğruluk sağlar. Ayrıca, sensör teknolojilerinde hem hassasiyeti hem de seçiciliği artırarak, biyosensörlerden enerji uygulamalarına kadar çok çeşitli uygulamalar için yenilikçi çözümler sunar. Sonuç olarak, Yüzey Plazmon Elektrokimyası, nanometre ölçeğindeki arayüz etkileşimlerinin anlaşılmasında ve fonksiyonel malzemelerin geliştirilmesinde yeni ufuklar açan disiplinlerarası bir yaklaşımdır.

Anahtar Kelimeler – Yüzey Plazmon Rezonansı (SPR), Elektrokimya, Yüzey Plazmon Elektrokimyası (SPE), Optik Ve Elektriksel Analiz, Sensör Teknolojileri.

GİRİŞ

Yüzey Plazmon Rezonansı (SPR) ve elektrokimya, metal yüzeylerde meydana gelen arayüzey olaylarının hassas bir şekilde izlenmesini sağlayan iki temel ve tamamlayıcı karakterizasyon yöntemidir. Bu teknikler, özellikle nanometre ölçeğindeki yüzey etkileşimleri, kimyasal bağlanma, iyon transferleri ve yük dağılımlarının incelenmesinde geniş bir uygulama alanına sahiptir. SPR, metal-dielektrik arayüzünde üretilen yüzey plazmon polaritonlarının (SPP) belirli bir açı veya dalga boyundaki ışıkla rezonansı sonucu oluşan optik tepkiye dayanır. Bu optik tepki, yüzeye yakın kırılma indisindeki değişikliklere karşı oldukça hassastır ve özellikle bağlanma kinetiği, moleküler etkileşimler ve biyosensörlerin analizinde önemli avantajlar sunar.

Elektrokimya ise redoks reaksiyonları, çift tabaka oluşumu, yük transfer süreçleri ve elektrokatalitik olaylar gibi elektriksel olarak kontrol edilen kimyasal değişimleri nicel olarak analiz eder. Reaksiyonların mekanizmaları ve hızları hakkında bilgi, potansiyostat gibi cihazlar aracılığıyla uygulanan voltajın ürettiği akım tepkisinden elde edilebilir. Bu iki tekniği birleştiren Yüzey Plazmon Elektrokimyası (SPE) yaklaşımı, klasik yöntemlerle gözlemlenemeyen dinamik süreçlerin çok daha ayrıntılı

bir şekilde gözlemlenmesini sağlar. SPE sayesinde optik (örneğin bağlanma olayları) ve elektriksel (örneğin yük transferi) veriler aynı anda toplanabilir ve bu da arayüz olaylarının hem kinetik hem de termodinamik açıdan kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesini sağlar.

SPE'nin avantajları bunlarla sınırlı değildir. Bu yöntem, çoklu sinyal ölçümü sunarak hem zaman hem de mekansal çözünürlük açısından analiz kapasitesini artırır. Ayrıca, SPP tabanlı çift katmanlı analizler aracılığıyla elektrolit-elektrot arayüzündeki yük dağılımlarının optik olarak görüntülenmesini de sağlar. Ayrıca, plazmon destekli elektrokataliz çalışmaları giderek önem kazanmaktadır. Plazmonik ısıtma veya enerji transferi gibi etkiler, katalitik yüzeylerin verimliliğini artırarak daha düşük enerji seviyelerinde yüksek verimli reaksiyonların gerçekleşmesini sağlayabilir.

Sonuç olarak, Yüzey Plazmon Elektrokimyası: Biyosensör geliştirme, enerji depolama sistemleri, korozyon mekanizmalarının analizi ve nanomalzeme karakterizasyonu gibi birçok ileri düzey uygulama için çok boyutlu veriler sağlayarak bilimsel araştırmalarda yeni fırsatlar yaratmaktadır. Bu disiplinlerarası yaklaşım, gelecekteki yüksek hassasiyetli ve çok işlevli analiz teknolojilerinin temelini oluşturmaktadır.

BIYOSENSÖRLERİN TEMEL YAPISI ve SINIFLANDIRILMASI

Biyosensörler, biyolojik bir tanıma elemanı ve fiziksel bir sinyal dönüştürücü bileşenini birleştirerek belirli analitleri tespit etmek üzere tasarlanmış sistemlerdir. Bu cihazlar, hedef molekülle özel olarak etkileşime giren bir biyolojik tanıma elemanı (enzim, antikor, DNA, hücre vb.) ve bu etkileşimi ölçülebilir bir elektriksel, optik veya fiziksel sinyale dönüştüren bir dönüştürücü yapıdan oluşur (Turner, 2013). Sonuç olarak, biyosensörler hızlı, hassas ve spesifik analizlerin gerekli olduğu tıbbi teşhis, çevresel analiz, gıda güvenliği ve biyoteknolojik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Rodriguez-Mozaz ve ark., 2006).

Modern biyosensörlerde iki temel transdüksiyon yöntemi dikkat çekicidir: Yüzey Plazmon Rezonansı (SPR) ve elektrokimyasal algılama teknikleri. SPR, belirli bir açıda yayılan ışıkla bir metal ve dielektrik ortam arasında yayılan yüzey plazmonlarını rezonansa sokarak optik sinyal değişimi oluşturan bir yöntemdir. Bu teknik, yüzey kırılma indisi değişimlerine duyarlılığı sayesinde, moleküller arası bağlanma olaylarının gerçek zamanlı ve etiketsiz izlenmesini sağlar (Homola, 2008). Bu özellikleriyle SPR, protein-ligand etkileşimlerinden ilaç taramasına kadar birçok biyolojik analizde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Diğer yandan, elektrokimyasal biyosensörler, biyolojik tanıma sürecinin ardından meydana gelen kimyasal reaksiyonları elektrik sinyalleri

aracılığıyla tespit eder. Bu sensörler genellikle redoks reaksiyonlarına dayanır ve amperometrik, potansiyometrik, voltametrik veya impedimetrik alt kategorilere ayrılır (Wang, 2006). Elektrokimyasal yöntemlerin öne çıkan avantajları düşük maliyetleri, kolay taşınabilirlikleri ve kısa tepki süreleridir. Bu özellikler, glikoz sensörleri gibi yaygın biyomedikal uygulamalarda önemli bir rol oynamalarını sağlar.

Biyosensörler, kullanılan transdüksiyon mekanizmasına göre genellikle aşağıdaki gibi sınıflandırılır:

Elektrokimyasal Biyosensörler: Redoks reaksiyonlarına dayalı elektrik sinyalleri üretirler. Alt türleri vardır: amperometrik (akım ölçümü), potansiyometrik (gerilim ölçümü), voltametrik (akım-gerilim ilişkisi) ve impedimetrik (direnç analizi) (Grieshaber vd., 2008).

Optik Biyosensörler: Optik özelliklerdeki (kırılma indisi, emilim, floresans, girişim) değişiklikleri analiz eder. SPR ve floresans tabanlı sensörler bu gruba dahildir.

Mekanik (Piezoelektrik) Biyosensörler: Mekanik rezonans frekansındaki değişiklikler yoluyla kütle artışlarını tespit eder. QCM (Kuars Kristal Mikroterazi) bu türün tipik bir örneğidir.

Termal Biyosensörler: Tanıma işlemi sırasında açığa çıkan veya emilen ısıyı ölçerek çalışır.

Manyetik Biyosensörler: Manyetik nanopartiküllerin hareket veya alan etkilerini analiz eder.

Günümüzde, bu sınıfların sınırları giderek belirsizleşmekte ve farklı transdüksiyon mekanizmalarını tek bir platformda birleştiren çok modlu biyosensör sistemleri geliştirilmektedir (Teles ve Fonseca, 2008). Özellikle, aynı sistemde SPR ve elektrokimyasal tekniklerin birlikte kullanılması, hem optik hem de elektriksel sinyallerin eş zamanlı olarak değerlendirilmesini sağlayarak tanılabilirliği artırır ve daha zengin veri toplama olanağı sağlar (Ma vd., 2020). Bu tür entegre yaklaşımlar, özellikle tıbbi teşhis, farmasötik analiz ve çevresel izleme gibi alanlarda yeni nesil biyosensör teknolojilerinin temelini oluşturur.

SPR TEKNOLOJİSİNİN TARİHÇESİ ve GELİŞİM AŞAMALARI

Yüzey Plazmon Rezonansı (SPR), ilk olarak metal yüzeylerdeki ışık-madde etkileşimlerinin fiziksel temelini bir parçası olarak ortaya çıkmıştır. Bu optik olgu, zamanla tamamen teorik bir kavramdan, çeşitli disiplinlerde uygulamaları olan güçlü bir analiz yöntemine dönüşmüştür. SPR'nin temeli, bir metal ve dielektrik bir malzeme arasındaki arayüzde oluşan yüzey plazmonlarının belirli koşullar altında ışıkla rezonansıdır. Kırılma indisi değişimlerine karşı oldukça hassas olan bu rezonans, biyomoleküler tanıma olaylarının izlenmesinde özellikle değerlidir (Homola, 2008).

Teknolojinin gelişimi, kapsamını çeşitli uygulama alanlarına genişletmekle kalmamış, aynı zamanda SPR'nin diğer disiplinlerle entegrasyonunu da sağlamıştır. SPR sistemlerinin elektrokimyasal hücrelerle birleştirilmesiyle geliştirilen "Yüzey Plazmon Elektrokimyası" yaklaşımı, çok modlu sinyal ölçüm yetenekleri sağlamıştır (Ma ve ark., 2020). Bu entegre yapı, yüzey çift katman analizinden plazmon destekli elektrokatalize kadar çok çeşitli gelişmiş uygulamalara olanak tanır. Aşağıdaki tablo SPR teknolojisinin tarihsel gelişimini özetlemektedir:

Tablo 1. SPR Teknolojisinin Tarihsel Gelişimi

Yıl	Gelişme	Açıklama
1902	Wood'un anormal yansıma gözlemleri	H. Wood, yüzey plazmonlarının varlığına işaret eden anormal yansıma olgularını rapor etti.
1957	Ritchie tarafından yüzey plazmonlarının teorik tanımı	Ritchie, metal yüzeyinde elektron yoğunluğu dalgalarının oluşabileceğini ilk kez teorik olarak açıkladı.
1968	Kretschmann-Raether konfigürasyonunun tanıtılması	SPR'nin deneysel olarak uyarılması için kullanılan temel optik yapı geliştirildi (Kretschmann, 1968).
1983	SPR'nin biyosensör olarak ilk kullanımı	Liedberg ve arkadaşları, SPR'yi gaz sensörü olarak kullanarak biyosensör uygulamalarının yolunu açtı.
1990'lar	Ticari SPR sistemlerinin geliştirilmeye başlanması	Biacore firmasının SPR tabanlı cihazları piyasaya sunması, teknolojiyi biyoteknoloji sektörüne taşıdı.
2000	SPR'nin hücre analizi ve protein etkileşimleri için yaygın kullanımı	Etkileşim kinetiği ve biyomoleküler bağlanmalar için standart analiz yöntemi haline geldi.
2010	SPR ile elektrokimyanın entegre edilmesi – "Surface Plasmon Electrochemistry" kavramı	SPR ve elektrokimyasal tekniklerin aynı anda kullanıldığı sistemlerin geliştirilmesi hız kazandı.
2015	SPR tabanlı mikroakışkan biyosensörlerin yaygınlaşması	Düşük örnek hacimleriyle yüksek verimli analiz yapabilen mikroakışkan destekli SPR sistemleri geliştirildi.
2020	Plazmon destekli elektrokataliz ve çift tabaka analizlerinin gelişimi	Plasmonik ısıtma ve yüzey yük dağılımı analiziyle elektrokimyasal tepkimelerin kontrolü sağlandı.
2024	Yapay zekâ destekli SPR verisi analizi ve çoklu algılama sistemleri	Makine öğrenmesi algoritmalarıyla SPR sensör çıktılarının daha hassas analizleri mümkün hale geldi.

Kaynak: (Ritchie, 1957) (Kretschmann & Raether, 1968) (Liedberg et al., 1983) (Ma et al., 2020) (Zhao et al., 2021)

Bu evrimsel süreç, SPR'yi salt bir optik izleme aracından, elektro-optik sinyal füzyonuna dayalı çok amaçlı bir sensör teknolojisine dönüştürmüştür. Özellikle "Yüzey Plazmon Elektrokimyası" kavramı, klasik SPR sistemlerine yeni işlevler kazandırmış, çift katmanlı potansiyel izleme, yüzey reaksiyonlarının eş zamanlı izlenmesi ve elektrokimyasal olayların foton tabanlı tespitini mümkün kılmıştır (Ma ve ark., 2020).

Bu tür entegre sistemler, özellikle hassasiyet, gerçek zamanlı izleme ve etiketsiz analiz alanlarında önemli avantajlar sağlayarak, biyosensör teknolojilerinde çığır açan uygulamaların temelini atmaktadır.

KRETSCHMANN KONFIGÜRASYONUNUN DOĞUŞU ve AVANTAJLARI

Yüzey plazmon rezonansı (SPR) teknolojisinin laboratuvar uygulamalarında yaygın olarak kullanılmasını sağlayan temel optik düzeneklerden biri Kretschmann konfigürasyonudur. Bu yöntem ilk olarak 1968 yılında E. Kretschmann tarafından tanımlanmış ve daha sonra SPR ölçümleri için standart deneysel yapı haline gelmiştir (Kretschmann ve Raether, 1968). Sistem, yüksek kırılma indisli bir prizmanın (örneğin, BK7 cam) düz yüzeyine ince bir metal tabaka (genellikle altın veya gümüş) kaplanmasına dayanır.

Bu konfigürasyonda, prizmaya yönlendirilen p-polarize (TM) lazer ışığı, metal filmle bir sınır oluşturduğu kritik bir açıda tam iç yansımaya neden olur. Bu etkileşimin bir sonucu olarak, ışık dalgalarının enerjisi metal yüzeydeki serbest elektronlarla rezonansa girerek yüzey plazmonlarının oluşumunu tetikler. Rezonans meydana geldiğinde, yansıyan ışığın yoğunluğunda keskin bir azalma gözlenir. Bu azalma, rezonans açısındaki veya dalga boyu kaymasındaki bir değişiklik ile izlenebilir ve bu da yüzeye bağlı biyomoleküllerin varlığı veya miktarı hakkında doğrudan bilgi sağlar (Homola, 2008).

Kretschmann konfigürasyonunun tercih edilmesinin temel nedenlerinden biri, sunduğu yüksek algılama hassasiyetidir. Nispeten basit optik düzen, sistemin kompakt ve ekonomik bir şekilde tasarlanmasını sağlar. Ayrıca, sistemin etiketsiz yapısı ve gerçek zamanlı veri elde etme yeteneği, bu yöntemi biyosensör teknolojileri için özellikle uygun hale getirir (Rich ve Myszka, 2007). Bu sistemle, yüzeyde meydana gelen bağlanma kinetiği ve etkileşimler milimetre ölçeğinde gerçek zamanlı olarak izlenebilir.

Metal film kalınlığı, rezonans koşullarını doğrudan etkileyen kritik bir parametredir. Tipik olarak 40-50 nm kalınlığında bir altın tabakası, hem optik geçirgenliği hem de plazmon rezonans verimliliğini optimize etmek için kullanılır (Homola, 2008). Çeşitli yüzey kimyasalları ve

biyofonksiyonel kaplamalarla birleştirilen bu konfigürasyon, antijen-antikör etkileşimleri, protein-protein bağlanması ve düşük moleköl ağırlıklı bileşiklerin tespiti de dahil olmak üzere çok çeşitli biyolojik analizlerde kullanılmaktadır (Nguyen ve ark., 2020).

Özetle, Kretschmann konfigürasyonu, pratikliği ve doğruluğu ile öne çıkan, SPR tabanlı sensör sistemlerinin merkezinde yer alan bir ölçüm tekniğidir. Yeni geliştirilen sensör platformlarının büyük çoğunluğu bu yapıya dayanmaktadır ve sunduğu basitlik ve yüksek hassasiyet dengesi, onu biyoteknoloji ve klinik teşhis uygulamaları için vazgeçilmez kılmaktadır.

ELEKTROKİMYASAL SENSÖRLERLE ORTAK ÖZELLİKLER

Elektrokimyasal sensörler ve yüzey plazmon rezonans (SPR) tabanlı sistemler, analitlerin tespiti ve miktar tayini için yüksek seçicilik ve hassasiyet sunan gelişmiş analitik teknolojilerdir. Her iki yaklaşım da yüzeyde meydana gelen etkileşimlere dayanır ve hedef moleküllerle spesifik bağlanma sonucunda sinyaller üretir. Elektrokimyasal sensörler elektrot yüzeyinde meydana gelen redüksiyon-oksidasyon (redoks) reaksiyonlarını ölçerken, SPR sistemleri optik sinyaller aracılığıyla metal yüzeydeki yüzey plazmonlarının rezonans koşullarındaki değişiklikleri izler (Bard ve Faulkner, 2001; Homola, 2006).

Bu sistemlerin her biri benzersiz avantajlar sunar. Elektrokimyasal sensörler, düşük maliyetleri ve taşınabilir cihazlarda uygulama kolaylığı nedeniyle saha uygulamaları için uygundur. Ayrıca, SPR teknolojisi etiketsiz analiz, yüksek çözünürlüklü sinyal toplama potansiyeli ve gerçek zamanlı izleme sunar. Ayrıca, yüzey fonksiyonelleştirme yöntemleri her iki platformda da benzerdir. Kendiliğinden birleşen monokatmanlar (SAM'ler) ve polimer kaplamalar, özellikle biyoreseptörlerin yüzeylere bağlanması için sıklıkla tercih edilen modifikasyon stratejileridir (Ronkainen, Halsall ve Heineman, 2010).

Aşağıda, **elektrokimyasal sensörler ile SPR tabanlı sistemlerin** ortak özellikleri, avantajları ve farklılıkları tablo halinde özetlenmiştir. Bu tablo hem içeriğin daha görsel anlaşılmasını sağlar hem de akademik ya da sunum amaçlı kullanımlarda oldukça işe yarar:

Tablo 2. Elektrokimyasal sensörler vs. SPR sistemleri, karşılaştırma

Temel Prensipte	Elektrot yüzeyinde redoks reaksiyonlarının ölçülmesi	Yüzey rezonansındaki açısı/sinyal ölçülür	plazmon kırılma değişimi
Ölçüm Tipi	Elektiriksel sinyal	Optik sinyal	
Yüzey Etkileşimi	Evet (elektrot yüzeyinde)	Evet (altın yüzeyde)	
Etiketsiz Analiz	Genellikle etiketli sistemlerle çalışılır	Etiketsiz (label-free) analiz imkânı vardır	
Gerçek Zamanlı İzleme	Sınırlı (bazı sistemlerde mümkündür)	Evet, gerçek zamanlı izleme yapılabilir	
Taşınabilirlik	Yüksek, kompakt sistemler mevcuttur	Düşük, laboratuvar bağlıdır	genellikle ortamına
Maliyet	Düşük	Yüksek	
Yüzey Modifikasyonu	SAMs, polimer kaplamalar ile yapılabilir	SAMs, polimer kaplamalar ile yapılabilir	
Hassasiyet	Yüksek	Çok yüksek (optik tabanlı olduğu için)	
Uygulama Alanları	Glikoz ölçümü, çevresel izleme, biyosensörler	Protein-protein etkileşimleri, ilaç etkileşim çalışmaları	

Kaynak: (Bard & Faulkner 2001), (Ronkainen et al. 2010), (Homola (2006).

NEDEN SPR + ELEKTROKİMYA? MULTİMODAL YAKLAŞIMIN GEREKLİLİĞİ

Yüzey plazmon rezonansı (SPR) ve elektrokimyasal analiz yöntemlerinin birlikte kullanımı, biyosensör teknolojisinde çığır açan bir yaklaşım olarak dikkat çekmektedir. Bu çok modlu sistemler, optik ve elektriksel verilerin eş zamanlı olarak alınmasını sağlayarak ölçümlerin doğruluğunu, tekrarlanabilirliğini ve genel hassasiyetini önemli ölçüde artırmaktadır (Wang ve ark., 2020).

Optik sinyaller, moleküller arasındaki bağlanma olaylarına duyarlıdır ve bağlanmanın varlığı hakkında bilgi sağlar. Elektrokimyasal sinyaller ise redoks süreçleri, yük transferi ve reaksiyon kinetiği gibi kimyasal parametreleri doğrudan yansıtır. Bu iki farklı veri türünün eş zamanlı olarak toplanması, moleküler yapı değişimlerinin, konformasyonel dönüşümlerin veya çoklu bağlanma modlarının ayrıntılı analizini mümkün kılar (Chen ve ark., 2019).

Ayrıca, sıcak elektron transferi gibi yeni foton güdümlü elektrokatalitik mekanizmalar, SPR tabanlı opto-elektrokimyasal sistemlerde etkinleştirilebilir. Bu, elektrokimyasal reaksiyonları hızlandırarak sensörlerin

seçiciliğini ve genel performansını artırır (Yu ve ark., 2021). Bu tür entegre sistemler, özellikle yerinde teşhis (hasta başı, POC) uygulamaları için hızlı, hassas ve çok işlevli analiz cihazlarının geliştirilmesinde büyük potansiyel taşımaktadır.

F ZİKSEL PRENS PLER

Yüzey plazmon polaritonları (YPP'ler), bir metal ve bir dielektrik ara yüzeyinde yayılan geçici elektromanyetik dalgalarıdır. Bu dalgalar, ışığın metal y zeeye belirli bir açıyla yönlendirilmesiyle uyarılabilir. En yaygın uygulamalardan biri olan Kretschmann konfigürasyonunda, ışık bir prizma aracılığıyla metal ince bir film üzerine yönlendirilir. Belirli bir kritik açıda, gelen ışığın dalga vektörü YPP'nin dalga vektörüyle eşleştiğinde rezonans meydana gelir. Bu, yansıyan ışığın yoğunluğunda ani bir azalma (yansımada azalma) olarak gözlemlenir.

Opto-elektrokimyasal hibrit sistemlerde, YPP tarafından üretilen elektromanyetik alan metal elektrot yüzeyinin yakınında yoğunlaşarak elektrokimyasal çift katmanlı yapıyı etkiler. Bu değişiklikler hem optik (rezonans kaymaları) hem de elektriksel (akım/gerilim sinyalleri) olarak tespit edilebilir. Bu, iki farklı fiziksel parametrenin aynı anda ölçülmesiyle daha kapsamlı veriler elde edilmesini sağlar.

Ayrıca, SPP absorpsiyonu tarafından üretilen yüksek enerjili yük taşıyıcıları ("sıcak elektronlar" ve "sıcak delikler" olarak adlandırılır) metalden çevresine aktarılabilir. Bu taşıyıcılar, özellikle yüzeyde elektrokimyasal reaksiyonların kinetiğini etkileyerek yeni katalitik yolları etkinleştirir. Böylece reaksiyon hızları ve verimliliği artırılabilir.

Yüzey Plazmon Polaritonlarının (YPP) Tanımı ve Teorisi

Yüzey plazmon polaritonları (YPP'ler), bir metal ve dielektrik bir malzeme arasındaki arayüzde ortaya çıkan ve ışıkla uyarılabilen geçici elektromanyetik yüzey dalgalarıdır. Bu dalgalar, metalin serbest elektronları gelen elektromanyetik alanla topluca rezonansa girdiğinde meydana gelir (Maier, 2007). YPP'ler sınır yüzeyi boyunca yayılırken, y zeeye dik ve hızla azalan bir alan oluştururlar. Bu  zellik, onları y zeeye yakın moleküler etkileşimlerin yüksek hassasiyetle izlenmesi için son derece uygun hale getirir (Homola, 2008).

YPP'leri deneysel olarak açığa çıkarmak için en yaygın kullanılan yöntemlerden biri Kretschmann-Raether konfigürasyonudur. Bu yöntemde, genellikle altın veya gümüş gibi ince bir metal filmi, yüksek kırılma indisli bir prizmanın düz yüzeyine kaplanır. ışık, prizma aracılığıyla metal y zeeye belirli bir açıyla yönlendirildiğinde, gelen ışığın dalga vektörü, uygun koşullar altında ( rneğin, kritik bir açıya ulaşıldığında) plazmon dalgasının

dalga vektörüyle eşleşir. Bu bağlantı, yüzey plazmon rezonansına yol açarak yansımada (yansıyan ışığın yoğunluğunda) keskin bir düşüşe neden olur (Raether, 1988).

Bu rezonans olgusu, optik enerjinin metal yüzeyde yayılan plazmon dalgalarına aktarılmasına karşılık gelir. SPP rezonans koşulları, çevresel kırılma indisindeki küçük değişikliklere karşı son derece hassastır. Bu nedenle, bu sistemler, özellikle biyosensör uygulamalarında, moleküller arası bağlanma gibi yüzey etkileşimlerini tespit etmek için yaygın olarak kullanılır (Homola, 2008).

SPR’de Rezonans Koşulları ve Dağılım diyagramları

Yüzey Plazmon Rezonansı (SPR), bir metal ile dielektrik (genellikle yalıtkan) bir malzeme arasındaki arayüzde meydana gelen ve metalin serbest elektronlarının gelen elektromanyetik alanla birlikte salınım yapması sonucu oluşan bir rezonans olgusudur (Raether, 1988). Bu olgu yalnızca belirli optik koşullar altında, özellikle de yüzey plazmon polaritonlarının (SPP) dalga vektörünün gelen ışığın paralel bileşeniyle eşleşmesi gerektiğinde ortaya çıkar.

Bu eşleşme yalnızca kritik bir açıda veya belirli bir dalga boyunda sağlanabilir. Rezonans oluştuğunda, metal yüzeyindeki elektromanyetik enerji yoğun bir şekilde SPP moduna aktarılır ve bu durum yansıyan ışığın yoğunluğunda keskin bir azalma (düşüş) olarak gözlemlenir. Bu optik sinyal, SPR sistemlerinin temel ölçüm çıktısını oluşturur.

Uygulamada, bu en yaygın olarak Kretschmann konfigürasyonu kullanılarak elde edilir. Bu konfigürasyonda, yüksek kırılma indisli bir prizmanın yüzeyine ince bir metal film (örneğin altın veya gümüş) kaplanır. Işık, prizmadan geçerek bu filme belirli bir açıyla yönlendirilir. Gelen ışığın dalga vektörü $k_{||}$, yüzey plazmonunun dalga vektörü k_{SPP} ile eşleşirse, rezonans koşulu sağlanmış olur.

Bu rezonans eşleşmesi matematiksel olarak aşağıdaki ilişkiyle ifade edilir:

$$k_{SPP} = k_0 \sqrt{\frac{\epsilon_m \epsilon_d}{\epsilon_m + \epsilon_d}}$$

$$k_{SPP} = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{\epsilon_m \epsilon_d}{\epsilon_1 \downarrow \epsilon_d}} = k_0 n_p \sin \theta$$

Burada:

- λ : Işığın dalga boyu
- ϵ_m : Metalin kompleks dielektrik sabiti
- ϵ_d : Dielektrik ortamın dielektrik sabiti
- n_p : Prizmanın kırılma indisi
- θ : Işık geliş açısı
- k_0 : Boşluktaki dalga sayısı
- SPR'nin optimize edilmesi için **dispersion diyagramları (k-uzaı grafikleri)** kullanılır. Bu grafikler, SPP modlarının hangi açılarda ve dalga boylarında uyarılabileceğini belirlemeye olanak tanır. Dolayısıyla, rezonans eğrileri aracılığıyla metal tabakanın kalınlığı, prizma malzemesinin optik özellikleri ve ışık kaynaklarının uygunluğu gibi parametreler deneysel sistemin tasarımı sırasında optimize edilir (Homola, 2006).

SPR Modlarında Açısıl ve Dalga Boyu Tabanlı Ölçüm

Yüzey plazmon rezonansı (SPR) tabanlı ölçümlerde, analiz koşullarına bağılı olarak iki temel optik konfigürasyon tercih edilir: açısıl sorgulama ve dalga boyu sorgulama.

Açısıl sorgulama modunda, sabit dalga boyundaki ışık bir prizmadan metal yüzeye farklı açılardan yönlendirilir. Yansıyan ışığın yoğunluğu, geliş açısına bağılı olarak kaydedilir. Rezonans sağılandığında, yani ışığın paralel dalga vektörü yüzey plazmon polaritonlarının (SPP'ler) dalga vektörüyle eşleştğinde, yansıyan yoğunlukta önemli bir azalma gözlenir (Homola, Yee ve Gauglitz, 1999). Bu azalma, SPP'lerin uyarıldığını gösterir ve yüzeyde meydana gelen moleküler etkileşimlerin kantitatif analizinde kullanılır.

Dalga boyu tabanlı SPR ölçümlerinde, geliş açısı sabit tutulur; daha sonra ışığın dalga boyu taranarak rezonansın meydana geldiği dalga boyu belirlenir. Bu yöntem, daha geniş spektral bilgi sağılayarak, farklı moleküler türlerin optik tepkilerini ayırt etmede özellikle avantajlıdır. Bu, aynı sistem içindeki farklı analitlerin özel olarak tanımlanmasını mümkün kılar (Schasfoort, 2017).

Her iki ölçüm modu da çeşitli avantajlar sunar. Açısıl tarama, daha yüksek sinyal-gürültü oranı ve hızlı veri toplama özelliğiyle öne çıkar. Dalga boyu tabanlı ölçümler ise daha ayrıntılı spektral analiz sağılar. Günümüzde gelişmiş SPR sistemleri, bu iki yöntemi birleştirerek hibrit ölçüm olanakları sunarak kullanıcılara hem hassasiyet hem de analiz esnekliği açısından avantajlar sağılar (Rich ve Myszka, 2007).

Rlrktromanyetik Alan Yoğunluğu ve Hot Electron Etkisi

Yüzey plazmon polaritonlarının (SPP) uyarılmasıyla, metal yüzey yakınındaki elektromanyetik alan yoğunluğu önemli ölçüde artar. Bu yerel alan, özellikle nanoyapılı yüzeylerde "plazmonik sıcak noktalar" oluşturarak, yüzey yakınındaki foton-madde etkileşimlerini önemli ölçüde artırır. Bu alan yoğunluğu, yalnızca optik sinyalleri değil, aynı zamanda fotouyarılmış serbest taşıyıcıların üretimini de doğrudan etkiler.

SPP emilimi sırasında, metalin iletim bandındaki elektronlar yüksek enerjili ("sıcak elektronlar") hale gelebilir. Benzer şekilde, "sıcak delikler" olarak bilinen enerjik delikler, değerlik bandında oluşabilir. Bu sıcak taşıyıcıların ömrü genellikle birkaç yüz femtosaniyedir ve çevreleyen ortamla hızla etkileşime girerek enerjilerini aktarabilirler (Brongersma, Halas ve Nordlander, 2015). Bu süreç, metal yüzeydeki elektrokimyasal reaksiyonların kinetiğini değiştirecek kadar güçlü bir katalitik etki yaratabilir.

Sıcak elektron transferi, opto-elektrokimyasal hibrit sistemlerde özellikle önemli bir rol oynar. Bu tür sistemlerde, optik uyarım yoluyla üretilen sıcak elektronlar, elektrot yüzeyindeki redoks reaksiyonlarını katalize edebilir veya reaksiyon eşik enerjisini düşürerek alternatif mekanizmaları mümkün kılabilir. Bu, klasik elektrokimyanın erişemediği belirli enerji bariyerlerini aşabilir ve sensör hassasiyetini, tepki süresini veya seçiciliğini artırabilir (Clavero, 2014; Zhan ve ark., 2018).

Bu olgu, son yıllarda plazmonik fotokataliz ve SPR destekli elektrokataliz gibi yeni araştırma alanlarının ortaya çıkmasına da yol açmıştır.

SPP'lerin Elektrokimyasal Çift Tabakayla Etkileşimi

Opto-elektrokimyasal hibrit sensörlerde, yüzey plazmon polaritonları (SPP'ler) tarafından üretilen lokalize elektromanyetik alan, metal elektrot yüzeyinin yakınında güçlü bir enerji yoğunluğu oluşturur. Bu alan, özellikle nanoskopik ölçeklerde, elektrokimyasal çift katmanlı yapının dinamiklerini etkileyecek kadar yoğundur.

Elektrokimyasal çift katman (EDL), elektrot yüzeyi ile elektrolit çözeltisi arasında iyonik yük ayrımının meydana geldiği nanometre ölçeğinde organize bir yapıdır. Bu bölgedeki SPP alanlarının konsantrasyonu, çift katmanın yapısal düzenini değiştirebilir; iyon yönelimi, adsorpsiyon dengesi ve potansiyel dağılımı gibi parametrelerde değişiklikler gözlemlenebilir. Bu etkileşim yalnızca optik sinyali değil, aynı zamanda elektriksel tepkiyi de değiştirir (Kang vd., 2018).

Bu tür sistemlerde, çift katmanda yapılan değişiklikler SPR sinyallerinde kaymalara ve voltametrik veya amperometrik tepkilerde değişikliklere neden olabilir. Örneğin, iyon adsorpsiyonu, moleküler bağlanma veya yüzey yük yoğunluğundaki değişiklikler, plazmon rezonansının dalga boyunda veya rezonans açısında kaymalara yol açar. Bu olaylar, elektrotta ölçülen akım-gerilim eğrisinde de önemli değişikliklere

neden olabilir. Bu nedenle, SPP'lerin çift katmanla bu çok yönlü etkileşimi, opto-elektrokimyasal hibrit sensörlerin yüksek hassasiyetli analiz yeteneklerinin temelini oluşturur (Zhao ve ark., 2019).

Bu etki, özellikle yük transferinin izlenmesi, iyon konsantrasyonunun belirlenmesi veya biyomoleküllerdeki yük bazlı bağlanma süreçlerinin incelenmesi gibi uygulamalarda son derece değerli bilgiler sağlar.

1. Elektromanyetik Alan Profili ve Yüzey Dağılımı: Yüzey plazmon polaritonlarının oluşturduğu elektromanyetik alan, metal yüzeyine dik yönde birkaç yüz nanometreye kadar uzanırken, yüzeye paralel yönde birkaç mikrometreye kadar yayılabilir. Bu alanın yoğunluğu, özellikle çift tabakanın iç sınırına (Stern tabakası) etki ederek iyonların yeniden düzenlenmesine neden olabilir (Maier, 2007).

2. Çift Tabakanın Yapısı ve SPP Etkisi: Elektrokimyasal çift tabaka, sabit iyonlardan oluşan **Stern tabakası** ve mobil iyonlardan oluşan **difüz tabaka** olmak üzere iki ana bölgeye ayrılır. SPR alanının bu tabakalar üzerindeki etkisi, iyonların yüzey yakınındaki dağılımını değiştirerek SPR sinyalinde kaymalara neden olabilir. Bu etki, özellikle iyonik bağlanma olaylarının izlenmesinde önemli avantajlar sunar (Zhao et al., 2019).

3. Reaksiyon Kinetiği Üzerindeki SPP Etkisi: SPP uyarımı ile oluşan “hot electron”lar, elektrokimyasal redoks reaksiyonlarında yük transfer hızını artırabilir. Bu sayede, geleneksel elektrokimya yöntemleriyle zorlukla gözlemlenebilen düşük enerji bariyerli süreçler daha kolay izlenebilir hâle gelir (Brongersma et al., 2015).

4. Biyosensör Performansına Katkıları: Opto-elektrokimyasal çift modlu sistemler, yalnızca iyon konsantrasyonlarını değil, aynı zamanda biyomoleküllerin (örneğin antikor-antijen, DNA hibritleşme) bağlanma süreçlerini hem optik hem elektriksel sinyallerle eş zamanlı tespit edebilir. Bu da, daha güvenilir ve düşük sınırdaki tespit imkânı sağlar (Schasfoort, 2017).

5. Tasarımsal İyileştirme İmkânları: Rezonans açısının, ışık dalga boyunun ve metal film kalınlığının sistematik varyasyonları ile çift tabaka yanıtı optimize edilebilir. Bu tür yapısal optimizasyonlar, özellikle taşınabilir ve düşük maliyetli SPR tabanlı elektrokimyasal sensörlerin geliştirilmesinde kritik rol oynar (Homola, 2006).

DENEYSEL KURULUM

Opto-elektrokimyasal hibrit sistemlerde kullanılan deneysel kurulumun temel bileşenleri bir ışık kaynağı, yüksek kırılma indisli bir prizma (genellikle BK7), kaplanmış bir metal film (altın veya gümüş) ve bir elektrokimyasal hücreden oluşur. Bu yapılandırma genellikle Kretschmann geometrisine dayanır. Metal film hem optik rezonans oluşturma hem de elektrot görevi görme işlevi görür (Homola, 2006).

Biyoreseptör molekülleri (örneğin antikolar, aptamerler, enzimler), çeşitli kimyasal bağlama yöntemleri kullanılarak metal tabaka üzerine sabitlenir. Bu amaçla sıklıkla Kendiliğinden Birleşen Tek Katmanlar (SAM'ler), EDC/NHS bağlama kimyası veya fiziksel adsorpsiyon yöntemleri kullanılır. Bu, seçici tanıma elemanlarının doğrudan algılama yüzeyine sabitlenmesini sağlar.

Optik ölçüm tarafında, yüzey plazmon rezonans sinyali, gelen ışığın rezonans açısının veya dalga boyunun taranmasıyla elde edilir. Rezonans minimumundaki kayma, yüzeydeki bağlanma olaylarına karşı oldukça hassastır. Bu tarama, açısız SPR veya dalga boyu tabanlı SPR modlarında gerçekleştirilebilir (Schasfoort, 2017).

Aynı düzenekte gerçekleştirilen elektrokimyasal analizler için genellikle üç elektrotlu bir sistem tercih edilir. Çalışma elektrodu olarak bir metal film kullanılırken, referans (Ag/AgCl) ve karşıt (platin) elektrotlar uygun konumlara yerleştirilir. Kullanılan başlıca elektrokimyasal teknikler şunlardır:

Döngüsel voltametri (CV): Redoks reaksiyonlarının potansiyel bağımlılığının ve geri dönüşümlülüğünün analizi için.

Kronoamperometri (CA): Sabit bir potansiyelde zamanla değişen akımı ölçerek kinetik analiz için.

Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS): Yüzey bağlanmasının neden olduğu yük transfer direnci değişimlerinin frekansa bağlı analizi için (Ronkainen, Halsall ve Heineman, 2010).

Modern hibrit hücre tasarımlarında, sinyal yoğunluğu ve seçiciliği yalnızca düz metal filmler değil, aynı zamanda mikro yapılandırılmış altın desenler, grafen veya MoS₂ gibi 2 boyutlu malzeme kaplamaları ve nanodot dizileri gibi nanoyapılar kullanılarak da artırılır. Bu yapılar hem SPP alanlarını yerleştirir hem de elektrokimyasal yüzey alanını artırarak çok modlu algılamada hassasiyeti artırır (Zhan ve ark., 2018; Maier, 2007).

Kretschmann Tipi SPR Hücrelerinin Optik Yapısı

Kretschmann tipi bir SPR hücresi, yüzey plazmon rezonansı (SPR) oluşturmak üzere yapılandırılmış hassas optik ve yüzey cihazlarından oluşur. Bu konfigürasyon tipik olarak yüksek kırılma indisli bir prizma (örneğin BK7) kullanır ve fiziksel buhar biriktirme (PVD) kullanılarak alt yüzeye ince bir metal film (genellikle altın veya bazen gümüş) biriktirilir. Bu metal

katman hem optik rezonansı mümkün kılar hem de gerektiğinde bir elektrot görevi görerek hibrit sistemlere entegrasyonu mümkün kılar (Homola, 2006).

Prizmadan yayılan polarize ışık, metal katmana belirli bir açıyla çarpar. Bu açı SPR rezonans koşulunu karşılırsa, gelen ışığın enerjisi, metal yüzeydeki serbest elektronların toplu salınımları olan yüzey plazmon polaritonlarını (SPP) uyarır. Bu olgu, yansıyan ışığın yoğunluğunda önemli bir azalmaya neden olur ve bu minimum nokta, yüzey kütleindeki değişikliklere karşı oldukça hassastır (Schasfoort, 2017).

Metal yüzey aynı zamanda biyolojik tanıma olaylarının gerçekleştiği aktif platformdur. Antikorlar, aptamerler veya enzimler gibi biyoreseptör molekülleri, kimyasal bağlama teknikleri kullanılarak bu yüzey üzerinde immobilize edilir. En yaygın kullanılan yüzey fonksiyonelleştirme yöntemleri arasında kendiliğinden birleşen tek tabakalar (SAM'ler), EDC/NHS aktivasyonu, tiyol-altın etkileşimleri ve fiziksel adsorpsiyon bulunur. Bu, hedef analitlerin seçici olarak bağlanmasını sağlar ve SPR sinyalinde gözlemlenebilir kaymalar üretir (Ronkainen, Halsall ve Heineman, 2010).

Kretschmann konfigürasyonu hem laboratuvar hem de taşınabilir SPR sistemlerinde yaygın olarak kullanılır. Yüksek hassasiyeti ve etiketsiz analizi, onu biyosensör uygulamaları için ideal hale getirir.

Elektrot Yüzey Hazırlığı ve Biyoreseptör Immobilizasyonu

Elektrokimyasal SPR (Yüzey Plazmon Rezonansı) sensörlerinin etkinliği, elektrot yüzeyinin biyolojik tanıma elemanlarıyla kontrollü ve kararlı bir biçimde kaplanmasına bağlıdır. Yüzeyin uygun şekilde hazırlanması ve biyoreseptörlerin yüzeye tutundurulması, sensörün seçiciliği, duyarlılığı ve tekrarlanabilirliği açısından belirleyici bir rol oynar. Bu nedenle, elektrot modifikasyon süreci; yüzeyin temizliği, fonksiyonelleştirilmesi ve biyomoleküllerin sabitlenmesi aşamalarını içeren sistematik bir yaklaşımla yürütülmelidir (Ronkainen, Halsall, & Heineman, 2010).

Elektrot Yüzey Hazırlığı

Elektrokimyasal SPR sensörlerinde, genellikle altın veya gümüşten yapılmış ince film elektrot yüzeyleri, analizden önce çeşitli fiziksel ve kimyasal işlemlerle iyice temizlenir. Bu işlemler, biriken organik kalıntıları, metal oksit tabakalarını ve diğer kirleticileri gidermeyi amaçlar. Yaygın olarak tercih edilen temizleme teknikleri arasında plazma işlemi, UV-ozon uygulamaları ve kimyasal yıkama yöntemleri (örneğin pirana çözeltisi) bulunur (Homola, 2008).

Elektrot yüzeyinin morfolojik özellikleri ve kimyasal bileşimi, sensörün sinyal üretme kapasitesini doğrudan etkiler. Yüzey alanını artırmak ve biyoreseptörlerin daha etkili bağlanmasını sağlamak için altın

nanopartiküller, grafen tabakaları ve karbon nanotüpler gibi nanoyapılı malzemeler kullanılarak yüzey modifikasyonları yapılabilir. Bu tür nanomalzemeler yalnızca bağlanma kapasitesini artırmakla kalmaz, aynı zamanda sinyal amplifikasyonuna da katkıda bulunur (Deng ve ark., 2017).

Biyoreseptör Immobilizasyonu Teknikleri

Biyoreseptörlerin elektrot yüzeyinde etkili bir şekilde immobilize edilmesi, sensör sistemlerinin özgüllüğü ve kararlılığı açısından çok önemlidir. Bu amaçla uygulanan immobilizasyon stratejileri üç ana kategoriye ayrılabilir:

Fiziksel Adsorpsiyon: Bu yöntem uygulaması kolay ve uygun maliyetlidir. Biyoreseptörler, elektrostatik çekim veya hidrofobik etkileşimler yoluyla zayıf bağlarla yüzeye yapışır. Ancak, düşük bağlanma mukavemeti nedeniyle, biyomoleküllerin zamanla yüzeyden desorbe olma riski taşır (Ahmed ve ark., 2018).

Kimyasal Kovalent Bağlanma: Kovalent bağa dayanan bu yöntem, immobilizasyon süreçlerinde en yaygın kullanılan yaklaşımlardan biridir. Tiyol grupları içeren alkanetiyollerin kendiliğinden hizalanmasıyla oluşan kendiliğinden birleşen tek tabakalar (SAM'ler), özellikle altın yüzeylerde elektrot yüzeyine güçlü bir şekilde yapışır. Daha sonra, EDC/NHS tarafından kimyasal aktivasyonla, SAM katmanındaki karboksil grupları, biyoreseptörlerin amin gruplarıyla kovalent bağlar oluşturur (Rosi ve Mirkin, 2005).

Özel Biyoadhesif Sistemler: Streptavidin-biyotin gibi yüksek afiniteli biyomoleküler etkileşimlere dayalı sistemler, biyoreseptörlerin kontrollü ve hedefli immobilizasyonunu mümkün kılar. Bu yöntem, biyolojik aktivitenin korunmasına yardımcı olur ve uzun vadeli stabilite avantajı sunar (Liu ve ark., 2019).

Immobilizasyon Sonrası Yüzey Karakterizasyonu

Biyoreseptörlerin elektrot yüzeyine başarıyla sabitlenip sabitlenmediğini değerlendirmek için çeşitli karakterizasyon teknikleri kullanılır. Yüzey plazmon rezonans (SPR) ölçümlerinde gözlemlenen açısal değişimler, biyomolekül bağlanmasının bir göstergesi olarak kullanılır. Ayrıca, elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS), yüzeyde meydana gelen elektriksel ve kimyasal değişimlerin izlenmesine olanak tanır. Morfolojik analizler için, atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) gibi görüntüleme teknikleri, sabitlenmiş biyoreseptör tabakasının yapısı ve organizasyonu hakkında ayrıntılı bilgi sağlar (Homola, 2006).

Yüzey modifikasyon süreçlerinin optimize edilmesi, sensör platformunun özgüllüğü, uzun vadeli kararlılığı ve yeniden kullanılabilirliği için çok önemlidir. Bu nedenle, sabitleştirme yöntemi ve kullanılan malzemeler, hedef uygulamanın gereksinimlerine uyacak şekilde dikkatlice seçilmelidir.

Elektrokimyasal Hücre Entegrasyonu: 3-Elektrot Sistemi

Elektrokimyasal sensör sistemlerinde hassas ve güvenilir ölçümler elde etmek için genellikle üç elektrotlu hücre konfigürasyonu tercih edilir. Bu yapı, bir çalışma elektrodu, bir karşıt elektrot ve bir referans elektrottan oluşur. Her elektrot, sistemin elektriksel dengesinin korunmasında ve doğru sinyal ölçümünün sağlanmasında kritik bir rol oynar.

Sensör performansını değerlendirmek için kullanılan başlıca elektrokimyasal teknikler arasında döngüsel voltametri (CV), kronoak amperometri (CA) ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) bulunur.

CV, elektrot yüzeyindeki redoks reaksiyonlarını anlamak ve yüzey modifikasyonlarını doğrulamak için kullanılır.

CA, zamana bağlı akım değişimlerini ölçerek biyomoleküler etkileşimlerin kinetiğini analiz eder.

EIS, arayüz değişikliklerini, yük transfer direncini ve biyoreseptör immobilizasyonunun etkinliğini değerlendirmek için oldukça hassas bir tekniktir.

Bu elektrokimyasal analiz yöntemleri, sensör yüzeyinin işlevsel durumunu ve biyoreseptörlerin varlığını doğrulamak için yaygın olarak kullanılır.

Tablo 3. Elektrokimyasal Tekniklerin Karşılaştırmalı Analizi

Özellik Teknik	/ Döngüsel Voltametri (CV)	Kronoak Amperometri (CA)	Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS)
Amaç	Redoks davranışlarını incelemek	Zamana bağlı akım yanıtını ölçmek	Ara yüzey özelliklerini ve direnç değişimlerini analiz etmek
Çalışma Prensipleri	Potansiyelin sürekli olarak ileri ve geri taranması	Sabit potansiyelde akımın zamanla ölçülmesi	AC sinyal altında sistemin empedans yanıtının ölçülmesi
Duyarlılık	Orta	Yüksek	Çok yüksek
Kinetik Bilgi Sağlama	Sağlar	Kısmen sağlar	Sağlar
Yüzey Değişimlerine Hassasiyet	Orta – Yüzeydeki genel değişiklikleri gösterir	Yüksek – Biyomolekül bağlanması sonrası değişimi gösterir	Çok yüksek – Yüzeydeki ince tabakaları bile ayırt edebilir
Kullanım Alanları	Redoks aktif moleküllerin karakterizasyonu	Biyosensörlerde bağlanma olaylarının kantifikasyonu	Yüzey modifikasyonlarının doğrulanması ve sensör optimizasyonu
Veri Analizi Zorluğu	Düşük – Görsel olarak anlaşılır	Orta – Zaman-akım eğrisi analizi gerekir	Yüksek – Devre modelleri ile yorumlanmalıdır
Tipik Kullanım Süresi	Kısa (dakikalar)	Orta (dakikalar)	Uzun (dakika-saat arası olabilir)

Kaynak: (Wang, 2006) (Katz & Willner, 2003) (Bard & Faulkner, 2001).

Ölçüm Sistemleri: Optik, Spektrometre, Potansiyostat

SPR tabanlı elektrokimyasal sensör sistemlerinde, ölçüm düzeneği hem optik hem de elektrokimyasal bileşenlerden oluşur. Bu sistemlerin işlevsel bütünlüğü, sensörün sinyal üretme kapasitesini ve doğruluğunu belirleyen önemli bir faktördür.

Optik sistem, metal katmandan yansıyan ışığın yoğunluğundaki değişiklikleri izlemek için genellikle tek renkli bir ışık kaynağı (çoğunlukla bir lazer) kullanır. Bu değişiklikler, yüzeye bağlı biyomoleküllerin neden olduğu kırılma indisindeki farklılıkları yansıtır. Yüzey plazmon rezonans (SPR) eğrisi, yansımanın dalga boyu veya açıya göre taranmasıyla elde edilir. Bu tarama iki ana yöntemle gerçekleştirilir: dalga boyu çözünürlüklü SPR veya açısal çözünürlüklü SPR. Lazerin yönü ve dedektör açısı bu süreçte kritik bir rol oynar (Homola, 2006).

Spektrometre, yansıyan ışığın yoğunluğunu dalga boyuna göre analiz ederek rezonans minimumunu belirler. Bu minimumun konumu,

yüzeyde meydana gelen biyokimyasal etkileşimlere bağlı olarak değişir. Bu şekilde, analit-biyoreseptör bağlanması gibi olaylar optik sinyale dönüştürülür (Matsubara et al., 2009).

Potansiyostat, üç elektrotlu sisteme uygulanan voltajı kontrol eder ve bu voltaj altında üretilen akımı hassas bir şekilde ölçer. CV, CA ve EIS gibi elektrokimyasal tekniklere olanak tanır. Elektrokimyasal sinyallerin optik SPR sinyalleriyle birlikte analiz edilmesi, sensörün kapsamlı karakterizasyonunu sağlar (Szunerits & Boukherroub, 2012).

Bu entegre ölçüm sistemleri, hem yüzeydeki moleküler etkileşimlerin hem de elektrokimyasal tepkilerin eş zamanlı olarak değerlendirilmesini sağlayarak sensör platformunun genel performansını artırır.

Mikroakışkan Sistemlerle Entegrasyon Potansiyeli

Elektrokimyasal SPR sensörlerinin işlevselliğini artırmak için mikroakışkan sistemlerle entegrasyon, modern biyosensör teknolojilerinde önemli bir trend haline gelmiştir. Mikroakışkan kanallar, analit çözeltisinin sensör yüzeyine kontrollü bir şekilde yönlendirilmesini sağlayarak analiz süresini kısaltır, reaksiyon verimliliğini artırır ve reaktif tüketimini en aza indirir (Pires ve ark., 2016).

Bu hibrit sensör platformlarında, yüzey plazmon rezonansı ve elektrokimyasal sinyaller, optik prizma ile entegre edilmiş mikroyapılı altın yüzeyler, grafen levhalar veya altın nanonokta dizileri gibi nanomalzemeler tarafından eş zamanlı olarak yükseltilebilir. Bu yapıların oluşturduğu yüzey alanı ve elektrik alan yoğunluğundaki yerel artış, biyoreseptör-analit etkileşimlerinin daha hassas bir şekilde tespit edilmesini sağlar (Liu ve ark., 2018).

Ayrıca, bu sistemlerde yaygın olarak kullanılan PDMS (polidimetilsiloksan) bazlı mikroakışkan çipler, esneklikleri, biyouyumlulukları ve optik şeffaflıkları sayesinde SPR ölçüm sistemleriyle yüksek uyumluluk sunar. Bu yapı, sensörlerin taşınabilir, yeniden kullanılabilir ve düşük maliyetli hale getirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır (Tadepalli ve diğerleri, 2019).

PERFORMANS KRİTERLERİ

Bir sensör sisteminin analitik performansı birden fazla metrik üzerinden değerlendirilir. Bu metrikler, hem optik hem de elektrokimyasal bileşenlerin etkinliğini göstermek için kritik öneme sahiptir.

Hassasiyet: Bu, sensörün kırıлма indisindeki değişikliklere verdiği tepkiyi ifade eder. Genellikle rezonans açısındaki bir kayma ($^{\circ}$ /RIU) veya dalga boyundaki bir değişiklik (nm/RIU) olarak hesaplanır. Yüksek

hassasiyet, küçük değişikliklerin bile güvenilir bir şekilde tespit edilmesini sağlar (Zhao ve ark., 2021).

Tespit Sınırı (LOD): Bu, sensörün ölçebileceği en düşük analit konsantrasyonunu ifade eder. Genellikle " $LOD = 3\sigma/S$ " formülü kullanılır; burada σ , boş numuneden kaynaklanan sinyal dalgalanması ve S, sistemin hassasiyetidir (Chen ve ark., 2020). Düşük bir LOD değeri, yüksek hassasiyeti gösterir.

Liyakat Göstergesi (FOM): Bu, sensör performansının bütünsel bir göstergesidir. Optik SPR sistemlerinde FOM genellikle "Hassasiyet/Rezonans Eğrisi Genişliği (FWHM)" olarak tanımlanır. Daha yüksek bir FOM değeri, hem güçlü sinyal üretimi hem de dar bir spektral tepki sayesinde daha net bir ölçüm anlamına gelir (Li vd., 2021).

Optik ve Elektrokimyasal Sinyal Korelasyonu: Hibrit sensör sistemlerinde, optik (örneğin, rezonans açısı kayması) ve elektrokimyasal (örneğin, amperometrik akım, empedans değişimi) sinyaller aynı anda analiz edilir. Bu çok modlu yaklaşım sayesinde, örneğin birleşme bölgesinde meydana gelen bağlanma olayları hem kolorimetrik değişimler hem de amperometrik akım tepkileriyle doğrulanabilir. Bu, sensörün doğruluğunu, özgüllüğünü ve güvenilirliğini artırır (Wang vd., 2023).

Hassasiyet Ölçüsü ve Etkileyen Faktörler

Sensör performansını değerlendiren temel ölçütlerden biri olan hassasiyet, genellikle kırılma indisindeki (RIU) bir değişime karşılık gelen sinyal tepkisi miktarı olarak tanımlanır. SPR tabanlı sensörlerde bu, rezonans açısındaki bir kayma ($^{\circ}/RIU$) veya rezonans dalga boyundaki bir değişim (nm/RIU) olarak ifade edilir. Hassasiyet, metal yüzeyin morfolojisi, nanoyapıların türü, optik cihazın geometrisi ve biyoreseptör immobilizasyonunun etkinliği dahil olmak üzere birçok faktörden etkilenir (Zhao ve ark., 2019).

Tepki Sınırı (LOD) Hesaplamaları

Tespit sınırı (LOD), sensörün güvenilir bir şekilde ayırt edebileceği en düşük analit konsantrasyonunu temsil eder. Genellikle " $LOD = 3\sigma/S$ " formülüyle hesaplanır; burada σ , boş ölçümdeki sinyal sapmasını, S ise hassasiyeti ifade eder. LOD, sensörün optik veya elektrokimyasal yapısının yanı sıra ortam gürültüsüne, sensör yüzey kararlılığına ve analiz edilen numunenin matrisine de bağlıdır (Chen ve ark., 2020).

Başarı Göstergesi (FOM): Birleşik Performans Göstergesi

Başarı Göstergesi (FOM), sensörün genel performansını tanımlamak için kullanılan birleşik bir metriktir. Optik SPR sistemlerinde genellikle " $FOM = \text{Hassasiyet} / \text{Rezonans eğrisi yarı maksimum genişliği (FWHM)}$ " olarak hesaplanır. Yüksek FOM, keskin ve belirgin bir rezonans eğrisiyle birlikte güçlü bir sinyal tepkisini gösterir. Elektrokimyasal sistemlerde FOM,

sinyal-gürültü oranı ve hassasiyet veya empedans değişimi gibi metriklerin birleştirilmesiyle tanımlanabilir (Li ve ark., 2021).

Optik ve Elektrokimyasal Sinyallerin Korelasyonu

Hibrit sensör platformlarında, optik (örneğin SPR veya absorbands) ve elektrokimyasal (örneğin amperometrik veya empedans) sinyallerin birlikte izlenmesi, sistemin analitik gücünü önemli ölçüde artırır. Bu korelasyon, aynı yüzeyde meydana gelen biyolojik etkileşimlerin farklı fiziksel çıktılarla izlenmesini sağlar. Optik rezonans açısı kaymaları, amperometrik akım değişimleri ve bağlantı noktalarındaki kolorimetri gibi sinyallerin karşılaştırılması hem doğrulama sağlayabilir hem de sinyal doğruluğunu artırabilir (Wang ve ark., 2017). Bu çok modlu analiz yaklaşımı, özellikle düşük konsantrasyonlardaki analitlerin güvenilir bir şekilde tespiti için önemli avantajlar sunar.

Gerçek Zamanlı, Geri Dönüştürülebilirlik ve Yeniden Kullanılabilirlik

SPR tabanlı elektrokimyasal biyosensörlerin performansı, yalnızca yüksek hassasiyet ve özgüllük gibi temel kriterlerle değil, aynı zamanda gerçek zamanlı ölçüm kabiliyeti, geri dönüştürülebilirlik ve yeniden kullanılabilirlik potansiyeliyle de değerlendirilir. Bu kriterler, özellikle klinik tanı, çevresel izleme ve gıda güvenliği gibi uygulama alanlarında cihazın pratik değerini doğrudan etkiler (Li vd., 2021).

Gerçek Zamanlı

Gerçek zamanlı analiz, hedef biyomoleküllerin bağlanma kinetiğini ve dinamik etkileşimlerini anında izleme olanağı sunar. SPR sensörlerinin optik sinyaliyle birlikte elde edilen eş zamanlı elektrokimyasal veriler, analit-reseptör etkileşimlerinin kinetik parametrelerinin ayrıntılı analizine olanak tanır. Bu, yalnızca bağlanmanın varlığını değil, aynı zamanda hızı ve ayrışma eğilimini de gösterir (Park vd., 2022). Gerçek zamanlı veri akışı, özellikle düşük konsantrasyonlarda biyobelirteçlerin hızlı ve güvenilir bir şekilde tespit edilmesine katkıda bulunur. Ek olarak, multimodal sinyal analizi yanlış pozitifleri azaltarak ölçüm doğruluğunu artırır (Liu vd., 2020).

Geri Dönüşüm

SPR sensör yüzeylerinin geri dönüşümü hem maliyetleri düşürmek hem de çevresel sürdürülebilirliği sağlamak açısından önemlidir. Kullanımdan sonra sensör yüzeyinden biyomoleküllerin kontrollü olarak uzaklaştırılması için çeşitli teknikler geliştirilmiştir. Bu yöntemler şunlardır:

- Kimyasal yıkama (asidik veya bazik tamponlar),
- Elektrokimyasal desorpsiyon (potansiyel uygulamaları olan protein giderimi),
- Enzimatik temizleme (proteazlarla yüzeyden protein giderimi) (Zhao vd., 2021).

Ancak, bu işlemler sırasında yüzeyin yapısal bütünlüğünün korunması, optik özelliklerinin ve biyoreseptör bağlama kapasitesinin korunması kritik öneme sahiptir. Aksi takdirde, sensör performansı düşebilir (Zhang vd., 2019).

Yeniden Kullanılabilirlik

Sensörlerin yeniden kullanılabilirliği, özellikle sürekli analiz gerektiren uygulamalarda operasyonel verimliliği artırır. Bu amaçla, sensör yüzeyinde dayanıklı, kovalent bağlara sahip biyoreseptör immobilizasyon teknikleri tercih edilmelidir. Ayrıca, yüzeyin kirlenme önleyici özellikleri istenmeyen protein birikimini önleyerek uzun süreli ve güvenilir kullanım sağlar (Wang ve ark., 2021).

Yeniden kullanım sırasında sensör performansının değişip değişmediğini değerlendirmek için hassasiyet, LOD ve sinyal kararlılığı gibi metrikler düzenli olarak izlenmeli ve gerekirse yeniden kalibre edilmelidir. Bu bağlamda, yüzey karakterizasyonu (örneğin AFM, SEM, EIS) da düzenli olarak yapılmalıdır (Lim ve ark., 2020).

UYGULAMA ALANLARI

Klinik Tanı Amaçlı Kullanım: Biyosensör sistemleri, troponin, antikor-antijen kompleksleri, DNA ve miRNA gibi biyolojik hedef moleküllerin seçici ve hassas şekilde tespit edilmesini mümkün kılar. Bu tür biyobelirteçlerin doğru bir biçimde ölçülebilmesi, birçok hastalığın erken tanısı ve tedavi sürecinin takibi açısından büyük önem taşır (Li et al., 2020).

Çevresel Gözlem ve Kirlilik Tespiti: Optik ve amperometrik algılama yöntemleri, çevresel kirleticilerin (örneğin, kurşun (Pb^{2+}), cıva (Hg^{2+}) ve çeşitli pestisitler) kantitatif olarak belirlenmesinde etkin şekilde kullanılabilir. Bu sistemler, çevre sağlığı açısından risk oluşturan maddelerin düşük konsantrasyonlarda bile saptanmasına olanak tanır (Wang & Liu, 2021).

Gıda Güvenliğinin Sağlanması: Gıdalarda bulunabilecek aflatoksinler ve çeşitli patojen organizmalar gibi zararlı ajanların, herhangi bir işaretleyici maddeye ihtiyaç duymadan (label-free yöntemlerle) analiz edilmesi mümkündür. Bu tür sistemler, özellikle düşük düzeyde bulunan kirleticilerin hassas biçimde saptanmasına katkı sağlar (Zhou et al., 2019).

Klinik Tanı: Kan Proteinleri, COVID-19 ve miRNA Tayini

Klinik tanı uygulamalarında, troponin, antijen-antikor kompleksleri, DNA ve mikroRNA gibi biyomolekülleri yüksek seçicilikle tespit etmek mümkündür. Bu biyobelirteçlerin ölçümü, kardiyovasküler hastalıklar, viral

enfeksiyonlar (örneğin COVID-19) ve kanser gibi birçok hastalığın erken teşhisi ve takibi için önemlidir (Li vd., 2020; Mavrikou vd., 2021).

Çevresel İzleme: Ağır Metaller, Pestisitler, Endokrin Bozucular

Çevresel izlemede, optik veya amperometrik sensör teknolojileri kullanılarak kurşun (Pb^{2+}) ve cıva (Hg^{2+}) gibi ağır metallerin yanı sıra pestisitler ve hormonlar gibi kirleticilerin kantitatif analizi mümkündür. Bu yöntemler, çevre sağlığını tehdit eden kirleticilerin düşük seviyelerde bile tespit edilmesini sağlar (Wang ve Liu, 2021; Gao ve ark., 2022).

Gıda Güvenliği: Aflatoksin, Salmonella ve Listeria Tespiti

Aflatoksin gibi mikotoksinlerin ve Salmonella ve Listeria gibi patojenik mikroorganizmaların tespiti, gıda güvenliği denetimlerinde büyük önem taşır. Bu analizler genellikle etiketsizdir ve düşük konsantrasyonlardaki kirleticilerin bile yüksek hassasiyetle tespit edilmesini sağlar (Zhou ve ark., 2019; Ranjbar ve ark., 2021).

İlaç Etkileşimleri ve Farmakokinetik İzleme

Elektrokimyasal ve Yüzey Plazmon Rezonans (SPR) tabanlı biyosensör teknolojileri, etiketleme gerektirmeden ilaçların biyolojik moleküllerle etkileşimlerini gerçek zamanlı olarak izleme kapasitesine sahiptir. Bu özellik, ilaç geliştirme ve keşfinde moleküler bağlanma kinetiği ve afinite parametrelerinin doğru bir şekilde analiz edilmesini sağlar (Rich ve Myszka, 2007).

Farmakokinetik değerlendirmeler için bu sensörler, plazma, serum veya hücre kültürü ortamlarındaki ilaç konsantrasyonlarını anında izleyebilir. Bu, doz ayarlaması, toksisite analizi ve kişiselleştirilmiş tedavi gibi klinik uygulamalar için hayati bilgiler sağlar (Wang ve ark., 2020). Ayrıca, optik ve elektrokimyasal sinyallerin birleşik analizi, ilaç bağlanma süreçleri sırasında meydana gelen konformasyonel değişikliklerin daha hassas bir şekilde tespit edilmesine katkıda bulunur.

Ayrıca, ilaçlar ve metabolitleriyle etkileşime giren proteinler gibi ikincil hedefler de aynı sensör platformları kullanılarak analiz edilebilir. Bu, çok parametrelili farmakolojik çalışmalara olanak tanır (Liu ve ark., 2019).

Hücre Tabanlı Sensörler ve Canlı İzleme Uygulamaları

Hücre tabanlı elektrokimyasal SPR sensörleri, canlı hücrelerin dinamik davranışlarının ve hücre-mikroçevre etkileşimlerinin invaziv olmayan, gerçek zamanlı izlenmesini sağlar. Bu sistemler, hücre zarı boyunca reseptör-ligand bağlanmasını, hücresel metabolik değişimleri ve sinyal iletim süreçlerini hem elektriksel hem de optik sinyaller aracılığıyla izlemeyi mümkün kılar (Deng ve ark., 2017).

Bu sensör teknolojisi, toksikolojik değerlendirmeler, ilaç etkinliği testleri ve hücre göçü gibi biyomedikal araştırmalarda yaygın olarak

kullanılmaktadır. Ayrıca, mikroakışkan sistemlerle entegre edildiğinde hücrelerin kontrollü koşullar altında analiz edilmesine olanak tanır (Ahmed ve ark., 2018).

Hücre tabanlı sensörlerin temel avantajlarından biri, hücre fonksiyonlarını uzun süreler boyunca kesintisiz izleme yeteneğidir. Bu da onları klinik tanı, ilaç keşfi ve biyomedikal Ar-Ge süreçleri için değerli bir araç haline getirir (Homola, 2008).

YENİ EĞİLİMLER ve HİBRİT YAKLAŞIMLAR

Lokalize Yüzey Plazmon Rezonansı (LSPR): Nanopartiküllerin yüzeyinde meydana gelen lokal plazmonik etkiler sayesinde, elektromanyetik alan yoğunluğu belirli noktalarda yoğunlaşır. Bu lokal alan iyileştirmesi, sensörlerin optik çözünürlüğünü ve algılama hassasiyetini önemli ölçüde artırır. Bu yaklaşım, özellikle düşük konsantrasyonlardaki biyomoleküllerin seçici tespiti için kritik bir avantaj sağlar (Fotonic Sensors, 2024).

Opto-elektrokimyasal Sistemler: Yüzey plazmon polaritonları (SPP) tarafından üretilen yüksek enerjili (sıcak) elektronlar kullanılarak elektrokatalitik reaksiyon hızları artırılabilir. Hem optik hem de elektrokimyasal sinyallerin eş zamanlı olarak izlenmesiyle, moleküler etkileşimler daha kapsamlı bir şekilde analiz edilebilir. Bu tür hibrit sistemler, enerji dönüşümünden biyosensör uygulamalarına kadar çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır (Farid et al., 2023).

Mikroakışkan Entegrasyonu: Mikrokanal sistemleri, küçük numune hacimleriyle hızlı analiz olanağı sağlar. Bu entegrasyon, sensörlerin taşınabilirliğini artırır ve bakım noktası (POC) uygulamaları için uygun bir altyapı sağlar. Mikroakışkan platformlar, birden fazla analitin eş zamanlı olarak tespit edilmesini sağlayarak biyosensörlerin işlevsel yeteneklerini genişletir (Tavakoli et al., 2022).

Lokalize SPR (LSPR) ile Alan Geliştirme

Lokalize yüzey plazmon rezonansı (LSPR), metal nanopartiküllerin yüzeyinde oluşan lokal elektromanyetik alanların hedef moleküllerle etkileşim sırasında önemli ölçüde artmasına neden olur. Bu lokal alan geliştirme, özellikle düşük yoğunluklu analitlerin tespitinde sensörlerin optik çözünürlüğünü ve hassasiyetini önemli ölçüde artırır. Son yıllarda geliştirilen LSPR tabanlı sensörler, virüs tespiti, biyobelirteç analizi ve çevre kirlenici ölçümleri gibi birçok alanda etkili bir şekilde kullanılmaktadır (Zheng ve ark., 2022; Lewis ve ark., 2021).

Plazmon Pompalı Elektrokataliz ve Enerjik Yük Taşıyıcıları

Opto-elektrokimyasal sensörler, yüzey plazmon polaritonları (SPP) tarafından üretilen yüksek enerjili ("sıcak") elektronları kullanarak elektrokimyasal reaksiyonları daha hızlı ve verimli bir şekilde hızlandırabilir. Bu hibrit yaklaşım, optik ve elektrokimyasal sinyallerin gerçek zamanlı olarak eş zamanlı izlenmesini sağlar. Bu, biyomoleküler bağlanma veya katalitik süreçlerin çok yönlü analizini mümkün kılar. Bu teknoloji, biyosensör geliştirme, enerji dönüşüm sistemleri ve ilaç etkileşimi araştırmaları gibi birçok alanda önemli fırsatlar sunmaktadır (Zhang ve ark., 2021).

Opto-Elektrokimyasal Sensörlerin Yapay Zekâ Tabanlı Analizi

Opto-elektrokimyasal sensör sistemleri, hem optik hem de elektriksel sinyalleri eş zamanlı olarak toplayarak çok boyutlu ve karmaşık veri kümeleri oluşturur. Bu çok yönlü verileri anlamlı bilgilere dönüştürmek, sensör performansını iyileştirmek ve biyolojik süreçleri doğru bir şekilde yorumlamak için çok önemlidir. Bu bağlamda, yapay zeka (AI) ve makine öğrenimi (ML) algoritmaları veri işleme, modelleme ve karar destek süreçlerini geliştirir (Wang vd., 2021).

Çok Modlu Veri Entegrasyonu ve Ön İşleme: Optik ve elektrokimyasal sinyaller farklı zaman dilimlerinde ve veri formatlarında üretildiğinden, bu verilerin doğrudan karşılaştırılması genellikle imkansızdır. AI destekli algoritmalar, gürültü azaltma, anormali tespiti ve özellik çıkarımı gibi işlemleri gerçekleştirmek için bu tür çok modlu verileri birleştirir. Ön işleme teknikleri, özellikle sinyal filtreleme, normalleştirme ve boyut azaltma, analizden önce verilerin yüksek kalitede ve anlamlı olmasını sağlar (Zhang vd., 2020).

Modelleme ve Sınıflandırma Yaklaşımları: Derin öğrenme yöntemleri, özellikle evrimsel sinir ağları (CNN) ve yinelemeli sinir ağları (RNN) gibi yapılar, opto-elektrokimyasal sinyallerdeki karmaşık örüntüleri yüksek doğrulukla tanıyabilir. Bu, sensörlerin farklı analitleri sınıflandırmasına, konsantrasyon seviyelerini tahmin etmesine ve biyolojik tepkilerin dinamik özelliklerini modellemesine olanak tanır (Lee vd., 2022).

Anormallik Tespiti ve Karar Destek Uygulamaları : Yapay zeka tabanlı sistemler, gerçek zamanlı analizler sırasında beklenmedik veya anormal sinyalleri tespit edebilir. Bu, hem sensör hatalarının erken tespit edilmesini sağlar hem de biyolojik sistemlerdeki önemli değişiklikler için erken uyarı mekanizması görevi görür. Ayrıca, bu teknolojiler, kullanıcılara klinik ve çevresel ölçüm sonuçları hakkında anında öneriler sağlayan karar destek sistemleriyle entegre edilebilir (Sun vd., 2023).

Gelecek Beklentileri: Yapay zeka destekli analiz sistemleri, otomatik sensör kalibrasyonu, hata düzeltme algoritmaları ve çevrimiçi parametre optimizasyonu gibi gelişmiş işlevlere olanak tanıyacaktır. Bu, özellikle taşınabilir biyosensörler ve yerinde teşhis (POC) cihazları için teknolojinin daha erişilebilir, güvenilir ve ölçeklenebilir olmasını sağlayacaktır.

Mikroakışkan Sistemlerle Entegre SPR Sensörleri

Mikroakışkan platformların yüzey plazmon rezonans (SPR) tabanlı sensörlerle entegrasyonu, düşük hacimli numunelerin hızlı ve verimli bir şekilde analiz edilmesini sağlar. Mikrokanallar numune tüketimini azaltır ve analiz süresini önemli ölçüde kısaltır. Bu yaklaşım, taşınabilir ve yerinde teşhis (Hasta Başı) cihazlarının geliştirilmesinde özellikle avantajlıdır. Ayrıca, mikroakışkan sistemler, sensör yüzeylerine kontrollü akış sağlayarak biyomoleküler bağlanma kinetiğinin daha hassas bir şekilde izlenmesini sağlar (Tavakoli ve ark., 2022; Sun ve ark., 2023).

Çoklu Analit Sensör Tasarımı ve Çapraz Seçicilik

Modern biyosensör teknolojilerinde, birden fazla analitin eş zamanlı tespiti, klinik tanıdan çevresel izlemeye kadar birçok alanda önem kazanmaktadır. Özellikle karmaşık biyolojik numunelerde, birden fazla hedef molekülü aynı anda tanıyabilen sistemler analiz sürecini hızlandırır ve daha kapsamlı veriler sağlar.

Çoklu Analit Tespiti Yaklaşımları: Bu amaçla geliştirilen yöntemler arasında, sensör yüzeyine farklı biyoreseptörlerin yerleştirildiği mikrodizi yapıları, çok kanallı elektrot sistemleri ve spektral ayırma teknikleri öne çıkmaktadır. Ayrıca, optik ve elektrokimyasal sinyallerin birleşimi, çok modlu veri analizi yoluyla analitlerin daha güvenilir bir şekilde ayrılmasını sağlar (Sun ve ark., 2023).

Çapraz Seçicilik ve Çözüm Stratejileri: Çoklu analit sensörlerinde karşılaşılan temel zorluklardan biri çapraz seçiciliktir. Bu durum, sensörün hedef olmayan moleküllere yanlış bağlanması nedeniyle yanlış pozitif veya negatif sinyallere yol açabilir. Bu sorunu hafifletmek için aşağıdaki stratejiler kullanılmaktadır:

Yüksek oranda spesifik biyoreseptörlerin seçimi: Aptamerler, monoklonal antikorlar veya sentetik tanıma elemanları.

Sensör yüzey mühendisliği: Kirlenme önleyici kaplamalar ve fonksiyonel modifikasyonlar yoluyla istenmeyen bağlanmalar azaltılır.

Yapay Zeka Tabanlı Analizler: Çok değişkenli veri işleme yöntemleri, çapraz reaksiyonları ayırt etmede etkilidir (Lee ve ark., 2022).

Tasarım Hususları: Sensör bileşenlerinin fiziksel olarak ayrılması, sinyal karışmasını önleyerek ölçüm doğruluğunu artırır. Ayrıca, uygun referans

kanallarının yerleştirilmesi sinyal normalizasyonunu kolaylaştırır. Minyatürleştirilmiş çok analitli sensör platformları, mikroakışkan yapılarla entegre edildiğinde, taşınabilir ve düşük maliyetli teşhis sistemleri için güçlü adaylar haline gelir (Tavakoli ve ark., 2022).

SINIRLAMALAR ve GELECEK PERSPEKTİFLERİ

Yüzey plazmon rezonansı (SPR) ve hibrit sensör teknolojileri, yüksek hassasiyet ve çoklu analiz olanakları sunmalarına rağmen bazı temel sınırlamalarla karşı karşıyadır. Bu sınırlamaların aşılması, teknolojiyi daha kararlı, taşınabilir ve klinik kullanıma uygun hale getirecektir.

Spesifik Olmayan Bağlanma ve Kirlenme Önlemleri: Hedef olmayan biyomoleküllerin bağlanması nedeniyle SPR sensör yüzeylerinde istenmeyen sinyal oluşumu meydana gelebilir. Bu durum, özellikle karmaşık biyolojik örneklerde ölçüm doğruluğunu ve güvenilirliği azaltır. Bu nedenle, yüzeylerde kirlenme önleme stratejilerinin uygulanması gereklidir. PEG bazlı kaplamalar, zwitteriyonik moleküller ve grafen oksit gibi yüzey modifikasyonlarının spesifik olmayan etkileşimleri azaltmada etkili olduğu bulunmuştur (Sun ve ark., 2023).

Minyatürleştirme ve Entegrasyon Zorlukları: SPR tabanlı cihazların taşınabilir sistemlere entegre edilmesi, optik bileşenlerin (lensler, prizmalar, dalga kılavuzları) minyatürleştirilmesini gerektirir. Bu durum, özellikle hassas hizalama, sinyal kaybı ve üretim maliyetleri açısından teknik zorluklar ortaya çıkarmaktadır. Mikro-opto-elektro-mekanik sistemler (MOEMS) ve fiber optik SPR çözümleri, bu sorunun üstesinden gelmek için umut vadeden yaklaşımlar arasındadır (Zheng vd., 2022).

Veri İşleme Karmaşıklığı ve Yapay Zeka İhtiyacı: Optik ve elektrokimyasal sinyallerin eş zamanlı olarak toplanması, yüksek hacimli, çok modlu verilerin üretilmesine neden olur. Bu verileri anlamlandırmak için, sinyal ayırma, modelleme ve karar desteği gibi alanlarda yapay zeka destekli algoritmalar giderek daha önemli hale gelmektedir. Ayrıca, bu algoritmalar çapraz girişimin çözümüne ve sensör optimizasyonuna katkıda bulunur (Lee vd., 2022).

Spesifik Olmayan Bağlanma ve Yüzey Pasivasyonu

SPR sensör yüzeylerinde karşılaşılan temel sorunlardan biri, hedef olmayan moleküllerin yüzeye bağlanmasıdır. Bu tür istenmeyen etkileşimler, ölçüm sinyallerinde sapmalara yol açar. Yüzey pasivasyonu için geliştirilen çözümler arasında şunlar gibi stratejiler yer almaktadır:

- Biyoyumlu kaplamalar (örneğin PEG, BSA)
- Süperhidrofilik veya süperhidrofobik yüzey modifikasyonları
- Fonksiyonel polimer katmanları (Sun ve ark., 2023).

Plazmonik Malzeme Kararsızlığı ve Korozyonu

Plazmonik sensörlerde yaygın olarak kullanılan altın (Au) ve gümüş (Ag), SPR sinyallerinin üretilmesini sağlayan temel metaller arasındadır. Ancak, bu metallerin kimyasal kararsızlığı, uzun vadeli ve güvenilir kullanımlarını sınırlar. Özellikle gümüş, oksidasyon ve korozyona karşı hassastır; bu da sensör performansını düşürür ve tekrarlanabilirliği engeller (Wang ve ark., 2021).

Bu sorunları azaltmak için aşağıdaki yöntemler önerilmektedir:

- Alt tabaka koruması: Gümüşe ince altın katmanları uygulanması
- 2D nanomalzemeler: Yüzeyin grafen ve MoS₂ gibi katmanlarla kaplanması
- Kimyasal ortam kontrolü: pH ve iyonik gücün optimize edilmesi

Bu yaklaşımlar, sensörün dayanıklılığını ve işlevsel ömrünü önemli ölçüde artırabilir.

Ölçüm Tekrarlanabilirliği ve Sinyal Gürültüsü

Ölçüm tekrarlanabilirliği, opto-elektrokimyasal sensör sistemlerinde güvenilirlik için temel bir gerekliliktir. Ancak, çeşitli kaynaklardan gelen sinyal gürültüsü analiz doğruluğunu olumsuz etkileyebilir. Bu tür gürültüler, optik bileşenlerdeki dalga boyu kararsızlıklarından, ortam sıcaklığındaki değişikliklerden, elektriksel girişimden ve yüzey bağlanmasındaki düzensizliklerden kaynaklanabilir (Sun vd., 2023). Bu etkiler, sinyalde rastgele dalgalanmalara yol açarak analitik verilerin güvenilirliğini azaltır.

Bu sınırlamaların üstesinden gelmek için geliştirilen başlıca çözümler şunlardır:

- Sensör yüzey standardizasyonu: Fonksiyonel katmanların kontrollü üretimi ve yüzey homojenliğinin sağlanmasıyla bağlanma tekrarlanabilirliği artırılır.
- Otomatik kalibrasyon sistemleri: Zamanla oluşabilecek sistematik kayma önlenir.
- Gelişmiş sinyal işleme teknikleri: Gürültü bastırma algoritmaları, anlamlı sinyallerin ham verilerden ayrılmasına katkıda bulunur.

Yapay zeka destekli analiz: Gürültü profillerini öğrenen makine öğrenimi modelleri, gerçek biyolojik sinyali daha iyi filtreleyebilir (Lee vd., 2022). Ayrıca, deneysel koşulların (sıcaklık, pH, iyonik şiddet) kontrol edilmesi ve birden fazla tekrarlı ölçümün ortalamasının alınması, gürültünün etkisini azaltarak veri kalitesini de artırır.

Minyatürleştirme ve Taşınabilir Sistemlere Geçiş

SPR ve opto-elektrokimyasal sensörlerin klinik ve saha uygulamalarında yaygın olarak benimsenmesi, doğrudan minyatürleştirme yeteneklerine bağlıdır. Ancak, lenslerin, prizma sistemlerinin ve optik elemanların entegre devrelere uyarlanması önemli teknik ve üretim zorlukları ortaya çıkarır.

Bu sorunun üstesinden gelmek için yeni nesil mikro-opto-elektromekanik sistemler (MOEMS), esnek devreler, düşük profilli fiber optik elemanlar ve mikroakışkan kanallar geliştirilmektedir (Tavakoli ve ark., 2022). Ayrıca, yapay zeka ve bulut tabanlı veri analiziyle desteklenen taşınabilir cihazlar, hem yerinde teşhis (POC) hem de sürekli izleme sistemleri için güçlü bir çözüm sunmaktadır.

Yapay Zeka Tabanlı Veri İşleme ve Gelecek Perspektifleri

Optik ve elektrokimyasal sinyallerin eş zamanlı olarak ölçüldüğü sensör sistemlerinde, veri hacmi ve çeşitliliği hızla artmaktadır. Bu durum, geleneksel analiz yöntemlerinin ötesinde bir hesaplama gücü gerektirmektedir. Bu nedenle, yapay zeka (AI) ve makine öğrenimi (ML) yaklaşımları, sensör verilerinin yorumlanmasında vazgeçilmez hale gelmiştir (Lee vd., 2022).

AI, sensör kalibrasyonu, anomali tespiti, sinyal filtreleme, sınıflandırma ve konsantrasyon tahmini gibi birçok alanda uygulama bulmaktadır. Gelecekte, bu algoritmaların donanıma entegre edilmesiyle sensör sistemlerinin çevrimiçi ve otonom olarak çalışabilmesi beklenmektedir. Ayrıca, bulut tabanlı veri paylaşımı ve uzaktan kontrol yetenekleri, taşınabilir biyosensörlerin yaygın kullanımına katkıda bulunacaktır (Sun vd., 2023).

SONUÇ

Surface Plasmon Electrochemistry (SPE), yüzey plazmon rezonansının yüksek duyarlılığını elektrokimyasal ölçümlerin seçiciliğiyle birleştirerek, çok modlu ve yüksek performanslı biyosensör platformları oluşturulmasına olanak tanımaktadır. Bu birleşik yaklaşım, yalnızca moleküler tanımlamada değil; aynı zamanda biyomoleküler etkileşimlerin kinetiği, ilaç takibi, gıda güvenliği, çevresel izleme ve klinik tanı gibi çok çeşitli alanlarda gerçek zamanlı ve doğruluğu yüksek analizler yapılmasını mümkün kılmaktadır.

Gelişen yapay zekâ algoritmaları, mikroakışkan sistemlerle entegrasyon ve miniaturizasyon teknolojileri sayesinde, bu sensörlerin taşınabilir, hızlı ve kullanıcı dostu sistemlere dönüşmesi artık çok daha ulaşılabilir görünmektedir. Bununla birlikte, yüzey kararsızlığı, çapraz

seçicilik ve veri işleme zorlukları gibi bazı teknik sınırlamaların üstesinden gelinmesi hâlinde, Surface Plasmon Electrochemistry tabanlı sensörlerin gelecekte standart tanı sistemlerinin ayrılmaz bir parçası hâline gelmesi beklenmektedir.

REFERANSLAR

1. Grieshaber, D., MacKenzie, R., Vörös, J., & Reimhult, E. (2008). *Electrochemical biosensors - Sensor principles and architectures*. Sensors, 8(3), 1400–1458. <https://doi.org/10.3390/s8031400>
2. Homola, J. (2008). *Surface plasmon resonance sensors for detection of chemical and biological species*. Chemical Reviews, 108(2), 462–493. <https://doi.org/10.1021/cr068107d>
3. Ma, Y., Zhang, Y., Cai, S., Zhang, Y., Wang, S., & Su, H. (2020). *Electrochemical and SPR dual-mode biosensor for highly sensitive detection of biomolecules*. Biosensors and Bioelectronics, 165, 112413. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2020.112413>
4. Rodriguez-Mozaz, S., Marco, M.-P., López de Alda, M. J., & Barceló, D. (2006). *Biosensors for environmental monitoring: A global perspective*. Talanta, 65(2), 291–297. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2004.07.030>
5. Homola, J. (2006). *Surface plasmon resonance based sensors* (Vol. 4). Springer. https://doi.org/10.1007/5346_2005_010
6. Teles, F. R. R., & Fonseca, L. P. (2008). *Trends in DNA biosensors*. Talanta, 77(2), 606–623. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2008.07.024>
7. Turner, A. P. F. (2013). *Biosensors: Sense and sensibility*. Chemical Society Reviews, 42(8), 3184–3196. <https://doi.org/10.1039/C3CS35528D>
8. Wang, J. (2006). *Electrochemical biosensors: Towards point-of-care cancer diagnostics*. Biosensors and Bioelectronics, 21(10), 1887–1892. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2005.10.027>
9. Kretschmann, E., & Raether, H. (1968). Radiative decay of non-radiative surface plasmons excited by light. Zeitschrift für Naturforschung A, 23(12), 2135–2136.
10. Liedberg, B., Nylander, C., & Lundström, I. (1983). Surface plasmon resonance for gas detection and biosensing. Sensors and Actuators, 4, 299–304.
11. Ritchie, R. H. (1957). Plasma losses by fast electrons in thin films. Physical Review, 106(5), 874–881. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.106.874>
12. Zhao, Y., Wang, L., & Huang, J. (2021). Artificial intelligence-based SPR data analysis for biomedical applications. Sensors, 21(14), 4651. <https://doi.org/10.3390/s21144651>
13. Nguyen, H. H., Park, J., Kang, S., & Kim, M. (2020). Surface plasmon resonance: A versatile technique for real-time biosensing applications. Sensors, 20(21), 6581. <https://doi.org/10.3390/s20216581>
14. Rich, R. L., & Myska, D. G. (2007). Higher-throughput, label-free, real-time molecular interaction analysis. Analytical Biochemistry, 361(1), 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.ab.2006.12.015>

15. Bard, A. J., & Faulkner, L. R. (2001). *Electrochemical methods: Fundamentals and applications* (2nd ed.). Wiley.
16. Ronkainen, N. J., Halsall, H. B., & Heineman, W. R. (2010). Electrochemical biosensors. *Chemical Society Reviews*, 39(5), 1747–1763. <https://doi.org/10.1039/B714449K>
17. Maier, S. A. (2007). *Plasmonics: Fundamentals and applications*. Springer.
18. Brongersma, M. L., Halas, N. J., & Nordlander, P. (2015). Plasmon-induced hot carrier science and technology. *Nature Nanotechnology*, 10(1), 25–34. <https://doi.org/10.1038/nnano.2014.311>
19. Zhan, C., Chen, X. J., Yi, J., et al. (2018). From plasmon-enhanced molecular spectroscopy to plasmon-mediated chemical reactions. *Nature Reviews Chemistry*, 2, 216–230. <https://doi.org/10.1038/s41570-018-0027-z>
20. Raether, H. (1988). *Surface plasmons on smooth and rough surfaces and on gratings*. Springer.
21. Homola, J., Yee, S. S., & Gauglitz, G. (1999). Surface plasmon resonance sensors: Review. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 54(1–2), 3–15. [https://doi.org/10.1016/S0925-4005\(98\)00321-9](https://doi.org/10.1016/S0925-4005(98)00321-9)
22. Rich, R. L., & Myszka, D. G. (2007). Survey of the year 2006 commercial optical biosensor literature. *Journal of Molecular Recognition*, 20(5), 300–366. <https://doi.org/10.1002/jmr.837>
23. Schasfoort, R. B. M. (Ed.). (2017). *Handbook of surface plasmon resonance* (2nd ed.). Royal Society of Chemistry.
24. Clavero, C. (2014). Plasmon-induced hot-electron generation at nanoparticle/metal-oxide interfaces for photovoltaic and photocatalytic devices. *Nature Photonics*, 8(2), 95–103. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2013.238>
25. Kang, T., Yoo, S. M., Yoon, I., Lee, S. Y., & Kim, B. (2018). Recent advances in surface plasmon resonance-based nanobiosensors. *Nanomaterials*, 9(2), 264. <https://doi.org/10.3390/nano9020264>
26. Zhao, Y., Zhang, Q., & Ma, H. (2019). Surface plasmon-enhanced electrochemistry: Concepts, applications, and future directions. *ACS Sensors*, 4(6), 1472–1483. <https://doi.org/10.1021/acssensors.9b00447>
27. Deng, Q., Li, X., Wang, M., & Yang, F. (2017). Surface modification strategies for enhancing the sensitivity of SPR biosensors. *Biosensors and Bioelectronics*, 94, 117–124. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2017.02.034>
28. Ahmed, S. R., Kim, J., Suzuki, T., Lee, J., Park, E. Y. (2018). Electrochemical biosensor based on gold nanoparticles. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 265, 382–389. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.03.112>
29. Rosi, N. L., & Mirkin, C. A. (2005). Nanostructures in biodiagnostics. *Chemical Reviews*, 105(4), 1547–1562. <https://doi.org/10.1021/cr030067f>
30. Liu, Y., Tuleouva, N., Ramanculov, E., & Revzin, A. (2019). Aptamer-based electrochemical biosensor for interferon gamma detection. *Analytical Chemistry*, 91(19), 8131–8136. <https://doi.org/10.1021/acs.100938r>
31. Katz, E., & Willner, I. (2003). Probing biomolecular interactions at conductive and semiconductive surfaces by impedance spectroscopy: Routes to electrochemical biosensors. *Electroanalysis*, 15(11), 913–947. <https://doi.org/10.1002/elan.200390113>
32. Wang, J. (2006). *Analytical electrochemistry* (3rd ed.). Wiley-VCH.
33. Matsubara, K., Kawata, Y., & Minami, S. (2009). Surface plasmon resonance sensor using a collimated beam and spectrometer. *Sensors and*

- Actuators B: Chemical, 139(1), 54–59.
<https://doi.org/10.1016/j.snb.2008.09.029>
34. Szunerits, S., & Boukherroub, R. (2012). Sensing using localised surface plasmon resonance sensors. *Chemical Communications*, 48(74), 8999–9010.
<https://doi.org/10.1039/c2cc33898a>
35. Liu, B., Wang, Y., Yang, H., & Wang, S. (2018). Microfluidics-based localized surface plasmon resonance biosensors: A review. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 265, 698–705.
<https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.03.008>
36. Pires, N. M. M., Dong, T., Hanke, U., & Hoivik, N. (2016). Recent developments in optical detection technologies in lab-on-a-chip devices for biosensing applications. *Sensors*, 14(8), 15458–15479.
<https://doi.org/10.3390/s140815458>
37. Tadepalli, S., Slocik, J. M., Gupta, M. K., Naik, R. R., & Singamaneni, S. (2019). Recent advances in plasmonic nanostructures for biosensing and bioimaging. *ACS Applied Nano Materials*, 2(1), 1–20.
<https://doi.org/10.1021/acsanm.8b01658>
38. Zhao, Y., Liu, Y., & Zhang, Y. (2021). Recent advances in high-sensitivity SPR biosensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 329, 129198.
<https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.129198>
39. Chen, Y., Pu, H., & Xu, Y. (2020). Dual-mode biosensors combining surface plasmon resonance and electrochemical detection. *Trends in Analytical Chemistry*, 124, 115801. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.115801>
40. Li, H., Song, Y., & Ma, J. (2021). Sensitivity optimization strategies in plasmonic biosensors: A review. *Biosensors and Bioelectronics*, 191, 113438.
<https://doi.org/10.1016/j.bios.2021.113438>
41. Wang, L., Huang, Y., & Xu, Y. (2023). Multimodal biosensors integrating electrochemical and plasmonic detection: Trends and future directions. *Biosensors*, 13(2), 187. <https://doi.org/10.3390/bios13020187>
42. Zhao, Y., Wang, H., & Zhang, Y. (2019). Recent developments in surface plasmon resonance biosensors. *Sensors*, 19(15), 3471.
<https://doi.org/10.3390/s19153471>
43. Wang, J., Wang, C., & Bao, Y. (2017). A hybrid optical-electrochemical biosensor based on SPR and impedance spectroscopy for ultra-sensitive biomolecular detection. *Biosensors*, 7(4), 57.
<https://doi.org/10.3390/bios7040057>
44. Li, X., Cao, Z., & Liu, X. (2020). Recent advances in biosensors for clinical diagnostics. *Biosensors and Bioelectronics*, 170, 112636.
<https://doi.org/10.1016/j.bios.2020.112636>
45. Wang, Y., & Liu, G. (2021). Environmental monitoring using advanced biosensor systems. *Sensors*, 21(3), 867. <https://doi.org/10.3390/s21030867>
46. Zhou, Y., Zhang, Y., & Yang, M. (2019). Label-free detection technologies in food safety assessment. *Food Chemistry*, 301, 125258.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125258>
47. Gao, S., Li, H., Zhang, Y., & Wang, Y. (2022). Recent developments in environmental pollutant detection using biosensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 352, 131092. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.131092>
48. Mavrikou, S., Moschopoulou, G., Tsekouras, V., Kintzios, S., & Katerinopoulos, H. E. (2021). Development of a portable biosensor system for

- rapid COVID-19 screening. *Scientific Reports*, 11(1), 4882. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84175-9>
49. Ranjbar, S., Nejad, M. A. F., & Hashemi, M. (2021). Label-free biosensing methods for foodborne pathogen detection. *Food Analytical Methods*, 14, 2849–2863. <https://doi.org/10.1007/s12161-021-02027-y>
 50. Ahmed, M. U., Saaem, I., Wu, P. C., & Brown, A. S. (2018). Microfluidics integrated biosensors for point-of-care testing. *Biosensors*, 8(3), 94. <https://doi.org/10.3390/bios8030094>
 51. Deng, Y., Wang, Y., & Chen, Y. (2017). Real-time monitoring of cell behaviors using label-free biosensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 240, 1225–1233. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.09.102>
 52. Liu, Y., Zhang, Y., Wu, X., & Li, M. (2019). Recent advances in label-free biosensors for drug discovery. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 118, 48–61. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.04.015>
 53. Wang, C., Wang, J., Li, Y., & Su, X. (2020). Recent advances in biosensors for real-time monitoring of drug pharmacokinetics. *Biosensors and Bioelectronics*, 168, 112553. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2020.112553>
 54. Photonic Sensors (2024). Review of fiber-optic localized surface plasmon resonance sensors: geometries, fabrication, and bio-applications. *Photonic Sensors*, 14, 240202. <https://doi.org/...>
 55. Farid, S., Ghosh, S., Dutta, M., & Strosio, M. A. (2023). Aptamer-based optical and electrochemical sensors: A review. *Chemosensors*, 11(12), 569. <https://doi.org/10.3390/chemosensors11120569>
 56. Tavakoli, H., Mohammadi, S., Li, X., & Fu, G. (2022). Microfluidic platforms integrated with nanosensors for point-of-care bioanalysis. *Trends in Analytical Chemistry*, 157, 116806. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2022.116806>
 57. Lewis, D., Cennamo, N., & Massarotti, D. (2021). LSPR-based biosensors for COVID-19 diagnostics. *Biosensors*, 11(6), 213. <https://doi.org/10.3390/bios11060213>
 58. Zhang, Y., Zhang, L., & Wang, P. (2021). Plasmon-driven optoelectrochemical biosensing: Fundamentals and applications. *Chemical Society Reviews*, 50(5), 2920–2953. <https://doi.org/10.1039/D0CS00839D>
 59. Zheng, Y., Bian, S., Sun, J., Wen, L., Rong, G., & Sawan, M. (2022). Label-free LSPR–vertical microcavity biosensor for on-site SARS-CoV-2 detection. *Biosensors*, 12(3), 151. <https://doi.org/10.3390/bios12030151>
 60. Lee, J., Kim, D., & Park, S. (2022). Deep learning-based signal classification in optoelectrochemical biosensors. *Biosensors and Bioelectronics*, 204, 114089. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2022.114089>
 61. Sun, Y., Yang, M., & Li, H. (2023). Artificial intelligence in point-of-care biosensing: From data processing to autonomous decision-making. *Biosensors*, 13(2), 176. <https://doi.org/10.3390/bios13020176>
 62. Zhang, H., Wu, X., & Zhao, Q. (2020). Multi-modal data fusion for biosensor signal processing using machine learning techniques. *Sensors*, 20(23), 6914. <https://doi.org/10.3390/s20236914>

Lotka-Volterra Sisteminin Asimptotik Kararlılık Analizi

Muhammet ATEŞ^{1*}

Muzaffer ATEŞ²

¹Department of Electronics and Automation Van Vocational School of Higher Education, Van Yüzüncü Yıl University, Van, 65080, Turkey

²Department of Electrical Engineering, Van Yüzüncü Yıl University, Van, 65080, Turkey

^{*}(mts@yyu.edu.tr)

ÖZET

Lotka–Volterra sistemi (yırtıcı–av modeli), ekolojide iki tür arasındaki biyotik etkileşimi modellemek amacıyla geliştirilen, doğrusal olmayan diferansiyel denklemlerden oluşan klasik bir sistemdir. Bu modelde av popülasyonu ve yırtıcı popülasyonu arasındaki etkileşim dinamikleri göz önüne alınarak, türlerin zamanla değişen popülasyon yoğunlukları analiz edilir. Sistem, özgün haliyle kapalı bir döngü davranışı sergiler; yani popülasyonlar periyodik olarak artar ve azalır, ancak denge noktasına asimptotik olarak yaklaşmazlar. Bu durum, sistemin Lyapunov anlamında kararlı olmasına rağmen asimptotik kararlı olmadığını göstermektedir. Bu çalışmada, klasik Lotka–Volterra sistemine eklenen sönümleyici terimler aracılığıyla sistemin asimptotik kararlılığı sağlanmıştır. Bu sönüm terimleri, av ve yırtıcı popülasyonlarının büyüme oranlarına negatif geri besleme etkisi oluşturularak sistemin enerjisini zamanla azaltmakta ve böylece çözümlerin denge noktasına spiral biçimde yaklaşmasına olanak tanımaktadır. Elde edilen yeni model, biyolojik gerçekliğe daha uygun, daha kararlı bir yapıya sahiptir ve uzun vadede popülasyonların sabit değerlere ulaşmasını sağlar. Kararlılık analizi Lyapunov’un doğrudan yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde, sistemin enerjisini temsil eden uygun bir Lyapunov fonksiyonu tanımlanmış ve bu fonksiyonun zamanla azaldığı gösterilerek sistemin asimptotik kararlılığı ispat edilmiştir. Söz konusu Lyapunov fonksiyonu, genellikle klasik enerji benzeri terimler içeren ve denge noktasında minimuma ulaşan bir skalar fonksiyondur. Bu analiz sonucunda sistemin, başlangıç koşullarına bağlı olarak, denge noktasına spiral tarzda yakınsadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, yapılan analizler faz düzlemi üzerinde görselleştirilmiş olup enerji seviyelerine karşılık gelen sistem davranışları da detaylı şekilde sunulmuştur. Bu görsel analizler, teorik bulguların doğruluğunu desteklemekte ve modelin dinamik özelliklerini sezgisel olarak kavrama açısından önemli katkılar sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler – Lotka–Volterra Modeli, Asimptotik Kararlılık, Sönüm Terimleri, Faz Düzlemi Analizi, Doğrusal Olmayan Diferansiyel Denklemler.

GİRİŞ

Doğal ekosistemlerdeki türler arası etkileşimlerin modellenmesi, popülasyon biyolojisi ve ekoloji alanlarında temel öneme sahiptir. Özellikle av ve yırtıcı türler arasındaki dinamik ilişkiler, sistemin uzun vadeli dengesi açısından belirleyicidir [1]–[3]. Ancak klasik Lotka–Volterra sistemi, doğrusal olmayan yapısına rağmen çoğu zaman kararsız salınımlar üretmekte ve gerçek biyolojik sistemlerin gözlemleriyle tam örtüşmemektedir. Bu nedenle, modele çeşitli modifikasyonlar getirilerek daha gerçekçi davranışlar elde edilmeye çalışılmıştır [3], [4]. Bunlardan biri de, av ve yırtıcı popülasyonların

kendi içinde artışını sınırlayan sönümleme (damping) terimlerinin eklenmesidir. Bu şekilde oluşturulan sönümlü Lotka–Volterra modeli, sistemin aşırı büyümesini engellemekte ve daha dengeli, biyolojik olarak tutarlı bir yapı sunmaktadır.

Bu çalışmada, söz konusu sönümlü sistemin kararlılık analizi yapılmaktadır. Kararlılık analizi, bir sistemin başlangıç koşullarından bağımsız olarak belirli bir denge noktasına yaklaşıp yaklaşmadığını anlamamıza yardımcı olur. Bu bağlamda en güçlü ve genel analiz araçlarından biri olan Lyapunov’un doğrudan yöntemi kullanılmaktadır. Lyapunov’un doğrudan yöntemi, dinamik sistemlerin kararlılığını incelemeye sistem çözümünün açıkça elde edilmesine gerek kalmadan uygulanabilen oldukça etkili bir yaklaşımdır [5], [6]. Bu yöntemde, sistemin enerji benzeri davranışını yansıtan skaler bir fonksiyon, yani bir Lyapunov fonksiyonu tanımlanır. Bu fonksiyon, sistemin denge noktasında sıfır ve etrafındaki tüm noktalarda pozitif olmalı; sistem boyunca türevi ise negatif olmalıdır. Böylece sistemin enerjisi zamanla azaldığı için yörüngeler dengeye doğru yönelir ve asimptotik kararlılık sağlanmış olur.

Lyapunov yöntemi, özellikle doğrusal olmayan sistemlerin analitik çözümlemesinin zor veya imkânsız olduğu durumlarda çok kıymetlidir [5], [7]. Bu çalışmada kullanılan Lyapunov fonksiyonu ile sönümlü Lotka–Volterra sistemi için analitik olarak kararlılık koşulları belirlenmiş; ardından sayısal simülasyonlarla bu koşulların geçerliliği test edilmiştir. Lyapunov yöntemi aynı zamanda mühendislikte kontrol sistemlerinin tasarımı, ekonomide denge analizleri ve fiziksel sistemlerin enerji davranışlarının modellenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır [5], [8], [9]. Bu yönüyle çalışmanın önemi yalnızca ekoloji ile sınırlı kalmayıp, diğer disiplinlere de genişletilebilir durumdadır. Sonuç olarak, bu çalışmada amaçlanan; sönümlü Lotka–Volterra sisteminin denge davranışını teorik olarak Lyapunov yöntemiyle incelemek, elde edilen sonuçları sayısal olarak test etmek ve böylece modelin uzun vadeli dinamiklerini daha iyi anlayabilmektir.

PRELİMİNARİES

Bir dinamik sistemin denge noktası $x = x^*$ için:

Tanım 1.

- i. Lyapunov kararlılığı: Başlangıç değeri $x(0)$ denge noktasına yeterince yakınsa, çözüm $x(t)$ her zaman bu denge noktasına yakın kalır.

- ii. Asimptotik kararlılık: $t \rightarrow \infty$ giderken $x(t) \rightarrow x^*$ gidiyorsa — yani çözüm dengeye zamanla yaklaşır.

Matematiksel olarak Lyapunov kararlılık kriterleri ise;

Tanım2. Bir Lyapunov fonksiyonu $V(x)$ için

- i. $V(x) > 0$ her $x \neq x^*$ için
- ii. $V(\dot{x}) = 0$
- iii. $\dot{V}(x) < 0$ tüm $x = x^*$ için (Asimptotik Kararlı)

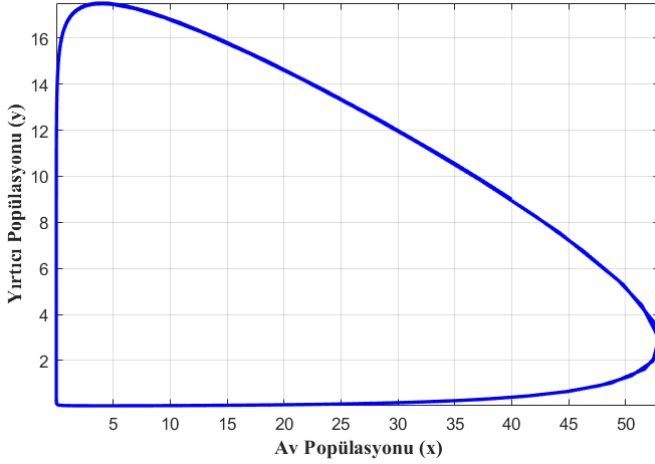
MATERYAL VE YÖNTEM

Lotka–Volterra sistemi, biyolojik popülasyon dinamiklerini modelleyen klasik bir doğrusal olmayan diferansiyel denklem kümesidir. Başka bir deyişle Avcı-av dinamiklerinin Lotka-Volterra modeli, ekolojik sistemlerde avcı popülasyonları ile avları arasındaki etkileşimleri incelemek için kullanılan matematiksel bir denklemdir [10].

Bu sistem iki türü temsil eden denklem sistemi aşağıdaki gibidir.

$$\begin{cases} \dot{x} = x(\alpha - \beta y) \\ \dot{y} = -y(\delta - \eta x) \end{cases} \quad (1)$$

Burada; $x(t)$ Av (ör. tavşan) popülasyonu, $y(t)$ Yırtıcı (ör. tilki) popülasyonu, α Avın doğal üreme oranı, β Yırtıcının avla karşılaşma oranı, δ Yırtıcının doğal ölüm oranı, η Yırtıcıların av tüketimi ile çoğalma oranı temsil etmektedir.



Şekil1. Lotka–Volterra Faz Düzlemi (ode45)

Tanım 1 ve Tanım 2’deki şartlar altında, faz düzleminde sistemin çözüm yörüngeleri kapalı eğriler oluşturur. Bu, sistemin sadece Lyapunov anlamında kararlı olduğunu gösterir, Enerji sabittir; bu nedenle asimptotik kararlılık söz konusu değildir.

Orijinal modelde salınım yapan popülasyonlar asimptotik kararlılığa sahip değildir. Bu çalışmada, modele yoğunluk bağımlı sönüm terimleri eklenerek asimptotik kararlılık kazandırılmıştır. Sisteme negatif geri besleme terimlerinin eklenmesiyle, Eşitlik (1)’den aşağıdaki biçimde değiştirilmiş sistem dinamiği elde edilir:

$$\begin{cases} \dot{x} = x(\alpha - \beta y - \mu x) \\ \dot{y} = -y(\gamma - \delta x - h y) \end{cases} \quad (2)$$

Burada; $\mu > 0$ Av için çevresel taşıma kapasitesi etkisi (sönüm), $h > 0$: Yırtıcı için içsel ölüm oranı artışı (sönüm) temsil etmektedir.

Sönüm terimlerinin eklenen yani denklem sistemi için denge noktası;

$$\begin{cases} \alpha - \beta y - \mu x = 0 \\ -\gamma + \delta x + h y = 0 \end{cases} \Rightarrow (x^*, y^*) = \left(\frac{h\alpha + \beta\gamma}{\beta\delta + \mu h}, \frac{\delta\alpha + \mu\gamma}{\beta\delta + \mu h} \right)$$

Bu denge noktaları yukardaki eşitlikten görüldüğü gibi pozitifdir.

Yeni denge noktaları olan (x^*, y^*) göre eşitlik2 sisteminin enerjisini temsil eden aday Lyapunov fonksiyonu aşağıdaki gibi olsun

$$V(x, y) = (x - x^* - x^* \ln \frac{x}{x^*}) + (y - y^* - y^* \ln \frac{y}{y^*}) \quad (3)$$

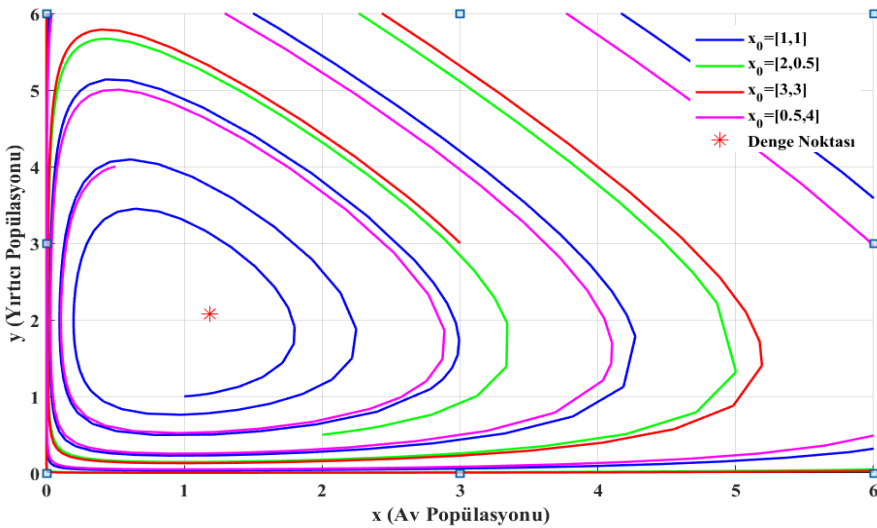
Seçilen aday lyapunov fonksiyonu; Denge noktasında sıfırolup diğer tüm bölgede pozitifdir(yani pozitif tanımlıdır) olduğundan sistem için uygundur.

Lyapunov fonksiyonun zamana göre türevi $\dot{V}(x, y)$ ise;

$$\dot{V} = (1 - \frac{x^*}{x})\dot{x} + (1 - \frac{y^*}{y})\dot{y} \quad (4)$$

Yukardaki eşitlikten denklemin türevinin negatif tanımlı olduğunu göstermektedir. Yani

$\dot{V}(x, y) < 0$ her $(x, y) \neq (x^*, y^*)$ Bu, denge noktası tanım1 ve tanım2 deki şartları sağladığından asimptotik olarak kararlı olduğunu göstermektedir.



Şekil 2. Sönümlü Lotka–Volterra Sistemi Faz Düzlemi

Yukarıdaki grafik, sönümlü Lotka–Volterra sisteminin elde edilen faz düzlemini göstermektedir. Farklı başlangıç koşullarından çıkan tüm yörüngeler spiral şeklinde denge noktasına yaklaşmaktadır. Bu da sistemin asimptotik kararlı olduğunu göstermektedir.

SONUÇLAR

Bu çalışmada, klasik Lotka–Volterra modeline av ve yırtıcı türlerin popülasyonlarını baskılayan sönümlleme terimleri eklenerek elde edilen sönümlü Lotka–Volterra sistemi incelenmiştir. Sistemin denge noktaları belirlenmiş ve Lyapunov doğrudan yöntemine dayalı olarak asimptotik kararlılığı analiz edilmiştir. Yapılan analiz sonucunda aşağıdaki çıkarımlara ulaşılmıştır. Sönümlleme terimlerinin (μ ve h) dahil edilmesi, sistemin doğal salınımlarının zamanla sönümlenmesini sağlayarak, popülasyonların kaotik veya sürekli dalgalanma davranışı sergilemesini engellemiştir. Bu sayede sistem asimptotik kararlı bir hale gelmiştir. Önerilen Lyapunov fonksiyonu ile yapılan kararlılık analizinde, $V(x, y)$ fonksiyonunun tüm pozitif yörüngelerde azalan bir davranış sergilediği gösterilmiş, dolayısıyla sistemin denge noktasına doğru yaklaşan yörüngeler izlediği analitik olarak kanıtlanmıştır. MATLAB ortamında gerçekleştirilen sayısal benzetimler (simülasyonlar), teorik bulgularla tam uyumlu sonuçlar vermiştir. Faz düzlemi grafikleri, başlangıç koşullarından bağımsız olarak tüm yörüngelerin denge noktasına spiral şekilde yaklaştığını açıkça göstermiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Lotka, A. J. (1925). Elements of physical biology. Williams & Wilkins.
- [2] Volterra, V. (1926). Fluctuations in the abundance of a species considered mathematically. *Nature*, 118(2972), 558-560
- [3] Murray, J. D. (2007). *Mathematical biology: I. An introduction* (Vol. 17). Springer Science & Business Media
- [4] Hastings, A. (Ed.). (2013). *Population biology: concepts and models*. Springer Science & Business Media.
- [5] H.K. Khalil, Nonlinear Control. London, UK, Pearson Education (2015).
- [6] La Salle, J., & Lefschetz, S. (2012). Stability by Liapunov's direct method with applications by Joseph L Salle and Solomon Lefschetz (Vol. 4). Elsevier.
- [7] Slotine, J. J. E., & Li, W. (1991). Applied nonlinear control (Vol. 199, No. 1, p. 705). Englewood Cliffs, NJ: Prentice hall.
- [8] Sastry, S. (2013). Nonlinear systems: analysis, stability, and control (Vol. 10). Springer Science & Business Media.
- [9] Gandolfo, G. (2009). Economic Dynamics (4th ed.). Springer Berlin, Heidelberg.
- [10] Edelstein-Keshet, L. (2005). Mathematical models in biology. Society for Industrial and Applied Mathematics.

Elektron Mikroskop Türleri Ve Uygulama Alanları

Cengiz TEMİZ

1- Dr. Öğretim Üyesi.; [Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Alaplı MYO], [Elektronik ve Otomasyon Pr.], [cengiztemiz60@gmail.com], ORCID No: 0000-0002-9265-7485

ÖZET

Bu bölümde mikroskobun tarihçesi kısaca özetlenmiş, mikroskop türleri ve kullanım alanları hakkında bilgi verilmiştir. Işık mikroskopları, elektron mikroskopları, atomik kuvvet mikroskopları ve taramalı tünelleme mikroskoplarının yapısı, çalışma prensipleri ve kullanım örnekleri sunulmuştur. Ayrıca malzeme bilimi, tıp ve biyoloji, elektronik, adli bilimler, kimya, çevre bilimleri, jeoloji, enerji sistemleri ve polimer bilimi gibi alanlardaki uygulamaları açıklanmıştır.

Anahtar Kelimeler – Elektron Mikroskop, Taramalı Elektron Mikroskobu, TEM, AFM, STM, Mikroskop Uygulamaları.

GİRİŞ

Mikroskop kelimesi, Yunanca “mikros” (küçük) ve “skopeo” (görüntülemek) kelimelerinden türetilmiştir [1]. Mikroskop, çıplak gözle görülemeyen nesneleri mikro ve daha sonra nano seviyelerde görebilme ve yorumlama ihtiyacından doğmuştur. Geçmişten günümüze insanlar, kendilerinden uzakta olan şeyleri görme arzusu taşımışlardır. Teknolojik gelişmeler ve bilim dünyasındaki ilerlemeler, bu taleplere ışık tutmuştur [2,3]. İnsan gözüyle görülemeyen mikro dünya için bir başyapıt olarak kabul edilen SEM, günümüzde vazgeçilmez bir cihaz haline gelmiştir. Bu durumu temeli olmayan bir binaya benzetebiliriz. Bir binanın temel olmadan ayakta duramayacağı gibi, mikro bilimi mikroskopsuz anlamak da mümkün değildir [4,5]. Özellikle biyolojik örnekler ve nano yapıları metalurji alanlarında büyütme ve topografya olmadan anlamak zordur. Bu nedenle, tüm mikroskop türleri, neden-sonuç ilişkisi açısından önemli ve gereklidir. Bu gereklilik, tarihsel olarak, ışık kaynağı kullanan optik mikroskopların yetersizliğinden doğmuş ve elektron kaynağı kullanan mikroskopların kullanımını zorunlu kılmıştır [4,6]. Sonuç olarak, çıplak gözle görülemeyecek kadar küçük nesneleri büyüten, onları daha anlaşılır boyutlara getiren ve bu görüntülerin incelenmesini sağlayan bir cihaz icat edilmiş; bu cihaz tarih boyunca geliştirilmiş ve geliştirilmeye devam etmektedir.

TARİHSEL GELİŞİM

Mikroskobun ilk olarak 1590 yılı civarında, Hollandalı Zacharias Janssen tarafından bir teleskop üzerinde yapılan değişikliklerle ortaya çıktığı kabul edilmektedir [7]. Ancak aynı dönemde, bazı Alman, İtalyan, Hollandalı ve İngiliz bilim insanları da teleskoplardaki mercekle sistemini ters çevirerek bir tür mikroskop geliştirmiş ve nesneleri büyütmek için kullanmıştır. Bu nedenle, çeşitli mercekler kullanarak küçük görüntüleri ve detayları görmek amacıyla farklı optik cihazlar geliştirilmiştir [8]. Ünlü İtalyan bilim insanı Galileo Galilei (1564-1642), dünyanın güneş etrafında döndüğünü ilan ettiği için Engizisyon tarafından işkenceye uğramış, Papa tarafından bu iddiasından vazgeçmesi koşuluyla serbest bırakılmıştır. Galileo, bu dönemde iki mercek kullanarak bazı deneyler yapmıştır [9]. Günümüz mikroskobunun temel prensipleri, 17. yüzyılda Hollandalı Anton van Leeuwenhoek ve İngiliz Robert Hooke tarafından keşfedilmiştir [10]. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), ilk kez 1935 yılında Almanya'da Knoll tarafından tasarlanmış, ardından İngiltere, Fransa ve ABD gibi ülkelerin katkılarıyla geliştirilmiştir. 1938 yılında Siemens-Schuckertwerke, ilk ticari elektron mikroskobunu piyasaya sürmüştür. Bu olayın ardından, transmisyon elektron mikroskopları dünya çapında birçok bilim merkezinde erişilebilir hale gelmiştir. Yüzey topografyasını angström seviyesinde ölçebilen tarama uçlu mikroskop olarak bilinen **Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)**, 1986 yılında Binnig, Quate ve Geber tarafından icat edilmiştir [11]. Bir diğer mikroskop türü olan **Taramalı Tünelleme Mikroskobu (STM)** ise 1981 yılında Gerd Binnig ve Heinrich Rohrer tarafından yüzeyleri atomik seviyede görüntülemek amacıyla geliştirilmiş ve bu çalışmalar onlara 1986 yılında Nobel Fizik Ödülü kazandırmıştır [12].

MİKROSKOP TÜRLERİ

Mikroskop türleri dört ana grupta değerlendirilir:

1. *Optik Mikroskoplar*
2. *Elektron Mikroskopları*
3. *Atomik Kuvvet Mikroskopları*
4. *Taramalı Tünelleme Mikroskopları*

Optik mikroskoplar kendi içinde yedi gruba ayrılır:

- Parlak alan mikroskobu
- Karanlık alan mikroskobu
- Ultraviyole mikroskop
- Floresan mikroskop
- Faz kontrast mikroskobu
- Konfokal mikroskop
- Stereoskopik mikroskop

Elektron mikroskopları ise iki grupta incelenir: *taramalı* ve *transmisyon* mikroskopları.

1. Optik (Işık) Mikroskoplar

En yaygın kullanılan ve en basit mikroskop türüdür. Bitkilerin çiçek, yaprak ve diğer yapılarının; böceklerin vücut ve organellerinin; toprak, yem, maden gibi cansız materyallerin incelenmesinde yaygın olarak kullanılır. Işık mikroskobunda büyütme, optik mercek sistemleri aracılığıyla sağlanır. En yaygın kullanılan türleri:

- Parlak alan mikroskobu
- Karanlık alan mikroskobu
- Ultraviyole mikroskop
- Faz kontrast mikroskobu
- Konfokal mikroskop
- Stereoskopik mikroskop

2. Elektron Mikroskopları

Elektron mikroskopları, görüntü oluşturmak için ışık yerine elektronları kullanan mikroskoplardır. Işık mikroskobuna göre birçok avantajı vardır. Işık mikroskobunda ışık kaynağı olarak görünür ışık kullanılırken, elektron mikroskobunda vakum ortamında hızlandırılmış elektron demeti kullanılır. Bilimsel araştırmalarda çok yüksek çözünürlüklü transmisyon elektron mikroskopları (TEM), tarama kuvvet mikroskopları ve taramalı tünelleme mikroskopları da kullanılmaktadır. Daha önceki kitap bölümümüzde taramalı elektron mikroskobu (SEM) ayrıntılı olarak açıklanmıştı; bu bölümde ise diğer mikroskop türleri ve kullanım alanlarına değinilecektir. Ayrıca bu bölümde, elektron mikroskopları ile optik mikroskoplar arasındaki farklar **Tablo 1**'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 1. Optik ve Elektron Mikroskop farkları

	Işık Mikroskobu	Elektron Mikroskobu
Aydınlatma Kaynağı	Görünür ışınlar ($\lambda=550\text{nm}$)	Elektron demeti ($\lambda=0.005\text{ nm}$)
Çözünürlük	0.25 μm	0.05nm
Max Büyütme	1500X	1000000 X

3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Taramalı Elektron Mikroskopisi, günümüzde mikro yapı analizlerinde en çok tercih edilen yöntemdir. Bu yöntemde, yüksek voltajla (0–30 kV) hızlandırılmış elektronlar numune üzerine odaklanır. Odaklanmış elektron demeti yüzeyi tararken, elektronlar numunedeki atomlarla etkileşir. Bu etkileşim sonucu oluşan elektronlar ve X-ışınları detektörler tarafından toplanır. Detektöre ulaşan bu sinyaller dijital sinyallere dönüştürülerek bilgisayar ekranına aktarılır. Ekranda elde edilen görüntü, numunenin mikro yapısını topografik olarak gösterir ve bilgi sağlar.



Şekil 1: Taramalı Elektron Mikroskobu (ZBEÜ – ARTMER)

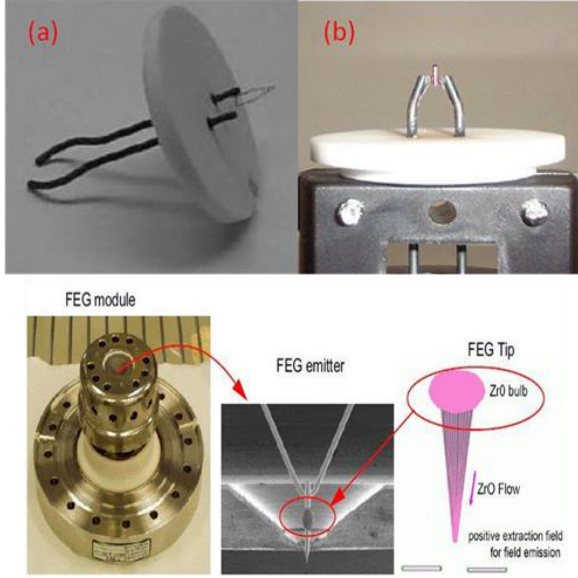
Elektron Kaynakları

Elektron kaynakları yaygın olarak kullanılan Tungsten, LaB6, Cold FEG, Shotky FEG'dir. Bu kaynaklardan en çok kullanılan eski model tungsten ve FEG elektron kaynakları şekil 2'de gösterilmiştir. Burada eski teknoloji cihazlarda tungsten filaman elektron kaynağı kullanılırken, FEG kaynağı daha teknolojik bir elektron kaynağı olarak kullanılmaktadır. Bu kaynakların birbirine göre avantaj ve dezavantajları Tablo 1'de sunulmuştur. Tablo 2 incelendiğinde FEG elektron kaynaklarının daha kullanışlı kaynaklar olduğu açıkça görülmektedir. Burada bahsettiğimiz elektron kaynaklarının birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Bu farklılıkları aşağıdaki tablodan inceleyebiliriz.

Tablo-2 Elektron Kaynaklarının Karşılaştırılması

	Tungsten	LaB6	Schottky FEG
Parlaklık (A/cm ² sr)	100	1000	5000
Enerji Dağılımı	3.0 eV	1.5 eV	0.3 eV
Kaynak Sıcaklığı (K)	~2800	~1850	~1350
Kullanım Ömrü (s)	100	2000+	10000+
Vakum (mbar)	~10 ⁻⁵	~10 ⁻⁷	~10 ⁻⁸ ~10 ⁻⁹
Çözünürlük (30 kV)	3nm	<2.7nm	<1.2nm
Çözünürlük (1 kV)	15nm	<12nm	<3nm

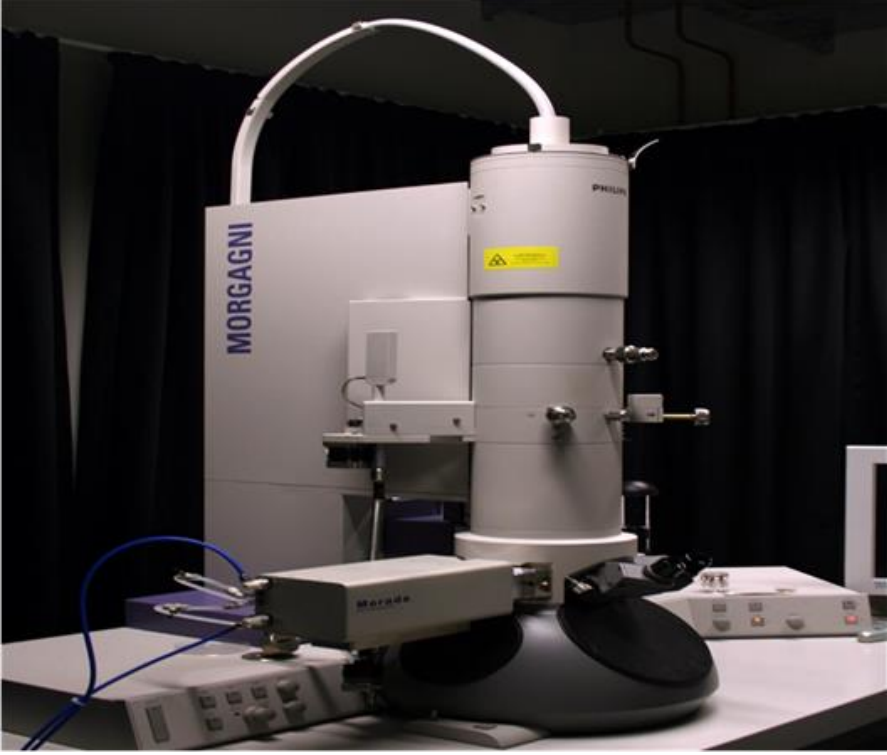
Tablo incelendiğinde, FEG elektron kaynaklarının daha avantajlı olduğu açıkça görülmektedir. Bahsi geçen elektron kaynaklarının birbirine göre çeşitli üstünlükleri ve zayıflıkları vardır. Elektron mikroskoplarında **çözünürlük**, görüntülenen yüzeydeki iki farklı noktayı ayırt edebilme yeteneğini ifade eder. **Büyütme** ise görüntülenen alanın taranan alana oranını gösterir. Bu iki değer aslında karşılaştırmalı, yani niteliksel kavramlardır. Büyütme değeri, görüntüleme ekranı veya baskı boyutuna göre değişebilir. Bu nedenle mikroskopik görüntülerde esas ölçü birimi **Bar** (ölçek çubuğu) olarak kabul edilir. Çözünürlük, analiz konfigürasyonuna yani hızlandırma voltajına, çalışma mesafesine (h), akım değerine ve numunenin yapısına bağlıdır.



Şekil 2: (a) Tungsten, (b) FEG ve FEG Modülü ile şematik görünüm

4. Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM)

Geçirimli elektron mikroskopları (TEM), çok yüksek enerjili elektronların etkileşimi sonucunda çok ince-kalın malzemelerin (<100 nm) içinden geçerek veya kırınımına uğrayarak görüntü işleyebilen yüksek çözünürlüklü sistemlerdir. Malzemedan geçen ve kırınımına uğrayan elektronlar, hem atomik yapı hem de malzeme kusurları hakkında bilgi sağlar.

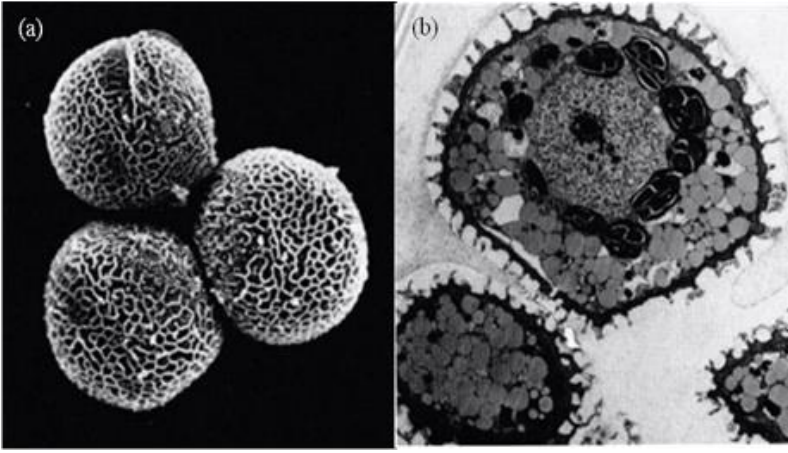


Şekil 3: Transmisyon Elektron Mikroskobu (TEM)

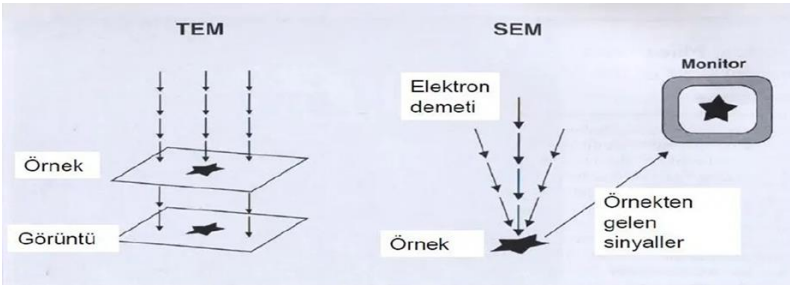
TEM, atomik seviyede görüntü elde edebilen hassas bir yöntem ve cihazdır. Bu yöntem ile SEM yöntemi arasındaki fark, TEM'de elektron demetinin numunenin içinden geçmesidir. Elektron demeti kaynaktan yayıldıktan sonra, mercekler vasıtasıyla numune üzerine odaklanır. Numuneye gelen elektron demeti malzemedan geçer ve malzemenin yapısının görüntüsünü oluşturur. Bu mikroskopta, elektron demeti incelenecek numuneden geçirildiğinde, numunenin çok ince olması gerekir. Transmisyon elektron mikroskobu, taramalı elektron mikroskobundan oldukça farklıdır. İlk olarak, oldukça yüksek voltajlarda (100 kV ila 3 MV) çalışır. Tipik mikroskoplar 120, 200 ve 300 kV'luk hızlandırıcı voltajlar kullanır. İkinci olarak, numuneler normalde yalnızca 50-100 nm kalınlığındadır çünkü görüntü, numuneyi geçen elektronlar tarafından oluşturulur. Daha yüksek hızlandırıcı voltajlar, daha kalın numunelerin gözlenmesini sağlar ve hızlandırıcı voltajla elektron dalga boyundaki azalma nedeniyle çözünürlüğü artırır. Ancak TEM'de elde edilen çözünürlük sınırı, hızlandırıcı voltajla değil, çeşitli sapmalarla belirlenir.

TEM ve SEM Arasındaki Temel Farklar

SEM'de görüntü yansıyan elektron demetleri kullanılarak elde edilirken, TEM'de cismin içinden geçen ışınlar görüntüyü oluşturur. SEM'de yüzey morfolojisi incelenirken, TEM'de numunenin derinlemesine incelenmesi yapılır. TEM'de numunenin iç yapısının görüntüsü elde edilir. SEM'de ise numunenin yüzeyi taranarak yüzey görüntüsü elde edilir. SEM'de numune hacmi büyük ve büyük iken, TEM'de ince film şeklindedir. TEM'de 1000 kX büyütme elde edilebilirken, SEM'de 100 kX büyütme elde edilebilir. TEM'de numunenin 150 nm'den ince olması gerekir. SEM'de numunenin ince veya kalın olması önemli değildir. TEM'de 2 boyutlu görüntü, SEM'de 3 boyutlu görüntü elde edilir.



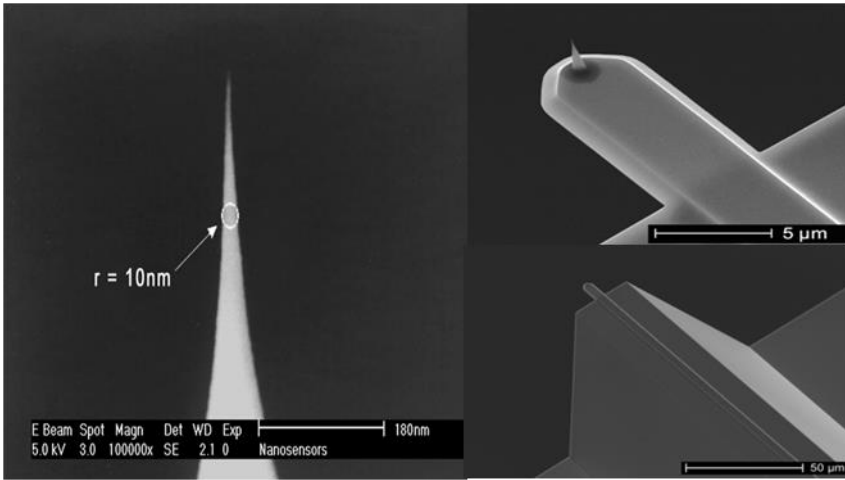
Şekil 4: TEM ve SEM Görüntü Farkı (a) TEM Görüntüsü, (b) SEM Görüntüsü



Şekil 5: TEM ve SEM Görüntü Oluşum Diyagramı

5. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)

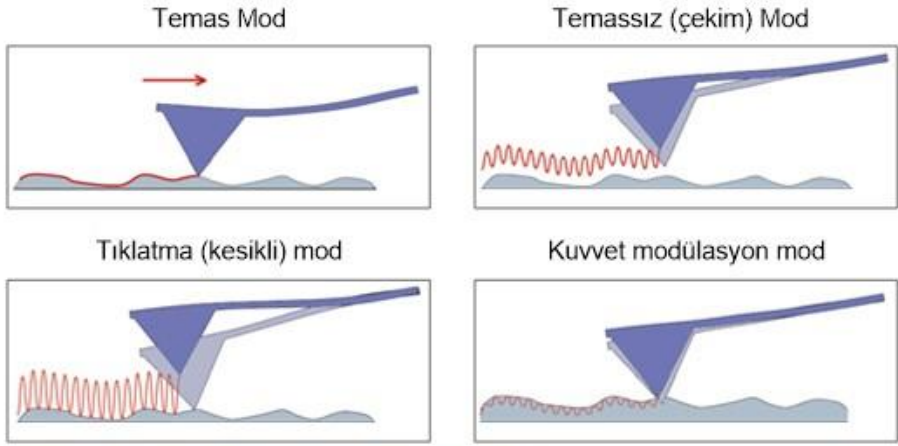
Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM), yapısı gereği çalışma prensibinde elektron kullanmaz, ancak yüzey incelemelerinde mikroskop olarak kullanıldığından burada kısaca bahsedilecektir. Kuvvet mikroskobu, kantitatif tek molekül çalışmaları da dahil olmak üzere nanometre ölçeğinde çeşitli işlemlerin karakterizasyonu için sıklıkla kullanılan bir mikroskop türüdür [11]. Numune hazırlama işlemleri, numune boyama veya metal kaplama gerektirmediği için kolaydır. AFM genellikle numuneye zarar vermez ve erime ve kristal büyümesi gibi bir işlem gerçekleşirken görüntü alınmasını sağlar. AFM'nin çalışma prensibi en basit şekilde, AFM ucu ile numune yüzeyi arasındaki kuvvetlerin belirlenmesi olarak açıklanabilir. Optik mikroskoplar 20.000 kata kadar büyütme sağlayabilir ve mikrometre çözünürlüklerine ulaşabilir. Atom ölçeğinde çalışmalar yapılacaksa, çok daha iyi büyütme özelliklerine sahip, 106 kat büyütme yapabilen ve gerektiğinde atomları tek tek tarayarak ve dokunarak bilgi sağlayabilen atomik kuvvet mikroskopları kullanılır. AKM, atomlara tek tek dokunarak görüntü elde eder. Bu görüntüyü elde etmek için mikroskop ucunun ince ve neredeyse atom boyutunda olması gerekir. Bu problar piezoelektrik malzemelerden yapılabilir. İğne ucunun uzunluğu, gerektiğinde elektrik enerjisi uygulanarak uzatılabilir. AKM'nin atomlara dokunan ucu, aşağıdaki Şekil 6'daki örnekte gösterilmiştir. Uç, istenen işleve ve istenen araştırmaya göre üretilir.



Şekil 6: Atomik Kuvvet Mikroskobu Gezici Ucu

Temas modunda, uç ile numune arasındaki mesafe birkaç düzine nm mertebesinde. AKM prob ucu, itici kuvvetler nedeniyle numuneyle yumuşak bir fiziksel temas halindedir. Uç ile numune arasındaki etkileşim, kolun bükülmesine ve böylece yüzey topografyasının kopyalanmasına neden

olur. AKM'de topografik görüntüler iki modda elde edilir: sabit yükseklik modu veya sabit kuvvet modu. Temassız (veya çekim) modda, bir piezo kristali, kolun incelenen yüzey üzerinde ~ 2 nm'lik bir genlikle salınım yapmasına neden olmak için kullanılır; bu genlik, prob ile yüzey arasındaki mesafeyi aşar. Yüzey tarama işleminde, çekme kuvveti, genlik veya rezonans frekans kayması ölçülerek belirlenir ve yüzeyin bir görüntüsü oluşturulur. Vurma (veya aralıklı) modu, kolun ucunun salınımının alt noktasında numune yüzeyine hafifçe değmesi dışında temassız moda eşdeğerdir. Kuvvet modülasyon modu; uç, salınım döngüsü sırasında yüzeyden ayrılmaz. Bu, temas modunun dinamik durumuna benzer.

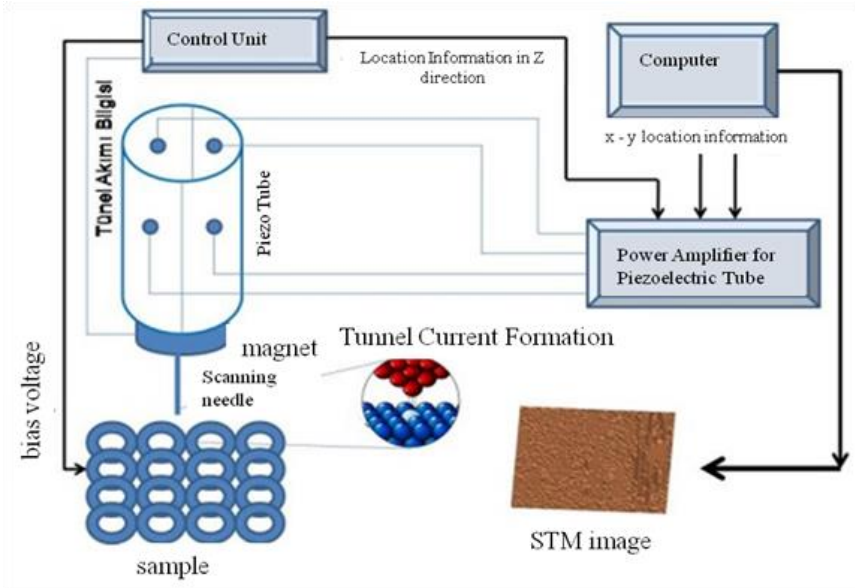


<http://www.jpk.com/introduction-to-imaging-modes.433.en.html>

Şekil 7: Prob ucundan yüzeye olan mesafeye bağlı olarak belirli AFM modları
(<http://www.jpk.com/introduction-to-imaging-modes.433.en.html>)

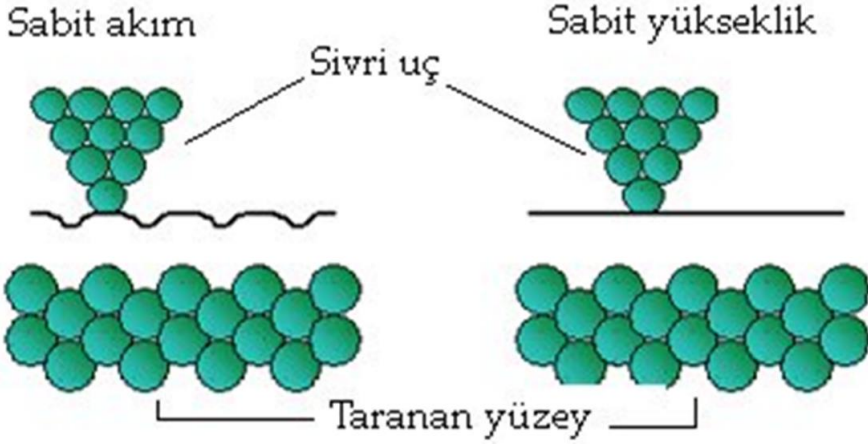
6. Taramalı Tünelleme Mikroskobu (STM)

Taramalı Tünelleme Mikroskobu (TTM), yüzey topografisini angstrom $\text{\AA}$ (10^{-10} m) seviyesinden mikron seviyesine (10^{-6} m) kadar ölçebilen bir prob mikroskopi tekniğidir [12]. Ucunda yalnızca tek bir atom kalacak şekilde sivriltilmiş metal bir iğne yüzeye yaklaştırılır. İğne yüzeye 0,3-0,4 nm yaklaştığında, elektronlar iğneden akmaya başlar. Sivri uç ile yüzey arasındaki bu tür akım akışına "tünelleme" denir. Bu akım aynı zamanda iğne ile yüzey arasındaki mesafenin üstel bir fonksiyonudur. Uç ile yüzey arasındaki mesafe, akımı sabit tutmak için sürekli kontrol edilir. Uç, tarama sırasında iki boyutta hareket eder, ancak yüzeyden uzaklığını değiştirerek üç yönde de hareket edebilir. Böylece, taramalı tünelleme mikroskobu yardımıyla, incelenen yüzeyin elektronik ve atomik yapısının istenen görüntüsü elde edilir.



Şekil 8: STM Şematik Diyagramı

Taramalı tünelleme mikroskopu ile görüntü ediniminin bazı sınırlamaları vardır. Bunlardan bazıları yalnızca iletken yüzeylerde kullanılır, mikroskop kurulumu vakum ortamında ve düşük sıcaklıkta olmalıdır. Bu sınıflandırmalar nedeniyle bu yöntem biyolojik yapılar için uygun değildir. Numune ile uç (tip) arasında çok küçük bir mesafe (birkaç Å) ile bir önyargı gerilimi oluşturulduğunda, kuantum tünelleme nedeniyle numuneden uca veya uçtan örneğe elektron transferi gerçekleşir. Bu, pikoamper aralığında bir tünelleme akımına karşılık gelir. Numune yüzeyinde ucu tararken oluşan bu tünelleme akımı ölçülür ve yüzey topografyasını elde etmek için kullanılır, çünkü bu akım numune ile uç arasındaki mesafenin bir fonksiyonudur. Sabit akım modunda, tipin yüksekliğini ayarlayarak akımı sabit tutan geri besleme devresi sayesinde akım sabit tutulurken tip yüzey üzerinde hareket ettirilir. Bu süre zarfında ucun yüksekliğindeki değişiklikler kaydedilir ve bir görüntü oluşturulur. Sabit yükseklik modunda, uç yüzeye yaklaştırıldıktan sonra mesafe sabit tutulur ve uç yüzeyde hareket ettirilirken akım ölçülür. Ölçülen akıma bağlı olarak görüntü elde edilir.



Şekil 9: STM Çalışma Modları

AFM-TTM Farkı

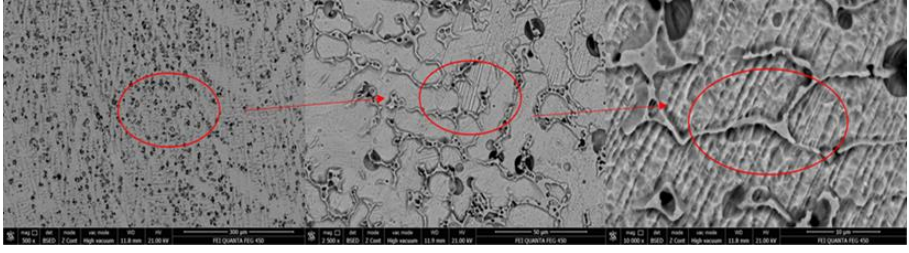
STTM, Taramalı Tünelleme Mikroskobu, AFM ise Atomik Kuvvet Mikroskobu anlamına gelir. Atom ve moleküler disiplinlerde, bu iki mikroskobun icadı bir devrim olarak kabul edilir. AFM veya atomik kuvvet mikroskobu, nanometre boyutunda bir ucu görüntünün yüzeyi boyunca kaydırarak kesin resimler çeker. Kuantum tünelleme, TTM tarafından fotoğraf çekmek için kullanılır. Taramalı Tünelleme Mikroskobu, oluşturulacak iki mikroskoptan ilkiydi. TTM'nin aksine AFM, yüzeye doğrudan temas eden ve yeni başlayan kimyasal bağlantıları hesaplayan bir prob kullanır. Prob ve numune arasındaki kuantum derece tüneli hesaplanarak, STM resimleri dolaylı olarak gösterilir. Diğer bir fark, AFM probunun ucunun yüzeye yumuşak bir şekilde temas etmesi, TTM probunun ucunun ise yüzeyden kısa bir mesafede tutulmasıdır. TTM'den farklı olarak AFM, tünel akımını değil, yüzey ile uç arasındaki küçük kuvveti ölçer. AFM'nin TTM'den daha yüksek bir çözünürlüğe sahip olduğu da keşfedildi. AFM, bu nedenle nanoteknolojide yaygın olarak kullanılmaktadır. AFM, kuvvet ve mesafe arasındaki ilişki söz konusu olduğunda TTM'den daha karmaşıktır. Atomik Kuvvet Mikroskobu, genellikle iletkenlerde kullanılan Taramalı Tünelleme Mikroskobunun aksine, hem iletkenlerde hem de yalıtkanlarda kullanılabilir. TTM yalnızca yüksek vakumda çalışır, ancak AFM sıvı ve gaz koşullarına iyi uyum sağlar. AFM, TTM'den daha yüksek topografik kontrasta, doğrudan yükseklik ölçümüne ve üstün yüzey özelliklerine sahiptir [Nanomagnetics-inst].

UYGULAMA ALANLARI

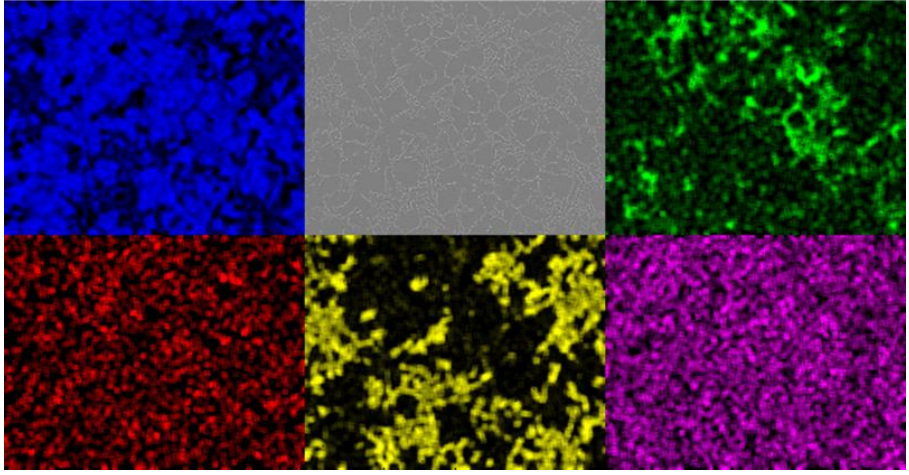
Yukarıda belirtilen mikroskop türleri, özellikle malzeme bilimi, tıp ve biyoloji, elektronik ve yarı iletken endüstrisi, adli tıp, kimya, petrokimya, çevre bilimi, jeoloji ve mineraloji, enerji ve depolama sistemleri ve polimer dünyasında sıklıkla kullanılmaktadır. Bu alanlardaki kullanım ve uygulama alanlarını ayrıntılı olarak inceleyelim.

4.1. Malzeme Bilimi

Mikro yapı analizinde, malzemelerin mikroskobik yapısı ve bileşenleri incelenir. Bu şekilde, malzemelerin dayanıklılık ve esneklik gibi özellikleri hakkında bilgi edinilir. Nanomalzemeler, ince filmler ve kaplama yapıları ayrıntılı olarak analiz edilir. Örneğin, siloksan türevlerinin yapısal ve morfolojik özelliklerinin ayrıntılı olarak incelenmesi, malzeme bilimi ve yüzey kimyası açısından oldukça önemlidir. Erol (2018), yüksek büyütmeli taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanarak siloksanların mikroyapısal analizini gerçekleştirmiş ve bu malzemelerin yüzey özelliklerini ayrıntılı olarak ortaya koymuştur [14]. Hasar ve aşınma analizlerinde, parçaların kırılma ve aşınma nedenleri belirlenerek daha dayanıklı malzemeler geliştirilir. Yüzey pürüzlülüğü ve topografya analizlerinde, malzemelerin yüzey özellikleri (pürüzlülük, yükseklik profili) atomik seviyede ölçülür ve yüzey kaplaması, aşınma ve malzeme dayanıklılığı araştırmaları yapılır. Nanomalzemelerin karakterizasyonu: Nanotüpler, grafen, kuantum noktaları, nanopartiküller ve ince filmler gibi nanoyapıların morfolojisi, boyutları, yapıları, mekanik ve elektriksel özellikleri incelenir. Tribolojik özellikler, malzeme yüzeyine uygulanan kuvvet ölçülerek değerlendirilir. Atomik yapı analizinde STM, yüzeylerin atomik yapılarını görüntüleyerek atomik düzen, kristal yapı ve malzeme kusurları hakkında bilgi sağlar. Ayrıca, nanoteller, kuantum noktaları ve nanoyapılar gibi nanoyapıların atomik düzeyde karakterizasyonu da incelenir. STM, yüzeylerde atomik düzeyde modifikasyonlar yapılmasına olanak sağlayarak nanoskalada yapıların üretilmesini sağlar. Örneğin, atomları hareket ettirerek nanoskalada devreler veya cihazlar oluşturulabilir. Ayrıca, malzemelerin kristal yapıları, kristal kafes kusurları ve dislokasyonları görüntülenerek mukavemet ve mekanik gibi kristal yapı analizleri yapılabilir. Ayrıca, metal alaşımlarının, seramiklerin ve kompozit malzemelerin mikroyapılarında faz ve tane sınırları kolayca incelenebilir (Şekil 10-11).



Şekil 10: Mikro yapı analizi tane sınırları SEM görüntüsü

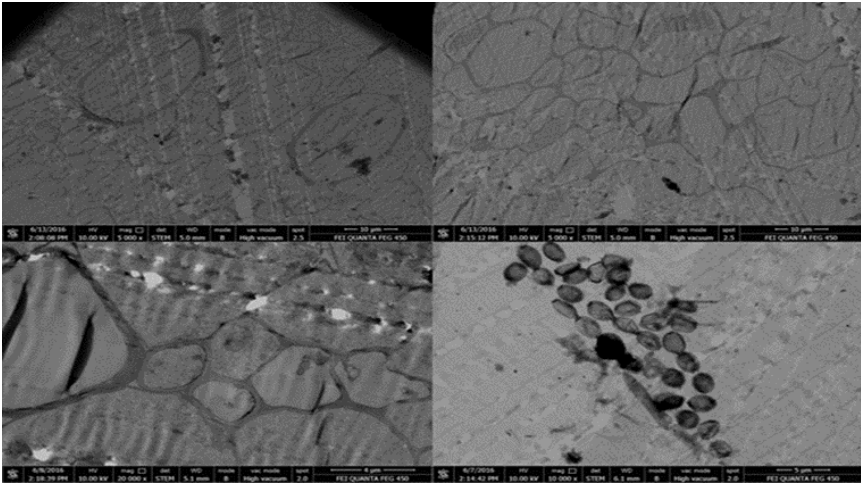


Şekil 11: Mikro yapı analizi tane sınırları SEM Haritalama görüntüsü

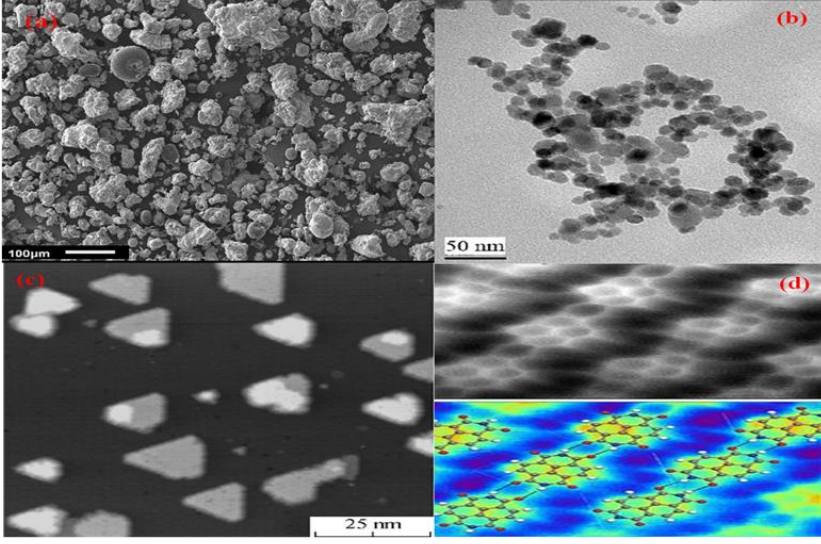
2. Tıp ve Biyoloji

Elektron mikroskopları, tıp ve biyoloji alanında hücreler, dokular ve biyomoleküller, hücre içi yapılar, organeller ve virüsler gibi çok küçük biyolojik yapıların görüntülenmesinde kullanılır ve mikroskopi dünyasında en çok ihtiyaç duyulan ve kullanılan mikroskopi türüdür. Hücre zarlarının, DNA'nın, proteinlerin ve biyomoleküllerin yapısı ayrıntılı olarak incelenebilir. Özellikle hücrelerin yüzey özellikleri ve biyomoleküllerle etkileşimleri ile biyomoleküllerin hücre zarındaki dizilimi ve biyolojik fonksiyonları üzerine çalışmalar yapılabilir. Erol (2021), hekzametildisilazanın (HMDS) amonyak ve metil silanole dönüşüm mekanizmasını yerinde taramalı elektron mikroskobu tekniklerini kullanarak incelemiş ve bu dönüşüm sırasında meydana gelen morfolojik değişiklikleri göstermiştir [15]. Bu çalışmalar, siloksan türevlerinin hem mikro ölçekli yapısal özelliklerinin hem de kimyasal dönüşüm süreçlerinin anlaşılmasına önemli katkılarda bulunmuştur. Hücrelerin esneklik ve sertlik gibi mekanik

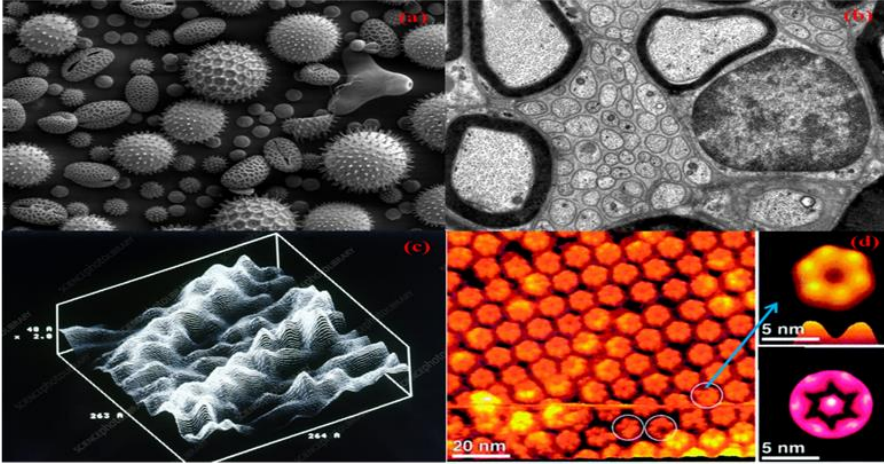
özelliklerinin ölçülmesiyle hastalıklı hücreler (örneğin kanser hücreleri) ile sağlıklı hücreler arasındaki fark belirlenir. Özellikle virüs ve bakteri gibi bulaşıcı hastalıkların incelenmesinde mikroorganizmaların yapısının belirlenmesinde kullanılır. Virüs, bakteri ve diğer mikroorganizmaların yapısının analiz edilmesiyle biyomedikal araştırmalara katkı sağlanır. Ayrıca ilaç ve biyomalzeme etkileşimlerinin incelenmesiyle biyomalzemelerin hücrelerle uyumluluğu araştırılır. Biyomedikal uygulamalarda polietereketon (PEEK) esaslı implantların biyoyumluluğunun ve radyopak özelliklerinin iyileştirilmesi doku mühendisliği ve implant tasarımı açısından büyük önem taşır. Erol ve ark. (2024) tarafından yapılan çalışmada, modifiye edilmiş radyopak PEEK implantların yüzey özellikleri ayrıntılı olarak incelenmiş ve in vitro ve in vivo biyoyumluluk testleri yapılmıştır. Çalışmada, PEEK yüzeyine yapışan hücrelerin yüzey etkileşimleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak analiz edilmiş ve hücresel yapışma ve çoğalma düzeyleri değerlendirilmiştir. Bu kapsamlı inceleme, PEEK implantlarının biyomedikal performansının yüzey modifikasyonları yoluyla iyileştirilebileceğini ortaya koymuştur [16]. Bu tür çalışmalar elektron mikroskoplarıyla gerçekleştirilirken, STM, yüzeyler arasındaki biyomolekül etkileşimlerini inceleyerek biyosensörler için daha hassas yüzeylerin geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır.



Şekil 12: Mısır Köküve yaprak kesitlerinin TEM görüntüsü



Şekil 13: (a) SEM Fe (b) TEM Metal Oksit (c) STM Si (d) AFM NTCDI görüntüleri

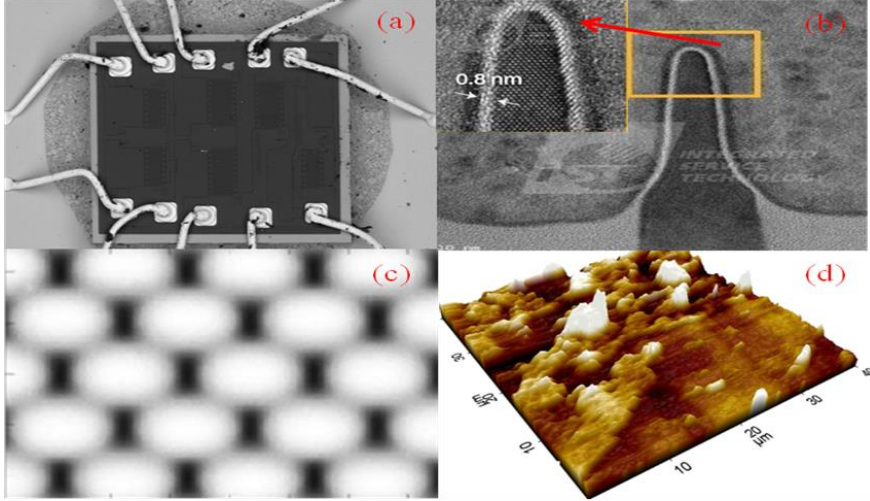


Şekil 14: (a) SEM Polen tanecikleri, (b) TEM Schwann hücreleri, (c) STM DNA, (d) AFM Plazma zarı (a- Dartmouth College Elektron Mikroskobu Tesisi, b- news-medical.net, c- Science Source, d- Amerikan Kimya Derneği).

3. Elektronik ve Yarı İletken Endüstrisi

Çip ve yarı iletken araştırmalarında, entegre devrelerin, mikroçiplerin ve transistörlerin yapısal analizinde üretim hatalarını tespit etmek için elektron mikroskopları kullanılır. Ayrıca, elektronik cihazlardaki arıza tespiti elektron

mikroskobu ile yapılırken, yarı iletken malzemelerdeki kusurlar, safsızlıklar, yüzey pürüzlülüğü ve atomik seviyedeki hatalar STM mikroskobu ile tespit edilir.



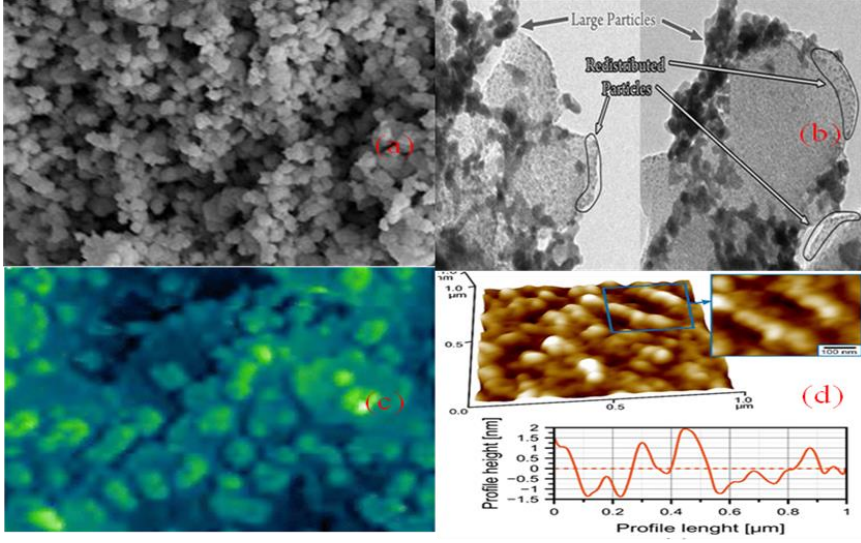
Şekil 15: (a) SEM Tel-Bağ paketi, (b) FinFET, (c) STM Yarıiletken nanotüpler, (d) AFM Yarıiletken film, (a- nanoscience.com, b- istgroup.com, c- DOI:10.1098/rsta.2004.1435, d- DOI:10.1007/s10854-022-08801-w)

4. Adli Bilimler

Bu alanda, kimyasal kalıntıların, doku örneklerinin, saçların, liflerin ve diğer biyolojik izlerin yanı sıra para, sanat eseri veya belgelerin elektron mikroskobu ile analizi yapılır.

5. Kimya, Kataliz ve Petrokimya

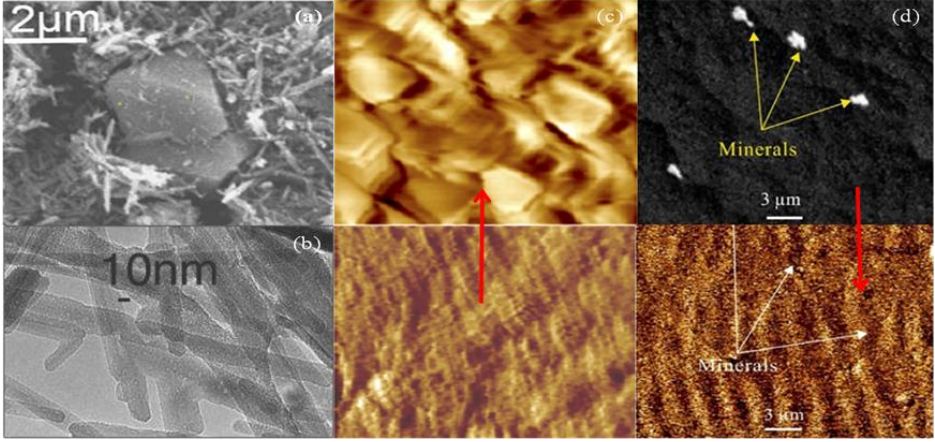
Bu alanda, katalizörlerin mikroskobik yapısı ve aktivitesi incelenir, polimerlerin moleküler yapıları incelenir ve malzeme geliştirmeye büyük katkı sağlar. Kimyasal reaksiyon mekanizmalarının incelenmesinde, STM, kataliz mekanizmalarının atomik düzeydeki kimyasal reaksiyon süreçlerinde büyük önem taşır. Ayrıca, araştırmacılara moleküller arası etkileşimleri ve kimyasal bağları gözlemlenme konusunda ışık tutar.



Şekil 16: (a) SEM Malik Asit, (b) TEM PtRuCN Katalizörü, (c) STM PtCO₂ Katalizörü, (d) AFM Kuvars (a- DOI:10.21608/EJCHEM.2010.1232, b- DOI:10.1149/2.0011509jes, c- DOI:10.1016/S1872-2067(17)62878-X, d- DOI:10.1007/s10704-021-00564-5)

6. Çevre Bilimleri, Jeoloji ve Mineraloji

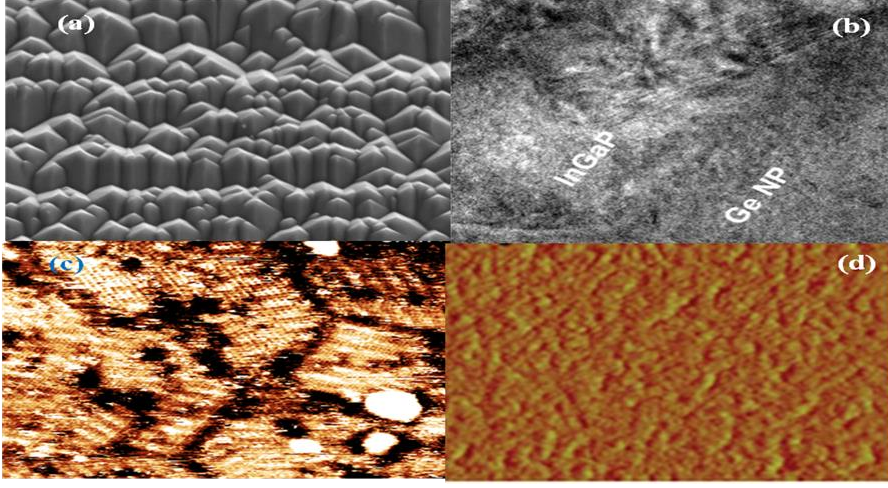
Mineral ve kayaç çalışmalarına, minerallerin içyapılarının, oluşum süreçlerinin ve bileşenlerinin incelenmesine, fosillerin mikroskopik analizine ve fosil örneklerinin içyapısı ve biyolojik geçmişi hakkında bilgi edinilmesine katkıda bulunur. Ayrıca, toprak ve tortulardaki metallerin veya diğer zararlı bileşiklerin yüzey yapılarının incelenmesinde ve yeraltı mineral fazlarının belirlenmesinde de kullanılır.



Şekil 17. (a) SEM özşekilli manyetit, (b) TEM Jeotit, (c) STM Pirit yüzeyi, (d) AFM Jeolojik Malzemesi (a,b- 10.5772/intechopen.102477, c- DOI:10.1016/j.gca.2007.10.001, d-10.1016/j.coal.2021.103852).

7. Enerji ve Depolama Sistemleri

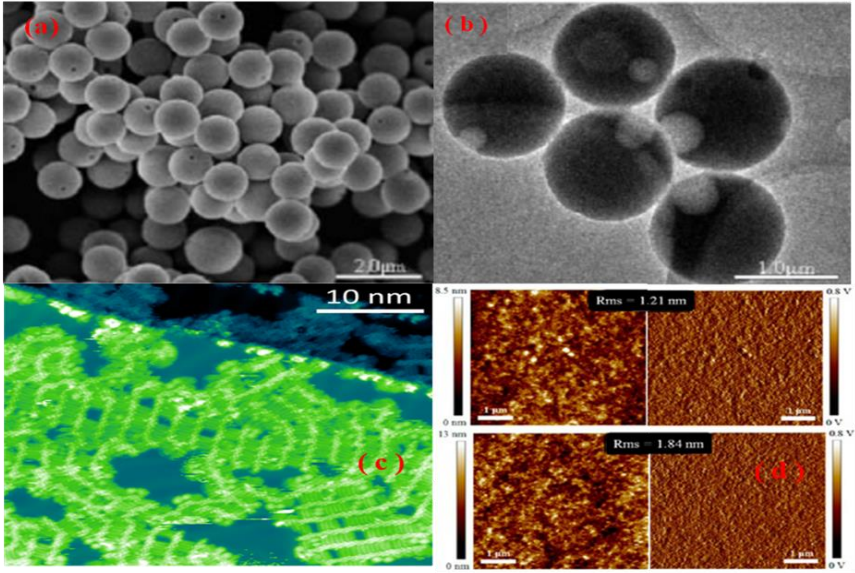
Başka bir uygulama alanı olan enerji ve depolama sistemlerinde, pil elektrotlarının yüzey yapıları, yüzeyde meydana gelen değişiklikler ve elektrokimyasal özellikler atomik düzeyde analiz edilip incelenmekte ve daha verimli enerji depolama sistemlerinin geliştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır [17]. Burada STM, elektrot yüzeylerindeki katalitik reaksiyonların yüzey modifikasyonlarını anlamak için kullanılmaktadır.



Şekil 18. (a) SEM G ne  h creti, (b) TEM GeNP G ne  h creti, (c) STM Sb Elektrot yüzeyi, (d) AFM Cb/Cf Hücre Aktif yüzeyi (a-ci tekglobal.com, b 10.1038/srep42693, c- 10.1007/s10008-023-05667-8, d-DOI:10.1039/C4TC00921E).

8. Polimer Bilimi

Elektron mikroskopunun yoğun olarak kullanıldığı polimerlerin yüzey yapıları ve özellikleri incelenerek polimer özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik çalışmalar yürütülmektedir. Bu kapsamda, polimerlerin termal ve mekanik davranışları ve sıcaklık değişimlerine tepki olarak yüzey değişimleri analiz edilmektedir. Özellikle biyomedikal alanda kullanılan biyopolimerlerin biyouyumluluk ve mekanik özelliklerinin incelenmesinde kullanılmaktadır.



Şekil 19: (a) SEM Tek gözenekli polimer, (b) TEM Tek gözenekli polimer, (c) STM C-14 DPPF-F Polimer, (d) AFM PC71 BM Polimer (a ve b- 10.1039/c1nr10920k, c- 10.1126/sciadv.aas9543, d- 10.1021/ma401897b)

SONUÇ

Kitabımızın bu bölümünde, mikroskobun tarihçesine kısaca değinilmiş ve türleri hakkında kısa bilgiler verilmiştir. Mikroskopların çeşitleri, hangi bilim alanında ve ne amaçla kullanıldığı hakkında bilgi verilmiştir. Kullanım alanlarına ilişkin analiz görselleriyle konu daha anlaşılır hale getirilmiştir. Mikroskobik incelemeler, karşılaştığımız tüm süreçlerde ve neden-sonuç ilişkilerinde merak uyandıran tüm araştırmalarda kullanılmaktadır. Her alanda bilimsel çalışmalarda karşılaştığımız durumların daha iyi anlaşılması ve analiz edilmesi, bilim dünyasının geçmişten günümüze yeni yaklaşımlar ve yöntemler geliştirmesine yol açmıştır. Tüm bu olayların başında, olayları çıplak gözle görebilme yeteneği gelmektedir. Bu nedenler, bilimin ışığında bize rehberlik etmekte ve kitabımızın bu bölümünde incelediğimiz elektron mikroskoplarıyla bunlara ulaşabilmekteyiz. Sonuç olarak, mikroskop dünyası bize görünmeyi göstermektedir. Bildiğimiz veya bilmediğimiz tüm maddelerin iç ve dış yapısı hakkında bilgi edinmemizi sağlamaktadır.

REFERENCES

- [1] Binnig, G., & Rohrer, H. (1986). Scanning tunneling microscope. *IBM Journal of Research and Development*, 30(4), 355–369. [https://doi.org/10.1016/0039-6028\(83\)90716-1](https://doi.org/10.1016/0039-6028(83)90716-1)
- [2] Erol, A. (2018). High-magnification SEM micrograph of siloxanes. *Silicon*, 10(6), 2627–2633.
- [3] Erol, A. (2021). In situ scanning electron microscopy of HMDS converted to NH₃ and methyl silanol. *Silicon*, 13(2), 543–550.
- [4] Erol, A., Hazer, B., Keskin, E., Yöney, B., & Derin, E. (2024). Modified radiopaque polyetheretherketone implants: In vitro and in vivo study. *Iranian Polymer Journal (English Edition)*.
- [5] Gould, S. J. (2000). Chapter 2: The sharp-eyed lynx, outfoxed by nature. In *The lying stones of Marrakech: Penultimate reflections in natural history*. Harmony. ISBN 0-224-05044-3
- [6] Kapakin Terim, K. A. (2006). Scanning Elektron Mikroskopy. *Journal of Yüzüncü Yıl University Faculty of Veterinary Medicine*, 17, 55–58.
- [7] Li, W., Yang, T., Li, C., Li, G., & Xin, Y. (2023). Superconducting science and technology, 36, 115013.
- [8] Maver, U., Velnar, T., Gaberšček, M., Planinšek, O., & Finšgar, M. (2016). Recent progressive use of atomic force microscopy in biomedical applications. *Trends in Analytical Chemistry*, 80, 96–111.
- [9] Mungan, C. (2019). Evaluation of fixation potential of aldehyde group fixatives under super resolution microscope with immunofluorescence technique (Master's thesis). Ankara University, Ankara, Turkey.
- [10] Nobel Web AB. (n.d.). Microscopes: Time line. Archived from the original on 9 January 2010. Retrieved April 17, 2012.
- [11] Singh, A., Verma, R., Murari, A., Agrawal, A., Singh, S., & Singh, V. (2013). Electron microscope: A review. *Medico-Legal Update*, 13, 12–16. <https://doi.org/10.5958/j.0974-1283.13.2.004>
- [12] Temiz, C., Yılmaz, F., & Kölemen, U. (2022). Investigation of microstructures and mechanical properties of Sc-doped Al-5Cu alloys. *Journal of Gazi University Faculty of Engineering and Architecture*, 37, 75–88. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.855196>
- [13] Temiz, C. (2019). Mechanical characterization of Al-5Cu-XSc (X=0,5 and 1,0) alloys production by using induction melting and melt spinning techniques (Master's thesis). Tokat Gaziosmanpaşa University, Tokat, Turkey.
- [14] Temiz, C. (2022). Chapter 1: Scanning electron microscopy. In *Scanning Electron Microscopy* (pp. 3–19). ISBN 978-1-80355-947-6.
- [15] Vernon-Parry, K. D. (2000). Scanning electron microscopy: An introduction. *III-Vs Review*, 13, 40–44. [https://doi.org/10.1016/S0961-1290\(00\)80006-X](https://doi.org/10.1016/S0961-1290(00)80006-X)
- [16] Wootton, D. (2006). *Bad medicine: Doctors doing harm since Hippocrates*. Oxford University Press. ISBN 0-19-280355-7
- [17] Yamasaki, J., & Hatanaka, S. (2024). Microscopy and microanalysis. *Microscopy and Microanalysis*, 30(Suppl 1), 339–340.

Nöromorfik Devrelerde Yük Tabanlı Memristans ile RLC Sisteminin Kararlık Analizi

Muhammet ATEŞ¹

Muzaffer ATEŞ²

- 1- Dr. Öğr. Üyesi .; Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Van Meslek Yüksekokulu Elektronik ve Otomasyon Bölümü. mts@yyu.edu.tr. ORCID No: 0000-0003-2223-2745
- 2- Prof. Dr.; Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Mühendislik Fakültesi ve Elektrik Mühendisliği Bölümü, ates.muzaffer65@gmail.com. ORCID No: 0000-0001-5725-9580

ÖZET

Memristörler, geçmişe bağımlı iletkenlik özellikleri sayesinde nöromorfik bilgi işleme sistemlerinde yapay sinapsların fiziksel olarak modellenmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Bu çalışma, geçmişe bağlı iletkenlik özellikleri sayesinde biyolojik sinapsların modellenmesinde kritik rol oynayan memristörlerin, *RLC* tabanlı devreler üzerindeki dinamik etkilerini enerji temelli Lyapunov kararlılık analizi çerçevesinde incelemektedir. Çalışmada üç farklı memristif *RLC* devre topolojisi ele alınmıştır: yük bağımlı memristans içeren seri *RLC* devresi, Çift Memristör Tabanlı FitzHugh–Nagumo Devresi ve tek memristif nöronun devre temelli elektriksel modeli içeren genişletilmiş *RLC* devresi. Her bir devrede memristans fonksiyonu, sistemin doğrusal olmayan karakteristiğini belirleyici şekilde değiştirmektedir. Bu doğrultuda, devre dinamikleri doğrusal olmayan diferansiyel denklem sistemleriyle ifade edilmiş ve sistem kararlılığı, Lyapunov'un doğrudan yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Lyapunov fonksiyonları, devre elemanlarında depolanan enerji üzerinden tanımlanmıştır.

Devrelerdeki memristans fonksiyonunun pozitif tanımlı olduğu durumlarda sistemin Lyapunov anlamında veya Adimptotik anlamada kararlı olduğunu; yani sistemin enerjisi zamanla monoton biçimde azaldığını ortaya koymaktadır. Bunun aksine, memristansın negatif katkılar içermesi durumunda sistemin toplam enerjisinin artabildiği ve bu nedenle kararsızlık davranışı gösterdiği belirlenmiştir. Bu durum, memristörün bazı konfigürasyonlarının nöromorfik devrelerde istenmeyen osilasyonlara veya dengesizliklere yol açabileceğini göstermektedir.

Sayısal simülasyonlar MATLAB ortamında gerçekleştirilmiş ve teorik analizlerle yüksek düzeyde tutarlılık göstermiştir. Farklı parametre değerleri (memristans), sistem kararlılığını doğrudan etkilemiş ve bazı senaryolarda sistemin tamamen dengesiz hale geldiği gözlemlenmiştir. MATLAB ortamında yapılan simülasyonlar, teorik bulgularla tutarlılık göstermekte ve farklı parametre seçimlerinin sistem kararlılığı üzerindeki etkilerini açıkça ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, memristif nöromorfik devrelerin tasarımında kararlılık analizi yapılmasının gerekliliğini vurgulamakta ve yapay sinaptik yapıların güvenilir şekilde modellenmesi için yardımcı olacaktır.

Sonuç olarak, bu çalışma, memristif elemanların nöromorfik bilgi işleme devrelerinde kullanılmasında kararlılık analizinin kritik bir tasarım kriteri olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle memristör modellerinin yalnızca işlevsellik açısından değil, aynı zamanda sistemin uzun vadeli kararlılığı bakımından da titizlikle değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Elde edilen bulgular, memristif nöromorfik devrelerin güvenilir şekilde modellenmesi ve tasarlanmasında kararlılık analizinin zorunlu bir adım olduğunu göstermektedir.

GİRİŞ

Geleneksel bilgi işlem sistemleri, özellikle yapay zekâ ve makine öğrenmesi uygulamalarında artan veri hacmi ve işlem gücü gereksinimleri karşısında sınırlarına ulaşmaktadır. Bu nedenle, biyolojik sinir sistemlerinin yapısından ilham alan nöromorfik bilgi işleme sistemleri, hem enerji verimliliği hem de gerçek zamanlı işlem yetenekleri açısından önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır (Mead, 1990). Bu sistemlerin donanımsal temelini oluşturan en önemli bileşenlerden biri ise memristör (memory resistor) aygıtıdır. Memristor, hafıza özelliklerine sahip doğrusal olmayan bir elektronik bileşendir ve sinirsel aktivitelerin kapsamlı adaptif kontrolü ve model tanımı için çeşitli doğrusal olmayan devrelerde yaygın olarak kullanılır (Yang vd., 2024)

Memristör, 1971 yılında Leon Chua tarafından teorik olarak tanımlanmış ve 2008 yılında HP Labs tarafından fiziksel olarak gerçekleştirilmiştir (Chua, 1971; Strukov vd., 2008). Temel özelliği, uçları arasındaki gerilim ile üzerinden geçen yük arasında doğrudan bir ilişki olmasıdır. Bu nedenle memristör, geçmiş akım geçişine dayalı olarak iletkenliğini değiştirebilir ve böylece hafıza etkisi gösterir. Bu davranışıyla, sinaptik plastisiteyi fiziksel olarak modellemek için ideal bir eleman hâline gelmiştir (Jo vd., 2010). Özellikle yük bağımlı memristans modelleri, nöromorfik sistemlerde zamanla değişen sinaptik ağırlıkları gerçeklemeye olanak tanımaktadır (Pershin ve Di Ventra, 2011).

Bu çalışmada, memristörlü klasik bir elektriksel yapı olan RLC devresinin davranışı incelenmektedir. RLC devreleri; direnç (R), endüktans (L) ve kapasitans (C) elemanlarının birlikte yer aldığı, enerji depolama ve salınım özellikleriyle sistem dinamiğini yansıtan temel devre yapılarıdır. Ancak bu devreye bir memristör eklendiğinde, sistem doğrusal olmayan ve zamana bağlı bir yapıya dönüşmekte, bu da analiz sürecini daha karmaşık hâle getirmektedir (Birolek vd., 2009).

Böyle bir sistemin kararlılığını değerlendirmek için klasik çözümleme yöntemlerinin ötesine geçilmesi gerekmektedir. Bu nedenle bu çalışmada, sistemin kararlılığı Lyapunov kararlılık teorisi kullanılarak analiz edilmiştir. Lyapunov yaklaşımı, özellikle doğrusal olmayan sistemlerin denge noktaları etrafındaki davranışlarını incelemede etkili bir yöntemdir (Khalil, 2002). Sistemin enerjisini temsil eden bir Lyapunov fonksiyonu seçilerek bu fonksiyonun zamanla azalıp azalmadığı gözlemlenmiş ve sistemin kararlılığı bu yolla değerlendirilmiştir (Chen vd., 2015)

Yapılan teorik analizler ve MATLAB ortamında gerçekleştirilen simülasyonlar, memristans fonksiyonunun pozitif tanımlı olduğu durumlarda sistemin Lyapunov anlamında kararlı olduğunu; ancak belirli koşullar altında (örneğin $M(q) < -R$ olduğu durumlar) sistemin kararsız hâle gelebileceğini ortaya koymuştur. Bu çalışma, memristif sinaptik devrelerin kararlılık analizi ve güvenilir nöromorfik donanım tasarımı için temel teşkil etmektedir.

Bu çalışmada analiz edilen devreler, klasik devrelere memristör eklenerek oluşturulmuştur. Devreler; sırasıyla bir direnç, bir endüktans, bir kapasitör ve yük bağımlı bir memristans içeren yapılardan oluşmaktadır. İncelenen devre yapıları arasında, seri RLC devresine memristör eklenmiş yapı, çift memristör tabanlı FitzHugh–Nagumo devresi ve tek memristif nöronun devre temelli elektriksel modeli yer almaktadır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Kararlılık, bir sistemin zamanla öngörülebilir ve dengeli bir şekilde davranmasını sağlar. Memristif devrelerde ise bu, devrenin dinamik direncinin ve dolayısıyla çıkış sinyallerinin istenmeyen dalgalanmalardan, aşırı yükselmelerden veya kontrol dışı davranışlardan uzak tutulması anlamına gelir. Eğer memristif devreler kararlı değilse, öğrenme süreçleri bozulabilir, bellek kapasitesi düşebilir ve sistem performansı ciddi şekilde zarar görebilir.

Özellikle memristif elemanların sahip olduğu hafıza özelliği, devrenin geçmişteki sinyallere göre davranışını değiştirmesine olanak verir. Bu adaptasyon yeteneği faydalı olsa da, aynı zamanda sistemin kararsız hale gelme riskini de artırabilir. Bu nedenle, memristif devrelerin tasarımında kararlılık analizleri, örneğin Lyapunov tabanlı yöntemlerle, sistemin istenen çalışma noktasında güvenle çalıştığının garanti edilmesi için zorunludur (Zhang vd., 2013)

Kararlı memristif devreler sayesinde:

- Öğrenme ve bellek işlevleri tutarlı ve güvenilir olur.
- Enerji tüketimi optimize edilir, aşırı yüklenmeler önlenir.
- Sistemler çevresel değişikliklere ve dış parazitlere karşı dayanıklı hale gelir.
- Uzun vadede performans ve ömür artar.

Özetle, kararlılık memristif devrelerin işlevselliğini ve sürdürülebilirliğini sağlayan temel bir unsur olup, bu devrelerin pratik uygulamalarda güvenle kullanılabilmesi için vazgeçilmezdir.

Lyapunov yöntemi, kararlılık analizinde yaygın ve güçlü bir araçtır. Bu yöntem, sistemin enerji benzeri bir fonksiyonu (Lyapunov fonksiyonu) tanımlayarak, bu fonksiyonun zamanla azaldığını ve belirli bir sınıra yaklaştığını gösterir. Memristif devrelerde Lyapunov fonksiyonunun zamanla azalması, devrenin dinamik direncinin kontrol altında olduğunu ve sistemin zamanla kararlı bir denge noktasına yaklaştığını garanti eder.

Lyapunov Fonksiyonunun Temel Özellikleri:

Lyapunov fonksiyonu $V(x)$, sadece denge noktası $x=0$ için sıfır olur ve diğer tüm durumlar için pozitif değer alır. Yani,

$$V(0) = 0 \quad \text{ve} \quad V(x) > 0, \quad x \neq 0$$

Fonksiyonun zamanla türevi $\dot{V}(x)$, sistemin hareketi boyunca negatif ya da en azından sıfıra eşit olmalıdır:

$$\dot{V}(x) \leq 0$$

Bu durum, sistemin enerjisinin veya “potansiyelinin” zamanla azaldığını, yani sistemin dengeye doğru yaklaştığını gösterir (Slotine ve Li., 1991).

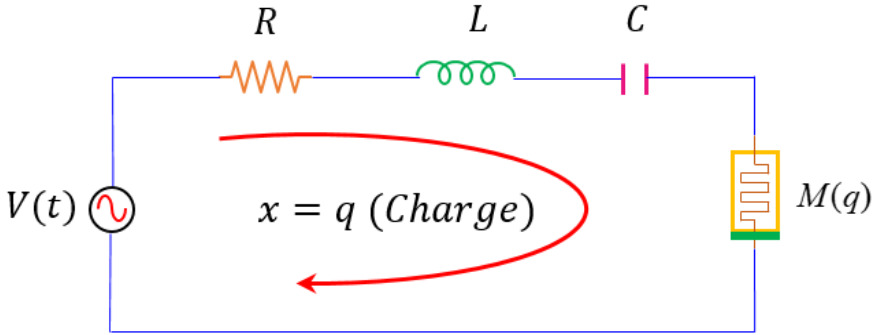
- Eğer $V(x)$ pozitif tanımlı ve $\dot{V}(x)$ negatif tanımlı ise, sistem küresel asimptotik karardır.
- Eğer $\dot{V}(x) \leq 0$ ise sistem karardır fakat asimptotik kararl olmayabilir.
- Eğer $\dot{V}(x) > 0$ olan durumlar varsa, sistem kararsızdır.

Lyapunov fonksiyonu, bir dinamik sistemde enerji gibi düşünebileceğimiz ve zamanla azalan bir skalar fonksiyon tanımlayarak, sistemin denge noktasına yaklaşma eğilimini ölçer. Bu fonksiyon sayesinde, sistemin kararl mı yoksa kararsız mı olduğunu anlamak mümkündür.

Bu çalışmada analiz edilen devre örneklerinde, klasik bir seri *RLC* devresine bir adet memristörün eklenmesiyle ve Çift Memristör Tabanlı FitzHugh–Nagumo Devresi ile Tek Memristif Nöronun Devresi incelenmiştir. Devre

elemanları direnç R , endüktans L , kapasitör C ve yük bağımlı memristans içermektedir.

ÖRNEK 1. Bu devre, bir seri RLC devresine yük bağımlı bir memristör $M(q)$ eklenmiştir. Devredeki elemanlar sırasıyla direnç R , endüktans L , kapasitör C , ve yük bağımlı memristans içeren memristördür.



Şekil 1. Memristörün Seri Devreye Entegrasyonu

Devreye uygulanan Kirchhoff'un Gerilim Kanunu (KVL) şu şekilde ifade edilir.

$$V(t) = V_R + V_L + V_C + V_M \quad (1)$$

$$V(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + Cq(t) + M(q)i(t) \quad (2)$$

Memristör, Chua tarafından tanımlanan şekilde manyetik akı (ϕ) ile elektrik yükü (q) arasındaki ilişkiyle tanımlanır:

$$M(q) = \frac{dq}{dt}$$

Pratik uygulamalarda memristans sıklıkla yükün bir fonksiyonu olarak ifade edilir. Bu çalışmada analiz amacıyla aşağıdaki doğrusal olmayan model kullanılmıştır:

$$M(q) = k_1 q^2 - k_2$$

Bu model, memristansın yük ile birlikte arttığı (ve belirli durumlarda negatif değerlere ulaşabileceği) bir sistemi temsil eder.

Analizi kolaylaştırmak adına sistem ikinci dereceden diferansiyel denklemde durum değişkenlerini $x_1 = q(t)$ ve $x_2 = \dot{q}(t) = i(t)$ gibi yazarsak iki birinci dereceden denkleme dönüştürülmüş olur.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\frac{1}{L}(R + k_1 x_1^2 - k_2)x_2 - \frac{1}{LC}x_1 \end{cases} \quad (3)$$

Lyapunov kararlılığı, bir sistemin denge noktasına yakın bölgede zamana bağlı olarak kararlı kalıp kalmayacağını belirlemeye yönelik bir yöntemdir. Bu analizde, sistemin enerjisini temsil eden pozitif tanımlı bir Lyapunov fonksiyonu önerilir ve bu fonksiyonun zaman türevinin işaretine bakılır.

Şekil 1. deki devrenin enerji benzeri aday Lyapunov fonksiyonu:

$$V(x_1, x_2) = \frac{1}{2}C^{-1}x_1^2 + \frac{1}{2}Lx_2^2 \quad (4)$$

i. $V(x) > 0$ tüm $x \neq 0$ için

ii. $V(0) = 0$

Aday lyapunov fonksiyonun pozitif tanımlı fonksiyon olduğunu göstermektedir. Lyapunov fonksiyonun türevi ise

$$\dot{V}(x) = \frac{1}{C}x_1\dot{x}_1 + Lx_2\dot{x}_2 \quad (5)$$

Denklem 3'teki durum değişkenlerini denklem 5'te yerine yazarsak

$$\begin{aligned} \dot{V}(x) &= \frac{1}{C}x_1x_2 + Lx_2\left[\frac{1}{L}(R + k_1x_1^2 - k_2)x_2 - \frac{1}{LC}x_1\right] = \\ &\frac{1}{C}x_1x_2 - (R + k_1x_1^2 - k_2)x_2 - \frac{1}{C}x_1x_2 \\ \dot{V}(x) &= -(R + k_1x_1^2 - k_2)x_2^2 \end{aligned} \quad (6)$$

Lyapunov fonksiyonun türevine bağlı olarak kararlılık durumları üç koşul içermektedir. bu durumlar aşağıda verilmiştir.

Eğer $R + k_1x_1^2 - k_2 > 0$ ise

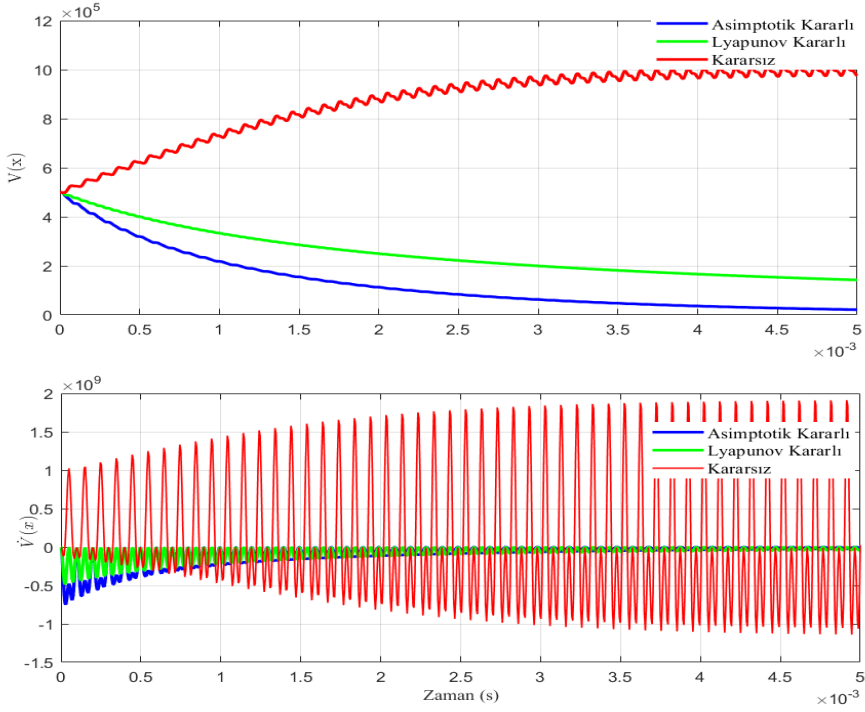
$\dot{V}(x) < 0 \Rightarrow$ Sistemin enerjisi azalır ve sistem Asimptotik kararlı olur.

Eğer $R + k_1x_1^2 - k_2 = 0$ ise

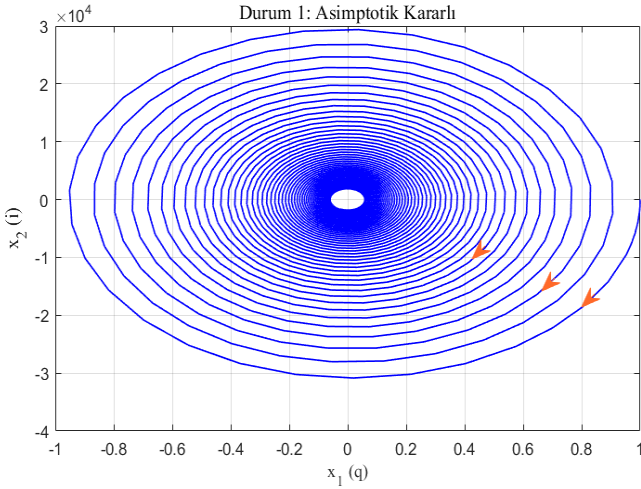
$\dot{V}(x) = 0 \Rightarrow$ Sistemin enerjisi sabit olur ve sistem Lyapunov kararlı olur.

Eğer $R + k_1x_1^2 - k_2 < 0$ ise

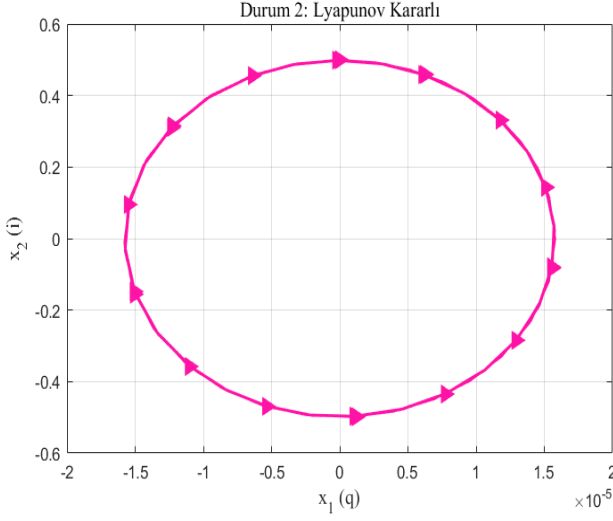
$\dot{V}(x) > 0 \Rightarrow$ Sistemin enerjisi artabilir olur ve sistem kararsız olabilir.



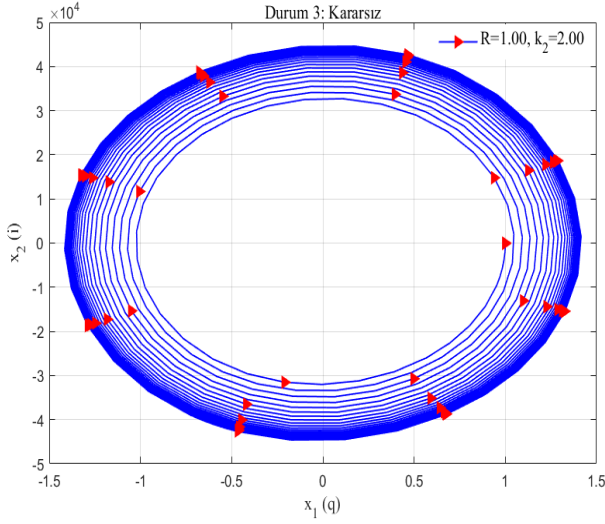
Şekil 2. Lyapunov Fonksiyonu ile Asimptotik Kararlı, Kararlı ve Kararsız Sistem Davranışlarının Zamanla Analizi.



Şekil 3. Asimptotik kararlı: Faz düzlemi



Şekil 4. Lyapunov kararlı: Faz Düzlemi

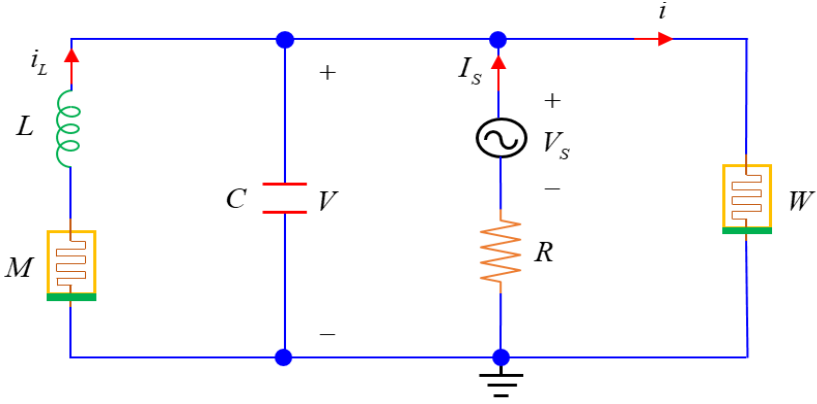


Şekil 5. Kararsız: Faz Düzlemi ve Yörünge Genişlemesi ($R = 1$, $k_2 = 2$)

ÖRNEK 2. FitzHugh–Nagumo modeli, sınır hücrelerinin (nöronların) elektriksel uyarılma ve iletim davranışlarını basitleştirilmiş şekilde modelleyen matematiksel bir sistemdir. Bu model, Hodgkin-Huxley modelinin sadeleştirilmiş bir versiyonudur ve şu amaçlarla kullanılır:

- Nöral sinyallerin (aksiyon potansiyellerinin) nasıl oluştuğunu anlamak,

- Sinir sisteminin dinamiklerini modellemek,
- Yapay nöronların davranışlarını elektronik olarak taklit etmek.



Şekil 6. Çift Memristör Tabanlı FitzHugh–Nagumo Devresi

Şekil 6. Elektriksel devrede memristörler, elektrik yükünün tarihine bağlı olarak değişen bir direnç (memristans) sergilerler. Bu özellikleriyle, klasik direnç, kondansatör veya indüktör gibi sabit elemanlardan farklıdırlar. Bu nedenle, memristansın yük (q) fonksiyonuna bağlı değişimini matematiksel olarak ifade etmek için aşağıdaki denklemler kullanılır (Chua, 1971).

$$M(q) = k_1 q^2 - k_2 \quad \text{ve} \quad W(q) = h_1 q^2 - h_2$$

Devreye uygulanan Kirchhoff'un Gerilim Kanunu (KVL) şu şekilde ifade edilir.

$$L\ddot{q} + R\dot{q} + \frac{1}{C}q + (k_1 + h_1)q^2 - (k_2 + h_2) = V_s(t) \quad (7)$$

Bu sistemi otonom hale getirip kararlılık analizini gerçekleştirebilmek için, giriş gerilimi $V_s(t)$ sıfır olarak alınır; yani $V_s(t) = 0$ kabul edilir.

$$L\ddot{q} + R\dot{q} + \frac{1}{C}q + (k_1 + h_1)q^2 - (k_2 + h_2) = 0 \quad (8)$$

Sistemin enerji benzeri Lyapunov aday fonksiyonu, sistemin durum değişkenlerine bağlı olarak aşağıdaki şekilde tanımlanabilir ve kararlılık analizinde kullanılabilir (Khalil, 2002).

$$V(q,i) = \frac{1}{2}Li^2 + \frac{1}{2C}q^2 + \frac{1}{3}(k_1 + h_1)q^3 - (k_2 + h_2)q \quad (9)$$

Bu fonksiyon:

- Pozitif tanımlı değil ama belirli koşullar altında pozitif olabilir.
- İdeal olarak, kararlılık analizi için $V(q,i) > 0$ ve $V(0,0) = 0$ olması gerekir.

Durum değişkenleri: $x_1 = q$ ve $x_2 = i$ olarak alalım.

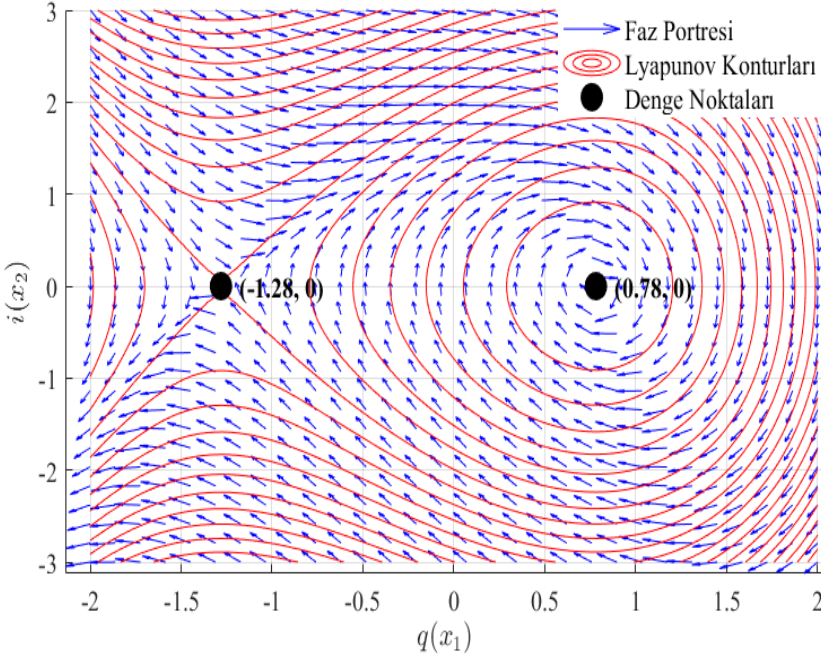
$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{L}(-Rx_2 - \frac{1}{C}x_1 - \alpha x_1^2 + \beta) \end{aligned}$$

Burada $\alpha = k_1 + h_1$ ve $\beta = k_2 + h_2$ olarak alınırsa

Durum değişkenlerine bağlı olarak lyapunov fonksiyonu

$$V(x_1, x_2) = \frac{1}{2}Lx_2^2 + \frac{1}{2C}x_1^2 + \frac{1}{3}\alpha x_1^3 - \beta x_1 \quad (10)$$

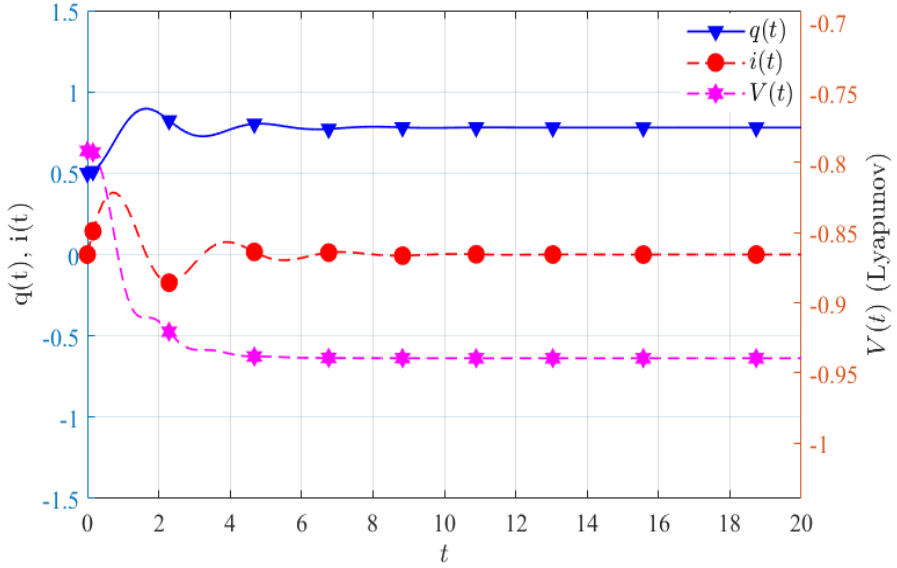
Parametreler $L = 1$; $R = 1$; $C = 1$; $k_1 = 1$; $k_2 = 1$; $h_1 = 1$; $h_2 = 1$ olarak alındığında sistemin faz portresi ve Lyapunov fonksiyonunun kontur (eşpotansiyel) çizgilerini içeren Matlab grafiği aşağıdaki şekilde gibi olur.



Şekil 7. Faz Portresi, Lyapunov Fonksiyonu Kontur Grafiği ve Denge noktaları

Grafikte; Mavi oklar sistemin hız vektörlerini (faz portresi) göstermektedir. Kırmızı kontur çizgileri ise Lyapunov fonksiyonunun sabit değer eğrileri, yani "enerji seviyeleri" gibi düşünebiliriz.

- Eğer oklar konturların içine doğru dönüyorsa, sistem kararlı demektir.
- Konturların çevresinde kapalı şekiller varsa, sistemin potansiyel dengeleri vardır.



Şekil 8. $q(t)$, $i(t)$ ve Lyapunov Fonksiyonu $V(t)$ 'nin t 'ye göre değişimi

Grafikte; Enerji fonksiyonunun monoton azalması, Yük ve akımın zamanla sabitlenmesi, memristif RLC devresinin kararlı bir davranış sergilediğini ve uygun memristans modeli seçildiğini göstermektedir.

Lyapunov fonksiyonun türevi ise

$$\dot{V}(q,i) = \left(\frac{1}{C}q + (k_1 + h_1)q^2 - (k_2 + h_2)i + Li \bullet \dot{i}\right) \quad (10)$$

Yukardaki denklemde 8 numaralı denklem olan ($L\ddot{q} = Li \bullet$) yerine yazılırsa lyapunov fonksiyonun türevi

$$\dot{V} = \left(\frac{1}{C}q + \alpha q^2 - \beta\right)i + i \bullet \left(-Ri - \frac{1}{C}q - \alpha q^2 + \beta\right) \quad (11)$$

Burada $\alpha = k_1 + h_1$ ve $\beta = k_2 + h_2$ olarak alınırsa

$$\dot{V} = -Ri^2 \quad (12)$$

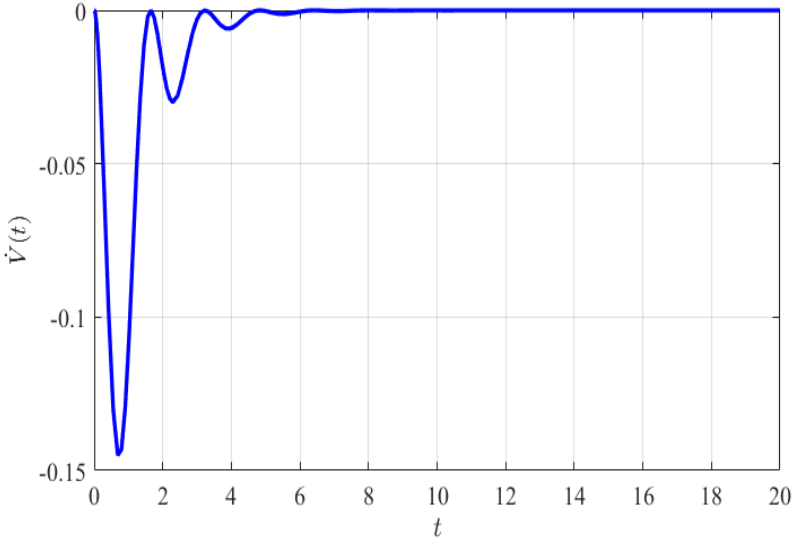
elde edilir.

Sonuç olarak $\dot{V} = -Ri^2 \leq 0$ dır.

Tüm $i \in \mathcal{R}$ için bu ifade negatif yarı tanımlı fonksiyon olup,

Bu durum:

- Sistem Lyapunov anlamında kararlı (çünkü enerji azalıyor)
- Ama asimptotik kararlılık garantilenmez (çünkü $\dot{V} = 0$ şartını sadece $i = 0$ olduğunda sağlamaktadır)

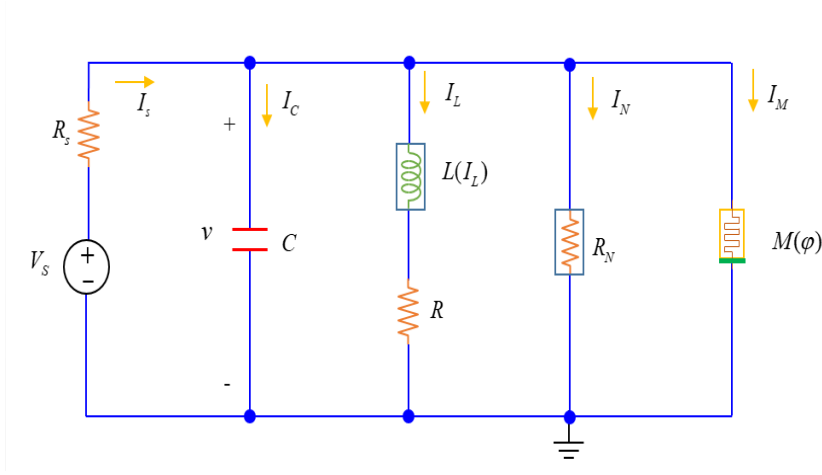


Şekil 9. Lyapunov Fonksiyonunun Türevi

Bu sistemde:

- $\dot{V} = -Ri^2 \leq 0$ olduğu için Lyapunov fonksiyonu azalan ve sistem kararlıdır.
- Eğer çözüm $i(t) \rightarrow 0$ oluyorsa, bu durumda asimptotik kararlılık da sağlanır.

ÖRNEK 3. Tek memristif nöron modelinin şematik diyagramını tanımlıyor. Bu model, genellikle motor nöron kontrol sistemlerini veya nöromüsküler kavşakların elektromekanik modellerini taklit etmek için kullanılır. Bahsettiğiniz sistem, nöromimetik bir elektrik devresi olarak hem elektronik hem de mekanik öğeleri içeren hibrit bir sistemdir. Bu sisteme ait elektrisel devre şekil 10'da verilmiştir



Şekil 10. Tek Memristif Nöronun Devre Temelli Elektriksel Modeli

Devrede memristör doğrusal olmayan ve hafıza etkisini yansıtan, basit fakat etkili bir matematiksel modeldir. Parametreler üzerinde yapılacak ayarlamalarla farklı memristör davranışları modellenenbilir. Memristör fonksiyonları aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$M(q) = k_1 q^2 - k_2$$

Memristör fonksiyonuna bağlı olarak memristör üzerindeki gerilim (V_M) ise

$$V_M = M(q) \bullet \dot{q} = (k_1 q^2 - k_2) \dot{q}$$

Devrede $v = V_M$ olduğundan yükün dinamik denklemi:

$$\dot{q} = \frac{V_M}{k_1 q - k_2}$$

Devrenin durum değişkenleri:

$v(t)$ Kondasatör gerilimi x_1 , $I_L(t)$ Bobinden geçen akımı x_2 ve $q(t)$ memristörün yükü ($\dot{q} = I_M$) ise x_3 olarak alınırsa durum denklemleri aşağıdaki gibi olur.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{C}(I_s - \frac{x_1}{R_s} - x_2 - \frac{x_1}{R_N} - \frac{x_1}{M(x_3)}) \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{L(x_2)}(x_1 - Rx_2) \\ \dot{x}_3 = \frac{x_1}{k_1 x_3^2 - k_2} \end{cases}$$

Yukardaki durum denklemlerini ifade eden diferansiyel sistemin, zamanla nasıl davrandığını (özellikle enerjisinin azalıp azalmadığını) görmek için Lyapunov yöntemi kullanılıyor.

Sistemin enerji benzeri Lyapunov aday fonksiyonu $H(x_1, x_2, x_3)$ sistem enerjilerini içerir:

$$H(x_1, x_2, x_3) = \frac{1}{2} C x_1^2 + \int_0^{x_2} \left[L(I_L) I_L \frac{dI_L}{ds} \right] ds + \int_0^{x_3} M(\sigma) d\sigma \quad (13)$$

Lyapunov aday fonksiyonun zamana göre türevi ise

$$\dot{H}(t) = C x_1 \dot{x}_1 + L(x_2) x_2 \dot{x}_2 + M(x_3) \dot{x}_3 \quad (14)$$

daha önceden belirttiğimiz durum değişkenlerini Lyapunaov aday fonksiyonun türevine yerine koyarsak:

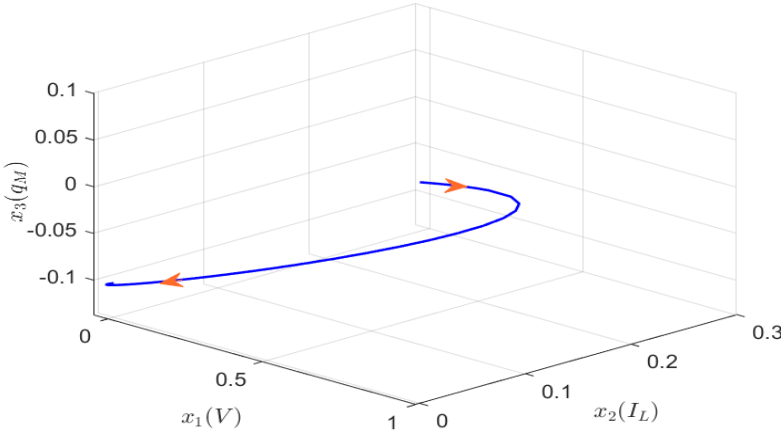
$$\dot{H}(t) = x_1 \left(I_s - \frac{x_1}{R_s} - x_2 - \frac{x_1}{R_N} - \frac{x_1}{M(x_3)} \right) + x_2 (x_1 - R x_2) + x_1 \quad (15)$$

Sadeleştirme sonrası:

$$\dot{H}(t) = x_1 (I_s + 1) - \left(\frac{1}{R_s} - \frac{1}{R_N} + \frac{1}{M(x_3)} \right) x_1^2 - R x_2^2 \quad (16)$$

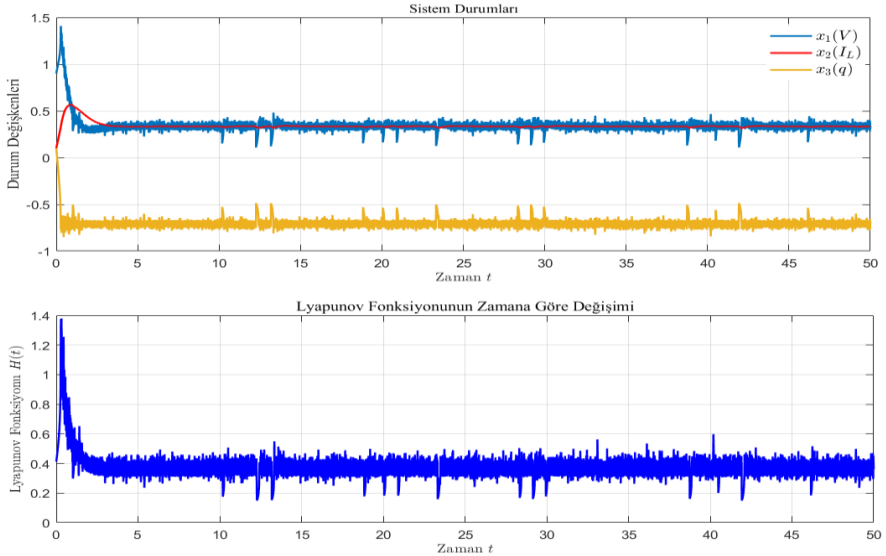
elde edilir.

$C = 1; L_{val} = 1 + 0.1 * I_L^2; R_s = 1; R_v = 1; I_s = 1;$
 $R = 1; k_1 = 1; k_2 = 1; M(x_3) (1 + 0.5 * \sin(x_3))$ değerleri seçilirse



Şekil 11. Faz Portresi

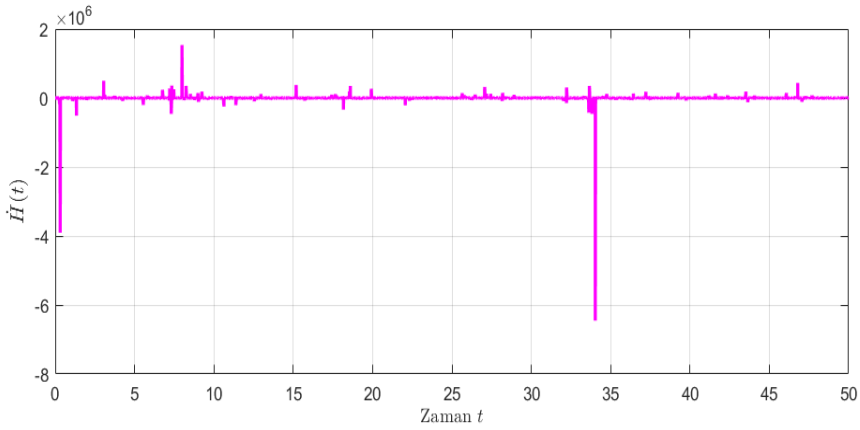
Başlangıçta (sağ üst), sistemdeki değişkenler yüksek bir noktadan başlıyor. Trajektori zamanla sola ve aşağıya doğru kıvrılarak durağan bir noktaya doğru gidiyor. Bu durum, sistemin kararlı olduğunu ve enerjisinin zamanla azaldığını gösteriyor. Memristörün yük-geçirgenliği $M(q)$ zamanla değişiyor, bu da sistemin zamanla "uyum sağlama" yeteneğini gösteriyor.



Şekil 12. Durum değişkenleri ve Lyapunov fonksiyonun zamana göre değişimi

Başlangıçta sistemin tüm değişkenleri salınımlı bir tepki veriyor. Yaklaşık 5 saniye içinde bu salınımlar sönümlenerek sistem dengeye ulaşıyor. Gözlemlenen küçük, yüksek frekanslı dalgalanmalar; sistemde özellikle memristör ve doğrusal olmayan bobin gibi nonlinear elemanların bulunduğunu düşündürmektedir.

Grafikte her ne kadar sistem zaman zaman dalgalanmalar gösterse de, Lyapunov fonksiyonunun zamanla azalması ve belirli bir seviyede sınırlı kalması, sistemin enerjisinin kontrol altında tutulduğunu gösterir. Bu durum, sistemin giderek daha kararlı bir duruma yaklaştığını ve dış etkiler veya içsel değişimlere rağmen dengesini koruyabildiğini ifade eder. Dolayısıyla, sistemin dinamikleri içinde meydana gelen geçici sapmalar uzun vadede bastırılır ve kararlılık durumu sürdürülebilir hale gelir.



Şekil 13. Lyapunov fonksiyonun zamana göre türevi

Grafikte görüldüğü gibi $\dot{H}(t)$ 'nin çoğunlukla negatif değerler alması ve $H(t)$ fonksiyonunun zamanla azalma eğiliminde olması, sistemin kararlı (stabil) bir yapıya sahip olduğunu gösterir. Bu durum, sistemin başlangıçtaki herhangi bir sapmadan sonra denge noktasına doğru geri döndüğünü ve zamanla durum değişkenlerinin küçüldüğünü ifade eder.

Öte yandan, eğer grafiklerde belirgin dalgalanmalar gözlemleniyorsa, bu sistemde osilasyonların veya geçici kararsızlıkların mevcut olabileceğine işaret eder. Ancak bu dalgalanmalar genellikle sönümleniyorsa, sistem genel anlamda stabilite yönünde ilerlemekte ve uzun vadede dengeye ulaşmaktadır.

Dolayısıyla, kısa süreli dalgalanmalar ve geçici kararsızlıklar sistemin tamamen kararsız olduğu anlamına gelmez; önemli olan, sistemin zaman içinde dengede kalma ve dengeye yönelme eğilimidir.

SONUÇ

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen teorik analizler ve sayısal simülasyonlar, memristör içeren *RLC* devrelerinde sistem kararlılığının memristans karakteristiklerine doğrudan bağlı olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle memristans fonksiyonunun pozitif tanımlı olduğu durumlarda sistemin toplam enerjisinin zamanla azaldığı ve bu bağlamda Lyapunov kararlılığı sağlandığı gözlemlenmiştir. Buna karşılık, memristans değerinin belirli yük bölgelerinde negatif değerlere ulaşması durumunda, sistemin enerjisinde artış meydana gelmiş ve bu durum potansiyel kararsızlık işaretleri olarak değerlendirilmiştir.

MATLAB ortamında gerçekleştirilen simülasyonlar, teorik çıkarımlarla tutarlı sonuçlar vermiş ve memristif parametrelerin sistem tepkileri üzerindeki belirleyici etkisini açıkça ortaya koymuştur. Bu bulgular, memristörlü *RLC* devrelerin yalnızca klasik devre kuramı çerçevesinde değil, aynı zamanda enerji-temelli kararlılık yaklaşımlarıyla da analiz edilmesi gerektiğini göstermektedir. Özellikle yük-bağımlı nitelik taşıyan memristans fonksiyonlarının dikkatle modellenmesi ve tasarım sürecinde göz önünde bulundurulması, devre performansı ve güvenilirliği açısından kritik bir gerekliliktir.

Bu bağlamda, memristör içeren *RLC* elektrik devrelerinin gelecekteki analog bilgi işleme, yapay sinaptik modülasyon ve nöromorfik sistemler gibi ileri düzey uygulamalarda daha güvenilir, kararlı ve öngörülebilir şekilde kullanılabilmesi için kararlılığa yönelik analizlerin derinleştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Özellikle memristif öğelerin devre üzerindeki etkilerinin yük, akım ve gerilim düzeylerinde ayrı ayrı değerlendirilmesi, sistem düzeyinde istikrarın sağlanmasına katkı sağlayacaktır. Bununla birlikte, yalnızca basit devre yapılarında değil, aynı zamanda daha karmaşık ve geri beslemeli memristif devre topolojilerinde de benzer enerji-temelli kararlılık analizlerinin yapılması, sistemlerin bütüncül güvenlik ve performans değerlendirmelerine olanak tanıyacaktır. Bu tür çalışmalar, gelecekteki entegre memristif devrelerin daha kararlı ve işlevsel tasarımlar ile

gerçekleştirilmesine zemin hazırlayacak, hem kuramsal hem de uygulamalı elektronik alanında önemli ilerlemelere katkıda bulunacaktır.

Sonuç olarak, memristif sistemlerin gelecekteki nöromorfik bilgi işleme uygulamalarında daha etkin ve güvenli bir şekilde kullanılabilmesi için kararlılığa yönelik çalışmaların sürdürülmesi gereklidir. Ayrıca, daha karmaşık devre topolojilerinde benzer analizlerin yapılması, sistem düzeyinde istikrarın sağlanmasına katkı sağlayacaktır.

REFERANSLAR

- Biolek, Z., Biolek, D., & Biolková, V. (2009). SPICE modeling of memristive, memcapacitive and meminductive systems. *European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD)*, 249–252.
- Chen, L., Bao, B., & Zhang, Y. (2015). Stability analysis of memristor-based systems via Lyapunov functions. *Nonlinear Dynamics*, 80(3), 1125–1135.
- Chua, L. O. (1971). Memristor—The missing circuit element. *IEEE Transactions on Circuit Theory*, 18(5), 507–519.
- Jo, S. H., Chang, T., Ebong, I., Bhadviya, B. B., Mazumder, P., & Lu, W. (2010). Nanoscale memristor device as synapse in neuromorphic systems. *Nano Letters*, 10(4), 1297–1301.
- Khalil, H. K. (2002). *Nonlinear Systems* (3rd ed.). Prentice Hall.
- Mead, C. (1990). Neuromorphic electronic systems. *Proceedings of the IEEE*, 78(10), 1629–1636.
- Pershin, Y. V., & Di Ventra, M. (2011). Memory effects in complex materials and nanoscale systems. *Advances in Physics*, 60(2), 145–227.
- Slotine, J.-J. E., & Li, W. (1991). *Applied nonlinear control*. Prentice Hall.
- Strukov, D. B., Snider, G. S., Stewart, D. R., & Williams, R. S. (2008). The missing memristor found. *Nature*, 453(7191), 80–83.
- Yang, F., Ma, J., & Wu, F. (2024). Review on memristor application in neural circuit and network. *Chaos, Solitons & Fractals*, 187, Article 115361. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2024.115361>
- Zhang, L., Liu, S., & Yang, X. (2013). Stability analysis of memristor-based neural networks via Lyapunov functions. *Neural Computing and Applications*, 22(7-8), 1657–1664. <https://doi.org/10.1007/s00521-012-1115-5>

Yüksek Sıcaklıklara Sahip Yüzeylerin Çarpan Jet Çapraz Akış Kombinasyonu İle Soğutulmasının Sayısal Olarak İncelenmesi

Yusuf ARINIK¹
Tolga DEMİRCAN²

- 1- Makine Mühendisi; RSTEK A.Ş. Ostim OSB Mahallesi 2828. Sokak No:2J Yenimahalle, Ankara.
yusufarinik@gmail.com ORCID No: 0000-0002-4292-8259
- 2- Doç. Dr.; Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği
Bölümü, 71450, Kırıkkale tolgademircan@gmail.com ORCID No: 0000-0003-4805-6428

ÖZET

Yapılan bu çalışmada yüksek sıcaklığa sahip bir elektronik elemanın çapraz akış ve çarpan jet kombinasyonu ile soğutulması incelenmektedir. Yapılan çalışmada farklı V_j/V_k oranlarının yanı sıra farklı b/a oranları ile soğutma simülasyonları yapılmıştır. Simülasyonlar sonucunda elde edilen verilerde V_j/V_k oranının artması ile birlikte soğumanın arttığı gözlemlenmiştir. b/a oranı değişiklikleri göz önüne alındığında ise b/a oranının ısı transferi miktarı ve buna bağlı olarak Nusselt Sayısı ile ters orantılı olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler – Çapraz Akış, Çarpan Jet, Soğutma, Yüksek Sıcaklık, Kanal İçi Soğutma.

GİRİŞ

Günümüzde mühendislik alanında kullanılan elemanların yüksek sıcaklıklardan daha düşük sıcaklıklara düşürülmesi önemli bir husus haline gelmiştir. Teknolojinin gelişmesi ve gelişen teknolojinin istekleri sebebi ile oluşan ısı miktarlarında artış görülmektedir. Bu artış sebebi ile daha etkin soğutma yapabileceğimiz sistemler önem kazanmaktadır. Mühendislik uygulamalarında yüzey soğutma, ısı transferi ve akış yönetimi gibi kritik süreçlerin başarısı, büyük ölçüde akışkanların yönlendirilme biçimine bağlıdır. Bu bağlamda jet akışları, yüksek verimli enerji ve madde transferi sağlamaları nedeniyle çeşitli endüstriyel sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Yüksek hızda bir çıkış noktasından başka bir akışkan ortamına püskürtülen akışa jet akış denir. Çarpan jet ise, yüksek hızla hareket eden bir akışkanın yüzeye çarpması ile oluşan akış türüne verilen isimdir. Çarpan jetler, yüzeydeki ısı transferini artırdıkları için endüstriyel uygulamalarda sıkça tercih edilir. Bu tür jetler, genel olarak serbest jet bölgesi, durma bölgesi ve duvar jeti bölgesi olarak üç ana bölgede incelenmektedir (Öztürk 2020:1). Serbest jet bölgesi olarak adlandırılan bu bölgede jetin hızı ve basıncı, çıkış noktasından uzaklaştıkça değişmektedir. Çevre akışkanı ile olan etkileşim nedeniyle jet akışı genişler ve merkezdeki yüksek hız bölgesi daralır. Jetin yüzeye çarptığı an ise çarpma bölgesi oluşur. Burada akışın yönü değişir ve yüzeye paralel bir hareket kazanır. Son olarak, duvar jeti bölgesinde jet, ortam akışkanıyla etkileşimde bulunarak yavaşlar ve durma eğilimi gösterir (Öztürk 2020:2).

Özellikle serbest jetlerin sabit bir yüzeye yönlendirilmesiyle oluşan "çarpan jet" düzenekleri, sundukları yüksek lokal ısı transferi kapasitesiyle hem araştırmacılar hem de tasarım mühendisleri için önemli bir araştırma konusu olmuştur. Bu klasik konfigürasyonların ötesine geçilerek, jetin hareket doğrultusuna dik bir çapraz akışla etkileşime girmesi sonucu ortaya çıkan

sistemler (çapraz akış çarpan jetleri) daha karmaşık ancak aynı zamanda daha işlevsel akış özellikleri sergilemektedir.

Çarpan jet uygulaması farklı geometrik şekillerdeki lülelerden veya yarıklardan soğutulması istenen yüzeye akışkanın püskürtülmesi ve püskürtülen akışkanın yüzeye çarptırılması ile uygulanır. Çarpan jet uygulamalarının ana prensibi akış esnasında oluşan sınır tabaka bölgesinin inceltilmesi veya bozulması ile birlikte ısı transfer miktarının artırılmasıdır. Böylece yüzey ve akışkan arasında yerel olarak normal uygulamalardan daha yüksek ısı transfer katsayısı elde edilerek akışkanın çarptığı yüzeyde kütle ve ısı transferi sağlanır. Çapraz akış çarpan jetler, hem akışkanlar mekaniği açısından sunduğu zengin fiziksel yapılar hem de çeşitli mühendislik alanlarında kullanılabilirliği nedeniyle son yıllarda giderek artan bir ilgiyle araştırılmaktadır.

Bu kompleks jet konfigürasyonları, özellikle yüksek sıcaklık ortamlarında ısı yüklerinin etkin şekilde kontrol edilmesini gerektiren uygulamalarda (örneğin gaz türbini kanatçıklarının soğutulması, mikro elektronik donanımların termal yönetimi ve yanma odalarının iç dizaynı gibi alanlarda) vazgeçilmez bir rol oynamaktadır. Ancak çapraz akışın bozucu etkisi ile jetin etkileşim bölgesinde ortaya çıkan üç boyutlu türbülans yapıları, sistemin davranışını öngörmeyi ve mühendislik açısından modellemeyi zorlaştırmaktadır. Bu sebeple hem deneysel hem de sayısal yöntemlere dayalı çok boyutlu analizler, bu sistemlerin daha derinlemesine anlaşılması açısından kritik öneme sahiptir. Çarpan jet uygulamalarında ısı transferini etkileyen başlıca unsurlar akışkanın püskürtüldüğü lülenin geometrisi, akışkanın lüleden çıkış anındaki hızı, akışkanın sıcaklığı, akışkanın yüzeye çarpma açısı ve yüzey ile lüle arasındaki mesafedir.

Bu çalışma, çapraz akış çarpan jet yapılarını çok yönlü bir perspektifle ele alarak, akış davranışlarını ve ısı transferi performansını detaylı biçimde incelemeyi hedeflemektedir. Çarpan jetler ve/veya çapraz akışlar yardımı ile elektronik elemanların soğutulması üzerine literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalardan bir kısmı aşağıda detaylı olarak verilmiştir. Baydar, deneysel bir yaklaşımla gerçekleştirdiği çalışmada, kanal tabanına entegre edilen tekli ve çiftli jet yapılarını kullanarak, üst yüzeye dik olarak yönlendirilen hava jetlerinin oluşturduğu akış dinamiklerini incelemiştir. Bu çalışmada, iki jet arasındaki mesafe L sembolüyle ifade edilmiştir. Tek jet konfigürasyonları için çap ve uzunluk 5 mm, çift jetlerde ise çap 4 mm ve uzunluk yine 5 mm olarak belirlenmiştir. Reynolds sayısı, tekli jetlerde 500–10000 arasında, çiftli jetlerde ise 300–10000 arasında değiştirilmiştir. Jet ile hedef yüzey arasındaki mesafenin jet çapına oranı olan H/D , 0,5 ila 4 arasında çeşitli değerlerle test edilmiştir. Elde edilen bulgular, Reynolds sayısının 2700'ün üzerinde olduğu ve H/D oranının 2'den düşük kaldığı durumlarda, çarpma yüzeyinde çevre basıncından daha düşük basınca sahip bölgeler oluştuğunu göstermektedir. Araştırmacı, bu

düşük basınçlı alanların akış içerisindeki ikincil türbülans tepe noktalarıyla ilişkili olduğunu ifade etmektedir.

Bilen, gerçekleştirdiği deneysel çalışmada, dairesel kesitli bir nozuldan çıkan hava jetinin düz bir yüzeye farklı açılarla (dikey ve eğik) yönlendirilmesi durumunda ısı transferinde meydana gelen değişimleri ele almıştır. Bu deneylerde jetin Reynolds sayısı 10000–40000 aralığında tutulurken; nozul-yüzey mesafesinin çap ile oranı $H/D=6$ –ve çarpma açısı 45° – 90° arasında değiştirilmiştir. Bulgular, özellikle daha yüksek H/D oranlarında ısı transferinde belirgin bir azalma yaşandığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, 45° eğimle yönlendirilen jetlerin, 90° ’lik dik çarpma durumuna göre durgunluk noktasında daha düşük ısı transfer katsayıları ürettiği gözlemlenmiştir. Örneğin, H/D oranı 7, 10 ve 14 olduğunda sırasıyla yaklaşık %6, %18 ve %22’lik azalma meydana gelmiştir. Bu durum, eğik çarpma açılarının ve artan jet-yüzey mesafelerinin soğutma etkinliğini olumsuz etkilediğini göstermektedir.

Chirac ve Ortega tarafından yürütülen sayısal çalışmada ise, düzlemsel bir yüzeye çarpan jet akışının ısı transferi üzerindeki etkileri detaylı biçimde incelenmiştir. Simülasyonlar, Reynolds sayısı 250 ile 750 arasında, Prandtl sayısı sabit 0,7 olacak şekilde ve jetin hedef yüzeye olan uzaklığının genişliğine oranı $H/W=5$ kabul edilerek gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar, Reynolds sayısının 585–650 aralığında akışın laminar rejimden geçiş bölgesine girdiğini belirlemişlerdir. Bu geçiş bölgesinde, Reynolds sayısı arttıkça Nusselt sayısının da doğrusal bir artış gösterdiği rapor edilmiştir. Reynolds sayısı 750’ye ulaştığında ise akış tamamen türbülanslı hale gelmiş, bu noktada ısı transferi değerleri laminar rejime göre anlamlı ölçüde daha yüksek düzeylere çıkmıştır. Bu sonuçlar, türbülanslı akışın çarpma jetlerinde ısı transfer mekanizmasını ciddi şekilde güçlendirdiğini ortaya koymaktadır. Chung ve arkadaşları, kararsız akış koşulları altında çalışan çarpma jetlerinin momentum ve ısı transferi davranışlarını detaylı olarak incelemişlerdir. Araştırmada, anlık akış ve sıcaklık dağılımları kapsamlı biçimde analiz edilmiş, ve kararsız akışın birincil girdaplar tarafından tetiklendiği belirlenmiştir. Bu girdapların konumu, özellikle durma noktasında Nusselt sayısını etkileyerek, jet ile yüzey arasındaki etkileşimi ve dolayısıyla ısı transferini doğrudan şekillendirmektedir.

Gordon ve Akfırat ise deneysel çalışmalarıyla, hava jetlerinin ısı transfer performansının yalnızca hız veya mesafe gibi temel parametrelerle açıklanamayacağını ortaya koymuşlardır. Çalışma, jet içindeki türbülanslı yapıların, ısı taşınım süreçleri üzerinde belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir.

Maghrabie ve ekibi, bir kanal boyunca sıralanmış yedi elektronik elemanın soğutulmasını sayısal olarak değerlendirmiştir. Çalışmada, yalnızca çapraz akış (CF) ve çarpan jet ile çapraz akışın kombinasyonu (JICF) karşılaştırılmıştır. Jetin kanal içerisindeki konumu değiştirilerek farklı senaryolar analiz edilmiş ve simülasyonlar ANSYS FLUENT kullanılarak

gerçekleştirilmiş, türbülans modellemesi için RNG k- ϵ modeli tercih edilmiştir. Sonuçlar, JICF kullanımının özellikle jetin ilk dört pozisyonunda CF'ye göre daha yüksek soğutma etkinliği sağladığını göstermektedir. En yüksek ortalama Nusselt sayısı üçüncü pozisyonunda elde edilmiştir.

Mergen, sabit ısı akısına sahip bir elektronik elemanın çarpan jet ve kanal içi akış kombinasyonu ile soğutulmasını sayısal olarak analiz etmiştir. Kanal Reynolds sayısı 2000–8000, jet Reynolds sayısı 10000–25000 ve jet-yüzey mesafesinin çap oranı (H/D) 1,5–2 arasında değiştirilmiştir. Simülasyonlar ANSYS FLUENT yazılımında, sonlu hacimler yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiş, türbülans modellemesi için Realizable k- ϵ ile iyileştirilmiş duvar fonksiyonları uygulanmıştır. Çalışma, jet Reynolds sayısının kanal Reynolds sayısına oranının azalmasının, elektronik eleman yüzey sıcaklığını artırdığını ve ısı transfer performansını düşürdüğünü ortaya koymuştur.

Miyazaki ve Silberman, laminar özellikteki iki boyutlu bir çarpan jetin düzlemsel bir yüzeye çarpması durumunu sayısal olarak incelemişlerdir. Özellikle jet lülesi ile hedef yüzey arasındaki boyutsuz mesafenin (H) etkileri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, $H = 1$ olduğunda hem yerel sürtünme katsayısı hem de Nusselt sayısının maksimum seviyeye ulaştığını, H'nin artmasıyla bu değerlerin sırasıyla yaklaşık 3,5 ve 1,7 kat azaldığını göstermektedir. Jetin yüzeye yakın konumlandırılması, hem momentum hem de ısı taşınımını önemli ölçüde artırmaktadır.

Morris ve arkadaşları, FLUENT tabanlı sayısal çalışmalarla çarpan jetlerin akış yapısını incelemişlerdir. Düşük Reynolds sayılarında, jet bölgesinde üçten fazla sirkülasyon alanı gözlemlenmiş, Reynolds sayısı arttıkça ve lüle çapı ya da lüle-yüzey mesafesi büyüdükçe, bu sirkülasyon alanlarının jet ekseninden daha uzak radyal konumlara kaydığı belirlenmiştir. Bu bulgular, çarpan jet akışının yapısal davranışının bu parametre değişikliklerine oldukça duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Örs tarafından gerçekleştirilen simülasyon çalışması, sabit sıcaklıktaki bir elektronik bileşenin, kanal içine yerleştirilmiş çarpan jet ile farklı geometrik pah yükseklikleri ve Reynolds sayılarında nasıl soğutulduğunu araştırmaktadır. Bu amaçla ANSYS FLUENT (v17.2) yazılımı kullanılarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonları yapılmış ve türbülanslı akışlar için iyileştirilmiş duvar fonksiyonlu k- ϵ modeli seçilmiştir. Çalışmada incelenen parametreler arasında jet Reynolds sayısı 0–15000, kanal Reynolds sayısı 0–8000 ve pah yüksekliği 0–4 mm bulunmaktadır. Simülasyon sonuçları, en yüksek ısı transferinin 4 mm pah yüksekliği, 15000 jet Reynolds ve 8000 kanal Reynolds değerlerinde meydana geldiğini göstermiştir. Ayrıca, pah yüksekliğinin artırılması ve jet hızının yükseltilmesiyle, elektronik bileşen yüzeyindeki ısı taşınımının önemli ölçüde arttığı saptanmıştır.

Öztürk ise, çarpan jet ile çapraz akışın kombinasyonu altında bir elektronik elemanın termal performansını sayısal olarak analiz etmiş ve dört farklı geometrik tasarımın V_j/V_k ve H/D oranlarına bağlı etkilerini

karşılaştırmıştır. Simülasyonlarda ANSYS FLUENT ve Realizable k- ϵ türbülans modeli kullanılmıştır. Çalışmanın bulguları, V_j/V_k oranının artmasının ve H/D oranının düşmesinin ısı taşınımını artırdığını göstermektedir. Özellikle ikinci ve dördüncü geometriler, genel olarak en yüksek ısı transferi değerlerini sunarken, üçüncü geometri düşük H/D ve V_j/V_k koşullarında daha iyi bir performans göstermiştir. Ayrıca, kanatçık açısının değiştirilmesinin termal etkinliği etkilediği gözlenmiştir. Bu sonuçlar, çarpan jet ve çapraz akış kombinasyonunun elektronik soğutmada etkili bir yöntem olduğunu ve akış parametreleri ile geometrik tasarımın optimize edilmesinin önemini vurgulamaktadır.

Saleha ve arkadaşları, sabit sıcaklıktaki elektronik bileşenlerin soğutulmasını artırmak amacıyla, çarpan jetlerin kanal içi hava akışıyla birlikte kullanımını detaylı bir sayısal modelleme çalışması ile değerlendirmişlerdir. Simülasyonlar ANSYS CFX yazılımında SST k- ω türbülans modeli kullanılarak yapılmıştır. Çalışmada, jet Reynolds sayısı 0–5115, pah yüksekliği 0–4 mm, kanal Reynolds sayısı 3410 ve H/D oranı 2,5 olarak belirlenmiştir. Sonuçlar, 4 mm pah yüksekliği ve Re_j/Re_k oranının 1,5 olduğu senaryoda yaklaşık %26 oranında ısı transfer artışı sağlandığını göstermektedir. Bu, mikro-elektronik soğutma sistemlerinde küçük geometrik değişikliklerin performansı doğrudan etkilediğini ortaya koymaktadır.

Yan ve Saniei tarafından yapılan deneysel araştırmalar, dairesel jetlerin bir yüzeye çarpma açısı ve mesafesinin yerel ısı transfer katsayılarını nasıl etkilediğini incelemiştir. Bulgular, jetin yüzeye dik olarak çarpması durumunda mesafenin azaltılmasının akış simetrisinde bozulmalara neden olduğunu ve bunun ısı transfer performansını doğrudan etkilediğini ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, çarpan jet tasarımlarında akış davranışının ve ısı transferinin optimize edilmesinde yol gösterici bilgiler sunmaktadır.

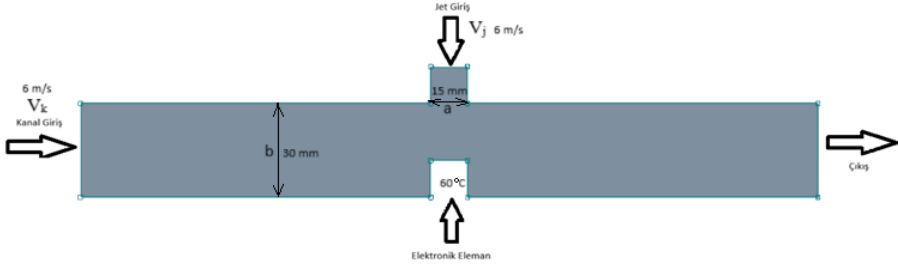
Görüldüğü üzere mevcut literatürün önemli bir bölümü, sadece çarpan jetler veya sadece çapraz akış kullanılarak yapılan soğutma üzerine odaklanmış durumdadır. Buna karşın, çarpan jet ve çapraz akışın birlikte kullanılması ile elektronik elemanların soğutulması üzerine yapılmış araştırmalar oldukça kısıtlı kalmıştır. Bu nedenle, bu çalışmada çapraz akış çarpan jet kombinasyonu ile bir elektronik elemanın soğutulması incelenmiştir. Çalışmada amaç iki yalıtılmış levha arasında bulunan belirli bir sıcaklıktaki bir elektronik elemanın soğutulmasıdır. Üst tarafta yer alan levhanın ortasında bir lüle bulunmaktadır. Çalışma boyunca lülenin çapı “a” olarak adlandırılacaktır. Alt tarafta bulunan levhanın ortasında her bir kenarı 15 mm boyutunda olan bir elektronik eleman vardır. Her iki levha arasındaki mesafe çalışma boyunca “b” olarak adlandırılacaktır. Üst levhada yer alan lüleden giren havanın hızı çalışma boyunca V_j olarak adlandırılacak, kanaldan giren havanın hızı ise V_h olarak adlandırılacaktır. Çalışmada b/a oranı ve V_j/V_k oranının elektronik elemanın soğutulması üzerine etkileri incelenecektir. Problemin genel görünüşü Şekil 1’de verilmiştir.

PROBLEMİN TANIMI VE MATEMATİKSEL FONKSİYONLAR

Bu araştırmada, sabit sıcaklığa sahip küp şeklindeki bir elektronik elemanın, çarpan jet ile çapraz akış kombinasyonu kullanılarak soğutulması ele alınmıştır. İncelenen eleman, dikdörtgen kesitli bir kanalın ortasına yerleştirilmiştir. Soğutma, elemanın tam üzerinde bulunan ve V_j hızıyla hava akışı sağlayan dairesel bir lüle (çapı “a” olarak tanımlanmıştır) ile kanal boyunca V_k hızıyla ilerleyen hava akışı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Bu iki hava akışının eleman yüzeyine çarpması, çevresinde karmaşık bir akış yapısının oluşmasına yol açmaktadır. Kanalın tüm yüzeyleri ısısal olarak yalıtımlı (adyabatik) tutulmuştur. Elektronik elemanın sıcaklığı sabit 60°C olarak belirlenirken, V_j ve V_k hızındaki havaların sıcaklığı 20°C olarak simülasyonlarda kullanılmıştır. Çalışma kapsamında, b/a oranı ve V_j/V_k oranlarının elektronik eleman etrafındaki akış düzeni ve ısı transferi üzerindeki etkileri analiz edilmiştir.

Modellerin Tanıtımı

Çalışmada ısı transferi simülasyonları için dört farklı b/a oranında ve altı farklı V_j/V_k oranında modeller oluşturulmuştur. Bu oluşturulan modeller yardımı ile elektronik elemanın çevresinde oluşan karmaşık akış yapısı ve gerçekleşen ısı transferi incelenmiştir. Çalışmada incelenen modellerden b/a oranı iki ve V_j/V_k oranı bir olan model Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1: Modelin Şematik Gösterimi

Çalışma genelinde kanal uzunluğu 1000 mm ve kanal genişliği 150 mm olarak belirlenmiştir. b/a oranı sırasıyla b/a=1 - b/a=2 - b/a=3 - b/a=6 olarak değiştirilmiştir. V_j/V_k oranı ise yine sırasıyla $V_j/V_k=0,25$ - $V_j/V_k=0,5$ - $V_j/V_k=1$ - $V_j/V_k=2$ - $V_j/V_k=3$ olarak değiştirilerek simülasyonlar tamamlanmıştır.

Çalışmada matematiksel formülasyonlar için yapılan kabüller aşağıdaki gibidir;

- Akış sıkıştırılamaz kabul edilmiştir,
- Akışın üç boyutlu olduğu kabul edilmiştir,
- Akış esnasında oluşan yer çekimi etkileri ihmal edilmiştir,
- Akış kararlı (zamandan bağımsız) olarak kabul edilmiştir,

- Akış tipi türbülans olarak kabul edilmiştir,
- Akış esnasında doğal taşınım sebebi ile oluşacak etkiler ihmal edilmiştir.
- Akış esnasında kanal içerisinde akış alanında oluşacak ısı transferi etkisi çok düşük değerlerde olması sebebi ile akışkanın viskozite, yoğunluk ve ısıl iletkeblığı gibi özelliklerinin sıcaklıkla olacak değişimleri ihmal edilmiştir.

Temel Denklemler

Akış ve ısı transferi davranışlarını analiz edebilmek için, sistemin diferansiyel denklemlerinin uygun sınır koşulları ile sayısal olarak çözülmesi gerekmektedir. Bu denklemler, enerji, süreklilik, momentum ve türbülans denklemlerini kapsamaktadır. Çözümler aracılığıyla, basınç, hız ve sıcaklık dağılımları elde edilebilmiştir. Elde edilen bu dağılımlar kullanılarak, elektronik eleman üzerinde ortaya çıkan ortalama ve yerel Nusselt sayıları ile birlikte kanal içerisindeki basınç kayıpları da hesaplanabilmiştir. Çalışmada yapılan varsayımlar doğrultusunda, temel diferansiyel denklemlerin genel formu aşağıda sunulmuştur.

- Süreklilik Denklemi (Öztürk 2020:27)

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

- Momentum Denklemi (Öztürk 2020:27)

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right] \quad (2)$$

- Enerji Denklemi (Öztürk 2020:28)

$$\rho C_p \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{u}_i \cdot \bar{T}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[k \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} - \rho C_p \overline{T' u'_i} \right] \quad (3)$$

- Türbülanslı Kinetik Enerji Denklemi (Öztürk 2020:28)

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (4)$$

- Bu denklemde yer alan türbülanslı kinetik enerjinin üretimi aşağıdaki şekildedir. (Öztürk 2020:29)

$$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (5)$$

- Türbülanslı Kinetik Enerji Yutulma Denklemi (Öztürk 2020:29)

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

- Bu denklemde görülen türbülans viskozitesi aşağıdaki şekildedir. (Öztürk 2020:29)

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

Sınır Şartları

Problemin diferansiyel denklemlerinin çözülebilmesi için çalışma koşullarına uygun sınır şartlarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında ele alınan problemin sınır şartları aşağıdaki şekildedir.

- Duvar Sınır Şartı

Bu çalışmada duvar sınır şartı olarak duvarlarda kaymazlık sınır şartı belirlenmiştir. Duvarlardaki tüm hız bileşenlerinin sıfır olduğu kabul edilmiştir. Ayrıca duvarların yalıtılmış olduğu yani $\partial T / \partial n = 0$ olacak şekilde sınır koşulu tanımlanmıştır.

- Elektronik Eleman Yüzey Sınır Şartları

Bu çalışmada elektronik elemanın yüzeyinin sabit 60 °C sıcaklıkta olduğu kabul edilmiştir. Ayrıca elektornik elemanın duvar sınır şartları kanal duvar sınır şartlarında olduğu gibi kaymazlık sınır şartı olduğunu ve tüm hız bileşenlerinin sıfır olduğu kabul edilmiştir.

- Kanal Giriş Sınır Şartları

Çalışmada havanın kanal içerisine V_k hızında girdiği kabul edilmiş ve tüm kanal boyunca akışına devam ettiği kabul edilmiştir. V_k hızı Reynolds sayısı ve kanal hidrolik çapı yardımıyla hesaplanmış olup tüm çözümler için sabit kabul edilmiştir. Havanın kanala giriş sıcaklığı ise T_k olarak adlandırılmıştır.

- Havanın Çıkış Sınır Şartları

Çalışma boyunca havanın çıkışı atmosfer koşullarına olduğu kabul edilmiştir. Yani kanalın çıkış basıncı ile atmosfer basıncı birbirine eşittir.

Çalışmada Kullanılan Parametrelerin Hesabı

Bu problemin çözümü için kullanılan Reynolds sayısı (Re), Nusselt sayısı (Nu), hidrodinamik giriş uzunluğu ve taşınım ısı transferi katsayısı (h) parametrelerinin hesaplanması için kullanılan denklemler alt başlıklar halinde açıklanmıştır.

- Kanal Hidrolik Çapı (Öztürk 2020:31)

$$D_{kh} = \frac{4A_k}{P_k} \quad (8)$$

Kanal hidrolik çapı denkleminde yer alan A_k kanalın kesit alanı, P_k kanalın ıslak çevresidir. (Öztürk 2020:32)

$$A_k = (b) (S_z) \quad (9)$$

$$P_k = 2(b + S_z) \quad (10)$$

Bu denklemlerde görülen b kanalın yüksekliğini, S_z ise kanalın genişliğini temsil etmektedir. Yapılan simülasyonlarda $S_z = 150$ mm sabittir.

- Reynolds Sayısı

Çalışmada kullanılacak hızları elde etmek için Reynolds sayısı formülüne ihtiyacımız bulunmaktadır. Çalışmada iki farklı Reynolds sayısı kullanılmış olup biri kanal Reynolds sayısı diğeri ise jet Reynolds sayısıdır. Aşağıda görülen eşitlik kanal Reynolds sayısının hesaplanması için kullanılmıştır. (Öztürk 2020:31)

$$Re_k = (\rho V_k D_{kh}) / \mu \quad (11)$$

Jet Reynolds sayısının hesaplanabilmesi için ise aşağıda verilen eşitlik kullanılmıştır. (Öztürk 2020:31)

$$Re_j = (\rho V_j D_j) / \mu \quad (12)$$

- Yüzey Taşınım Isı Transfer Katsayısı

Çalışmada elektronik elemanın yüzeyinde ortalama taşınım ısı transferi katsayısı aşağıda görülen eşitlik yardımı ile hesaplayabilmekteyiz. (Öztürk 2020:31)

$$h = \frac{\dot{q}''}{T_w - T_b} \quad (13)$$

Bu denklemde yer alan T_w değeri elektronik elemanın yüzey sıcaklığını, T_b ise havanın giriş sıcaklığını temsil etmektedir. $\dot{q}''$ ise elektronik elemanın ısı akısını temsil etmektedir.

- Nusselt Sayısı

Çalışmada kullanılan elektronik elemanın yüzeyindeki ortalama Nusselt sayısı ise aşağıda verilen eşitlik yardımıyla hesaplanmıştır. (Öztürk 2020:31)

$$\overline{Nu} = \frac{hL}{k_h} \quad (14)$$

Bu denklemde, $\overline{Nu}$, elektronik eleman yüzeyindeki ortalama Nusselt sayısını temsil etmektedir. h , yüzeyden çevreye olan taşınım ile gerçekleşen ısı transferinin şiddetini belirleyen ısı transfer katsayısıdır. L , elektronik elemanın akış yönündeki uzunluğu olup bu çalışmada 15 mm olarak alınmıştır. k_h ise, hava için geçerli olan ısı iletkenlik katsayısını ifade eder ve bu değer $k_h = 0,02514$ W/mK olarak kabul edilmiştir.

SAYISAL ÇÖZÜM YÖNTEMİ

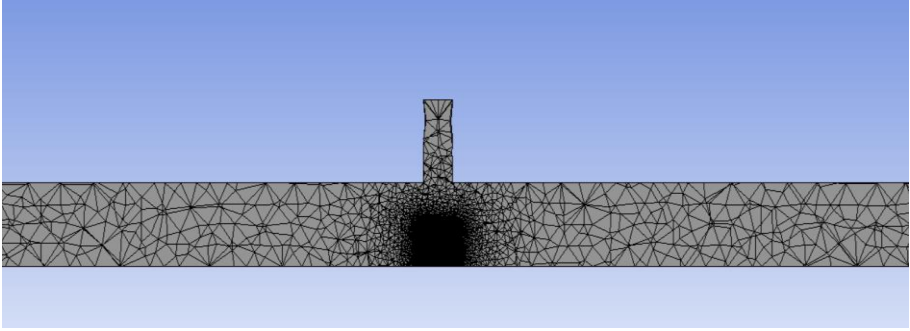
Bu araştırmada ele alınan sistemin diferansiyel denklemleri (momentum, süreklilik, türbülans ve enerji denklemleri), uygun sınır koşulları uygulanarak Ansys Fluent yazılımı kullanılarak sayısal olarak çözülmüştür. Sayısal analiz için, hesaplama alanında sınırlı sayıda noktadan oluşan bir ağ

yapısı oluşturulmuştur. Bu ağ üzerinde, diferansiyel denklemler uygun sınır koşulları ile çözülerek hız, basınç ve sıcaklık dağılımları belirlenmiştir.

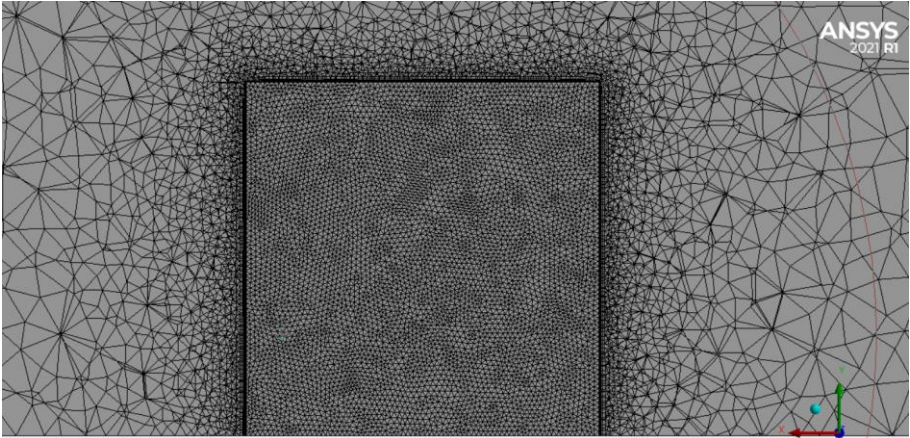
Sayısal çözüm aracı olarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) uygulaması olan Ansys Fluent tercih edilmiştir ve türbülanslı akış modellemesi için k- ϵ türbülans modeli kullanılmıştır.

Ağ Yapısı

Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde, temel denklemlerin doğru şekilde çözülmesi için problem alanının küçük kontrol hacimlerine bölünerek bir ağ yapısı oluşturulması gerekmektedir. Ağ yoğunluğu, yani kontrol hacimlerinin sayısı, çözümün doğruluğunu artırmak için önemlidir; ancak aşırı yoğun ağlar, gereksiz hesaplama süresi artışı ve yuvarlama hatalarına yol açabilir. Bu nedenle, ideal bir ağ yapısı belirlenerek simülasyonlar bu yapı üzerinden yürütülmüştür. Çalışmada kullanılan ağ yapısının genel görünümü Şekil 2 ve Şekil 3'te sunulmuştur.



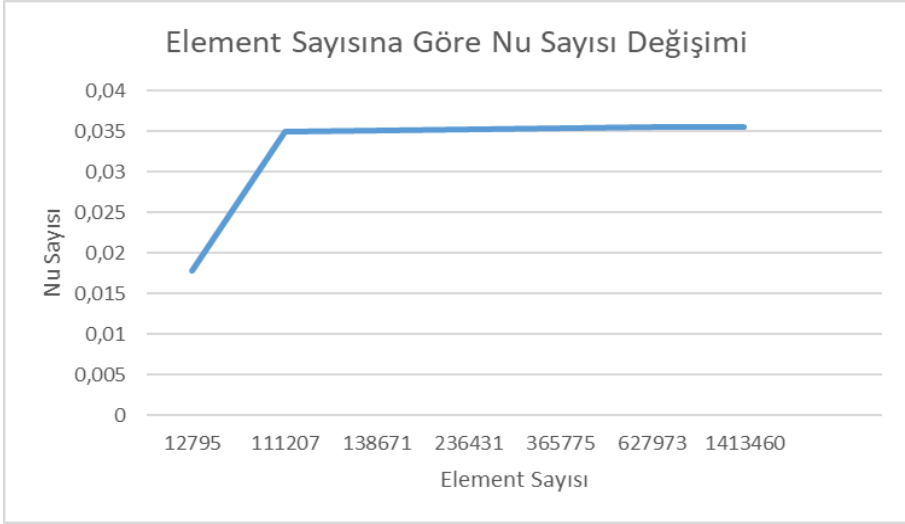
Şekil 2: Problemin Ağ Yapısı



Şekil 3: Elektronik Elemanın Bulunduğu Bölgenin Ağ Yapısı

Ağ Yapısının Çözümünden Bağımsızlığı

Çözümün ağ yoğunluğuna (düğüm sayısına) bağımlılığını değerlendirmek amacıyla, farklı ağ yapıları oluşturulmuş ve bu yapılar için elektronik eleman üzerindeki ortalama Nusselt sayıları karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, çözümün doğruluğu ve hesaplama verimliliği açısından en uygun ağ yapısı belirlenmiş ve tüm diğer sınır koşulları için bu yapı kullanılmıştır. Ağ yapısının seçim süreci ve sonuçları, karşılaştırmalı grafikte Şekil 4'te sunulmuştur.



Şekil 4: Ortalama Nu sayısının ağ yapısındaki element sayısına göre değişimi

Yakınsama Kriteri

Bu çalışmada elde edilen sayısal çözüm sonuçlarının yakınsaması, iki temel kriter doğrultusunda değerlendirilmiştir. İlk olarak çözülecek olan her bir diferansiyel denklem için uygun bir yakınsama kriter değeri belirlenmiştir. Eğer bu değerın üstünde bir çözüm hassasiyetine ulaşıldı ise çözüm iterasyon sayısı yeterli kabul edilmiştir. Bu kapsamda, momentum ve türbülans denklemleri için yakınsama toleransı 10^{-3} , enerji denklemi için ise daha hassas bir değer olan 10^{-6} olarak belirlenmiştir.

İkinci kriter ise, kütleli denge prensibine dayanmaktadır. Bu yöntemde, çözüm hacmine giren ve çıkan toplam kütleli debi karşılaştırılarak net kütleli debi farkı hesaplanmıştır. Bu farkın 10^{-7} seviyesinden küçük olması, çözümün kütleli olarak dengede olduğunu göstermektedir.

Belirtilen her iki kriterin sağlanması durumunda, sayısal çözümün yeterli doğrulukta yakınsadığı kabul edilmiştir.

BULGULAR VE TARTIŞMALAR

Bu çalışmada bir kanal içerisinde bulunan bir elektronik elemanın soğutulması problemi ele alınmıştır. Problemin çözümü için ise çapraz akış ve çarpan jet kombinasyonu kullanılmıştır. Problemin çözümü sayısal olarak HAD uygulaması olan Ansys Fluent programı aracılığı ile yapılmıştır. Kanal giriş hızı sabit olarak V_j/V_k oranı altı farklı değer için simüle edilmiştir. Ayrıca kanalın yüksekliği sabit tutularak dört farklı değer için simülasyonlar yapılmıştır. Hesaplanan sonuçlar grafikler halinde aşağıda paylaşılmıştır.

Çalışmada Kullanılan Sayısal Değerler

Çalışmada incelenen problemin geometrik ölçülerini belirlemek adına literatürde daha önce yapılmış olan bazı çalışmalar incelenerek faydalanılmıştır. Daha önce yapılan bir çok çalışmada olduğu gibi bu çalışma içinde havanın 20 °C’de olan fiziksel özellikleri kabul edilmiştir. Elektronik eleman kübik bir yapıda olup her bir kenar uzunluğu 15 mm olarak tasarlanmıştır. Ayrıca elektronik elemanın yüzey sıcaklığı 60 °C sabit olarak tasarlanmıştır. Sisteme giren havanın sıcaklığı 20 °C olarak kabul edilmiştir. Kanal çıkışında akışın atmosfere açıldığı kabul edilmiştir.

Problemin çözümü adına çalışmada sabit kanal Reynolds sayısı ve altı farklı jet Reynolds sayısı kullanılmıştır, b/a oranı ise 1, 2, 3 ve 6 olmak üzere dört farklı değer kullanılmıştır. Jet hızını hesaplamak adına kullanılan denklem aşağıda gösterilmiştir. [11]

$$V_j = \frac{Re_j \mu}{\rho D_j} \quad (15)$$

Kanal hızını hesaplamak adına kullanılan denklem ise aşağıda verilmiştir. [11]

$$V_k = \frac{Re_k \mu}{\rho D_{kh}} \quad (16)$$

Bu denklemlerde yer alan D_j ifadesi jet çapını, D_{kh} ifadesi ise kanalın hidrolik çapını belirtmektedir. Problemin çözümü için Eşitlik 15 ve Eşitlik 16 yardımı ile elde edilen hız verileri kullanılarak oluşan durumlar Çizelge 1’de gösterilmiştir.

Çizelge 1: Çalışma kapsamında yapılan simülasyonların matrisi

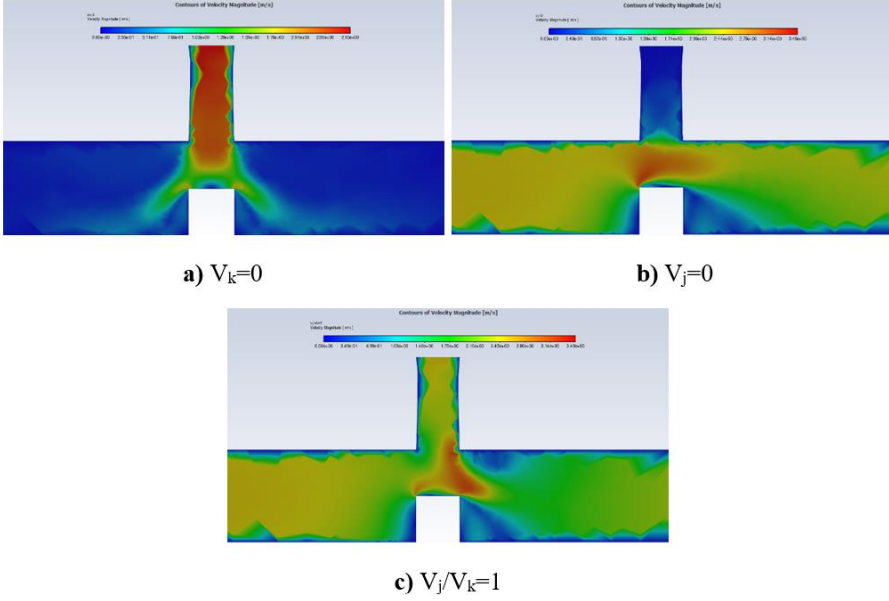
SN	b/a	Re _j	Re _k	V _j	V _k
1	2	0	9500	0	2,5371
2	2	628	9500	0,6343	2,5371
3	2	1255	9500	1,2686	2,5371
4	2	2510	9500	2,5371	2,5371
5	2	2510	9500	2,5371	2,5371
6	2	5021	9500	5,0742	2,5371
7	2	7532	9500	7,6113	2,5371
8	2	10042	9500	10,1484	2,5371
9	1	2510	9500	2,5371	2,5371
10	3	2510	9500	2,5371	2,5371
11	6	2510	9500	2,5371	2,5371

Akış ve Nusselt Sayısı Analizi

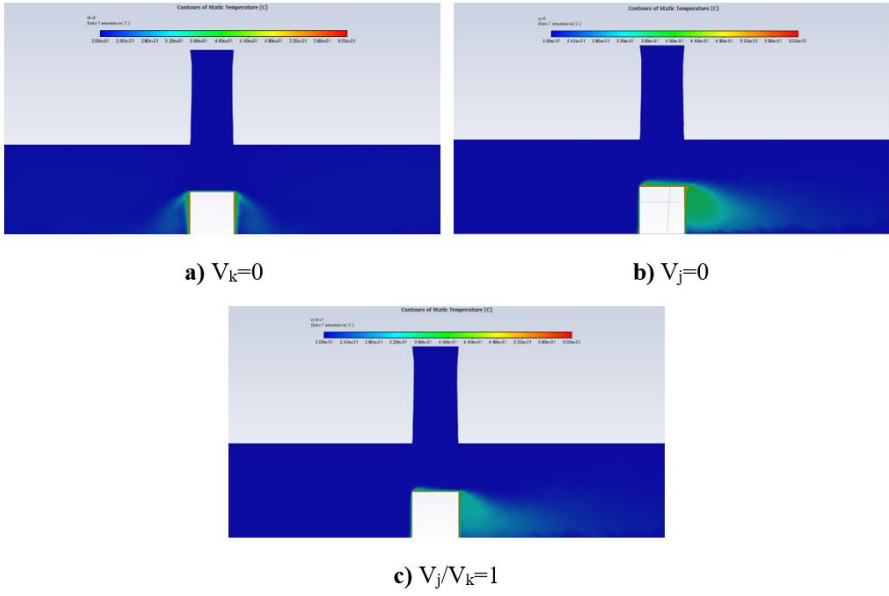
Çalışmada preblemin çözümü amacıyla yapılan simülasyonların sonucunda elektronik elemanın üzerinde elde edilen akış yapıları ve Nusselt sayıları farkı incelenmiş ve yorumlanmaya çalışılmıştır.

Akış Yapılarının Karşılaştırılması

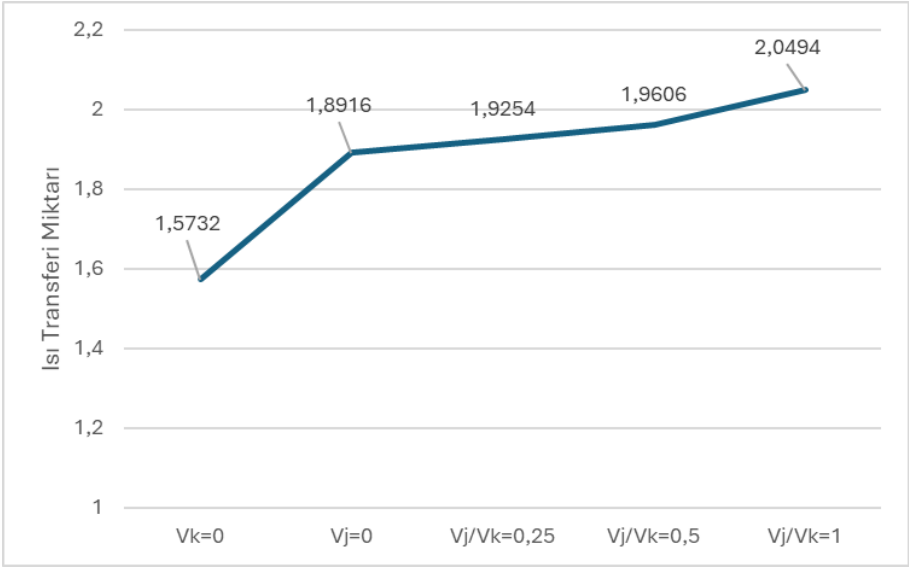
Çalışmanın bu bölümünde sadece jet, sadece kanal ve her iki akışın aynı anda olduğu durumlar incelenmiştir. İncelemelerin sonucunda oluşan hız vektör dağılımları Şekil 5’de gösterilmiştir. İnceleme sonucunda oluşturulan sıcaklık dağılımları ise Şekil 6’da gösterilmiştir.



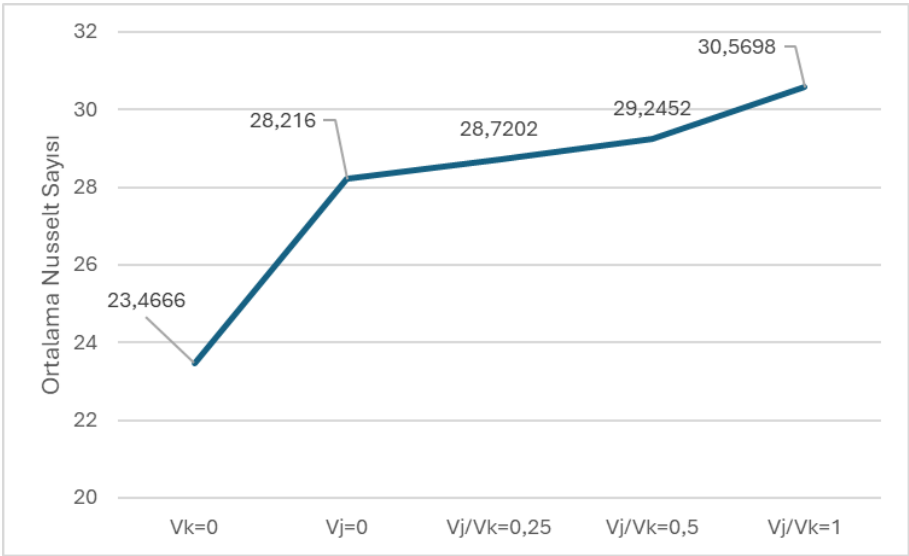
Şekil 5: Farklı akış hızları için hız dağılımları, a) $V_k=0$, b) $V_j=0$ ve c) $V_j/V_k=1$



Şekil 6: Farklı akış hızları için sıcaklık dağılımları, a) $V_k=0$, b) $V_j=0$ ve c) $V_j/V_k=1$



Şekil 7: Üç farklı akış sonucunda elektronik elemanın toplam ısı transferi miktarı



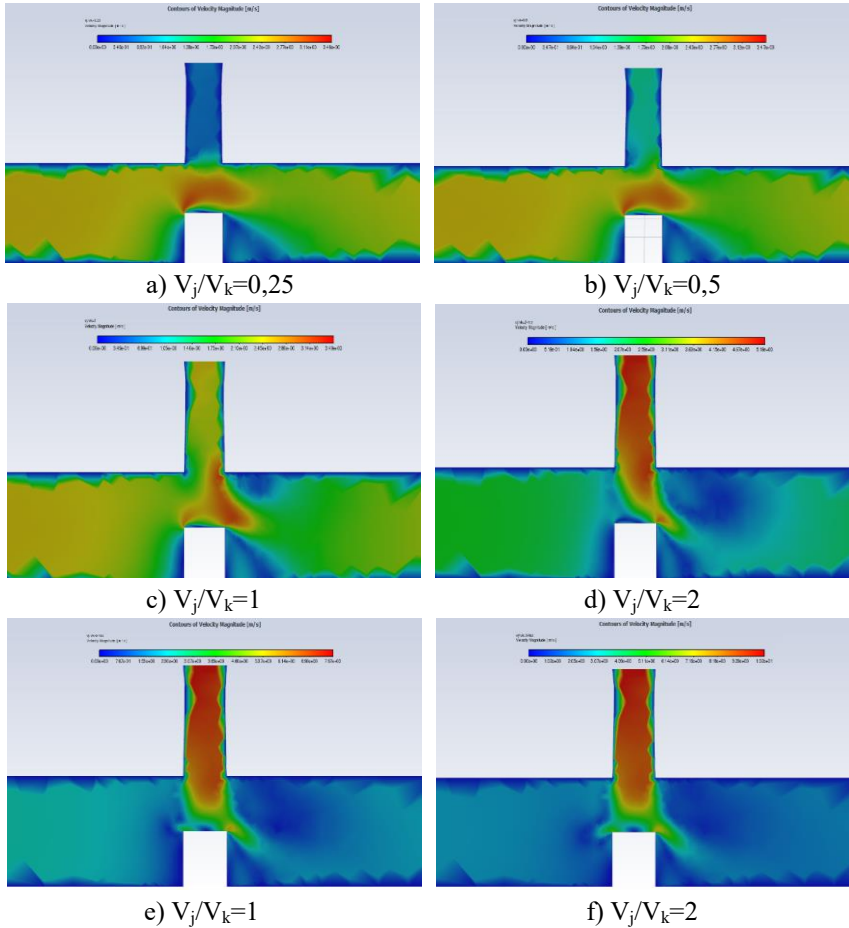
Şekil 8: Üç farklı akış sonucu ortalama Nu sayıları

Elektronik elemanın toplam ısı transferi miktarının ve ortalama Nusselt sayısını değişimi farklı akış tipleri için Şekil 7 ve Şekil 8’de gösterilmiştir. Şekiller incelendiği zaman sadece kanal akışın olduğu durumda toplam ısı transferi miktarı ve dolayısıyla ortalama Nusselt Sayısı en düşük olduğu durum olarak gözlemlenmiştir. Kombine akış durumunda ise beklendiği gibi en verimli akış modeli olmuştur. Kombine akış durumunda hem toplam ısı transferi miktarı hem de ortalama Nusselt Sayısı en yüksek değere ulaşmıştır. Bu durumun oluşmasının başlıca sebebi sadece jet veya sadece

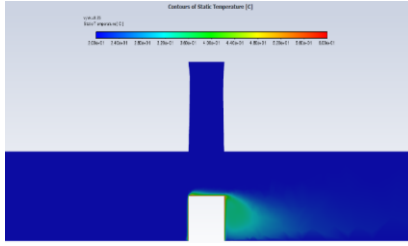
kanal akış durumlarında akışın dik geldiği yüzeyler fazlaca soğutulabilse de diğer yüzeylerdeki sıcaklık istenen seviyelerde düşüş göstermemektedir. Kombine akış durumunda sadece jet akışta olduğu kadar olmasada yüksek miktarda elektronik elemanın üst yüzeyi soğutulurken, sadece kanal akış kadar olmasada yine yüksek miktarda elektronik elemanın yan yüzeylerinin soğutulabilmiş olması, kombine akış durumunun en ideal durum olduğunu göstermektedir.

V_j/V_k Oranlarının Karşılaştırılması

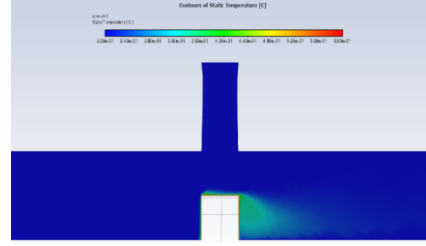
b/a oranının 2 olduğu durumda V_j/V_k oranları sırasıyla 0,25, 0,5, 1, 2, 3 ve 4 olarak simülasyonlar yapılmıştır. Simülasyolarda oluşan hız dağılımları ve sıcaklık dağılımları aşağıda verilmiştir.



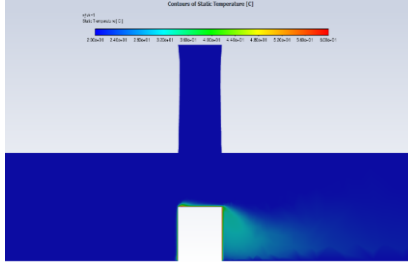
Şekil 9: Farklı V_j/V_k oranları için hız dağılımları, a) $V_j/V_k=0,25$, b) $V_j/V_k=0,5$, c) $V_j/V_k=1$, d) $V_j/V_k=2$, e) $V_j/V_k=3$ ve f) $V_j/V_k=4$



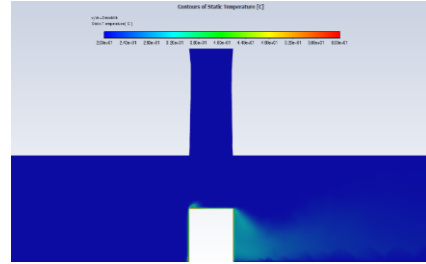
a) $V_j/V_k=0,25$



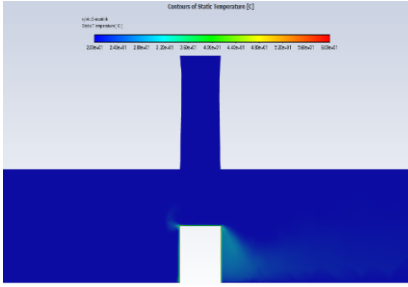
b) $V_j/V_k=0,5$



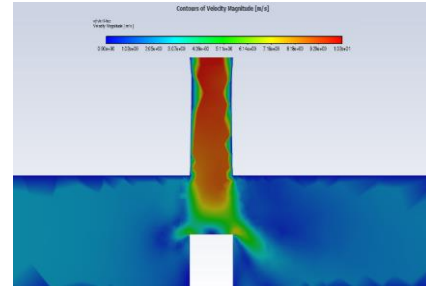
c) $V_j/V_k=1$



d) $V_j/V_k=2$

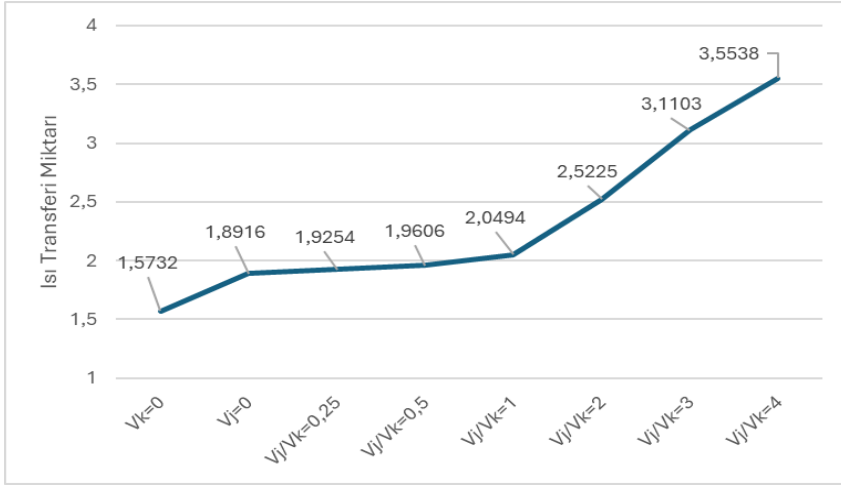


e) $V_j/V_k=3$

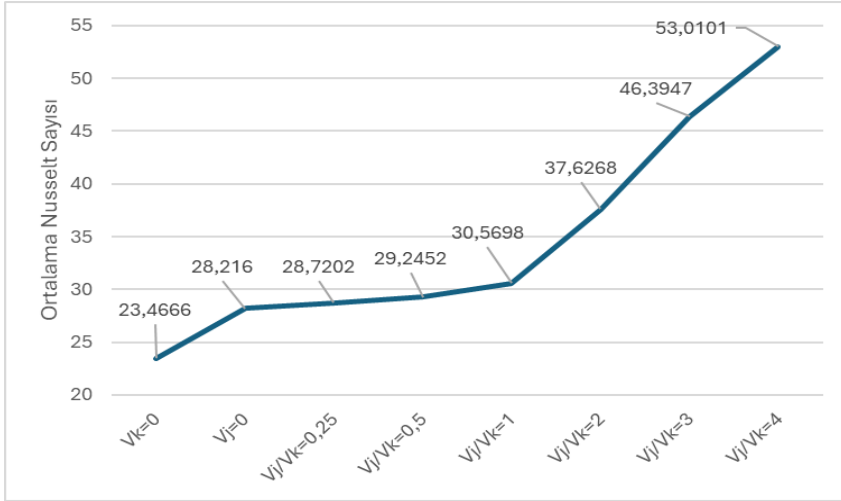


f) $V_j/V_k=4$

Şekil 10: Farklı V_j/V_k oranları için sıcaklık dağılımları, a) $V_j/V_k=0,25$, b) $V_j/V_k=0,5$, c) $V_j/V_k=1$, d) $V_j/V_k=2$, e) $V_j/V_k=3$ ve f) $V_j/V_k=4$



Şekil 11: V_j/V_k oranlarına karşılık gelen ısı transfer miktarı



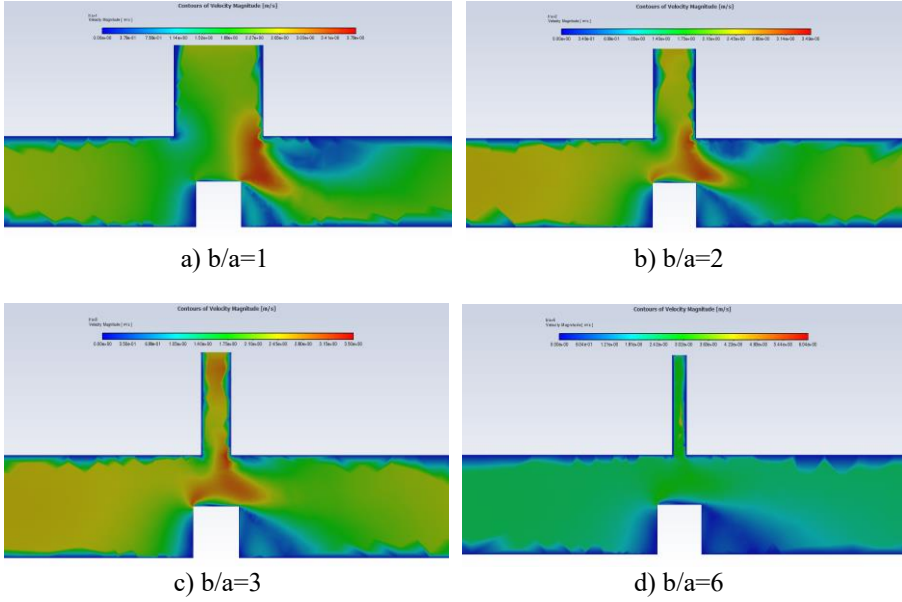
Şekil 12: V_j/V_k oranlarına karşılık gelen ortalama Nusselt Sayıları

Farklı V_j/V_k oranları ve b/a oranının 2 olduğu durumda yapılan simülasyonlar neticesinde hız dağılımları Şekil 9'da verilmiştir. Ayrıca yine farklı V_j/V_k oranları ve b/a oranının 2 olduğu durumda yapılan simülasyonlar neticesinde sıcaklık dağılımları ise Şekil 10'da verilmiştir. Simülasyon sonuçları karşılaştırıldığı zaman her V_j/V_k oranına karşılık gelen ısı transferi miktarı Şekil 11'de, ortalama Nusselt Sayıları ise Şekil 12'de verilmiştir. Elde edilen sonuç verileri karşılaştırıldığında V_j/V_k oranı arttıkça elektronik elemanın toplam ısı transferi miktarında artış görülmüş ve buna bağlı olarak yine V_j/V_k oranı arttıkça ortalama Nusselt Sayılarında artış görülmektedir. Bu durum lüleden giren jet akış debisinin artması ısı transferi miktarı ve ortalama Nusselt sayısı üzerinde soğutma açısından olumlu bir sonucu

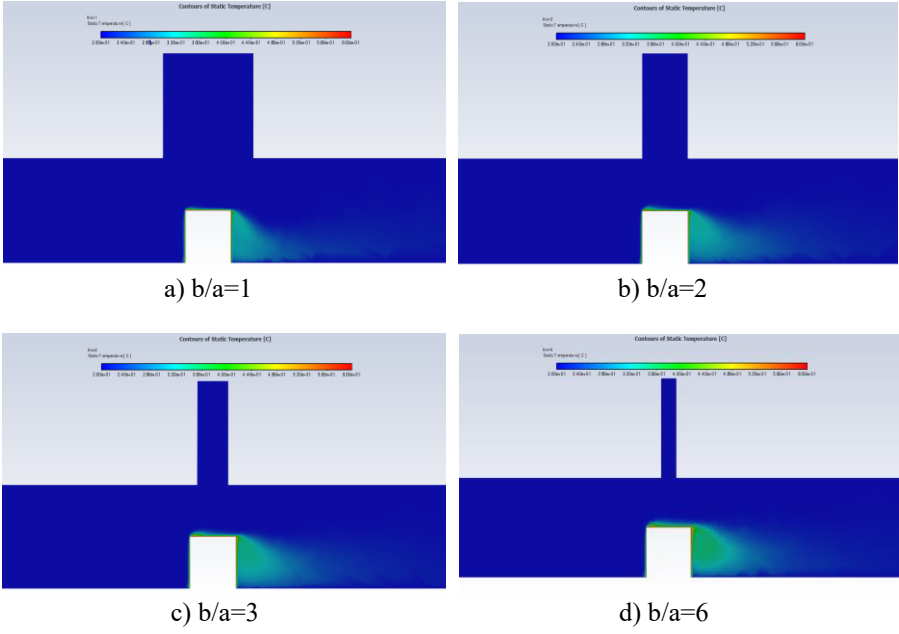
olduğunu göstermektedir. Bunun başlıca sebebi sabit kanal akış hızı olduğu durumda V_j/V_k oranı arttıkça lüleden çıkan havanın dik olarak geldiği elektronik elamanın üst yüzeyinde daha fazla soğuma sağlanmasıdır.

b/a Oranlarının Karşılaştırılması

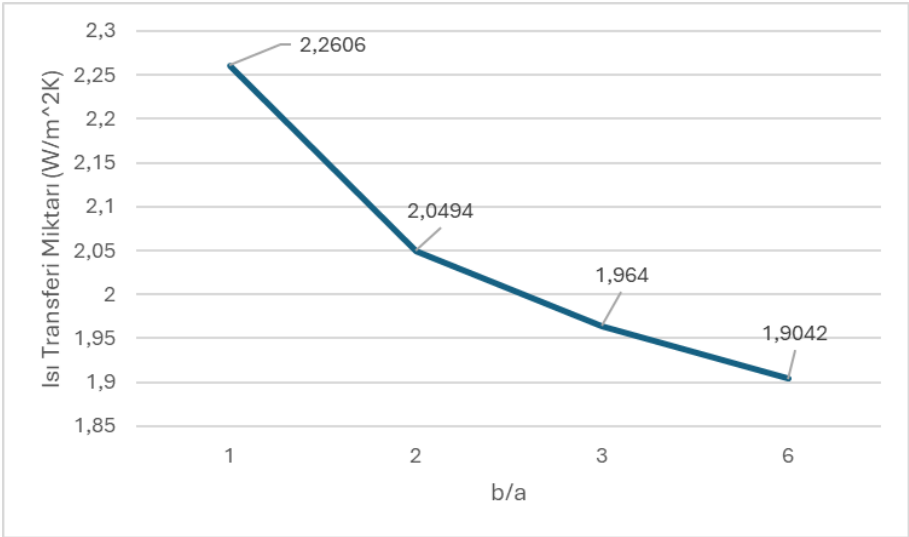
Çalışmanın bu bölümünde V_j/V_k oranı 1 olduğu durum için b/a oranları sırasıyla 1, 2, 3 ve 6 olacak şekilde simülasyonlar yapılmıştır. Simülasyon sonucunda ortaya çıkan hız dağılımları, sıcaklık dağılımları, ısı transfer miktarı ve ortalama Nusselt sayıları aşağıda gösterilmiştir.



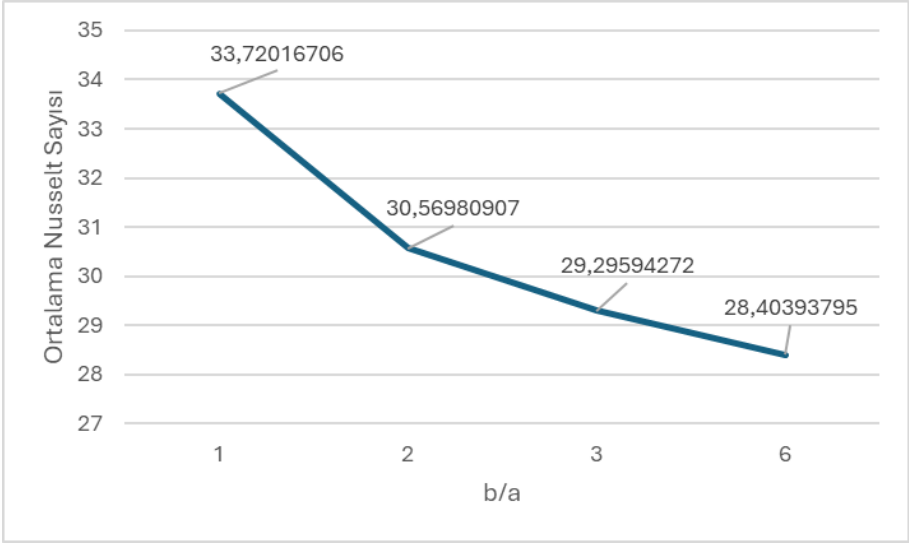
Şekil 13: Farklı b/a oranları için hız dağılımları, a) $b/a=1$, b) $b/a=2$, c) $b/a=3$ ve d) $b/a=6$



Şekil 14: Farklı b/a oranları için sıcaklık dağılımları, a) $b/a=1$, b) $b/a=2$, c) $b/a=3$ ve d) $b/a=6$



Şekil 15: Farklı b/a oranları için ısı transferi miktarı



Şekil 16: Farklı b/a oranları için ortalama Nusselt Sayıları

Farklı b/a oranları için yapılan simülasyonlar sonucunda oluşan hız dağılımları Şekil 13’de gösterilmiştir. Sıcaklık dağılımları ise Şekil 14’de gösterilmiştir. Şekil 15’de yapılan simülasyonlar sonucunda elektronik elemanın toplam ısı transferi miktarı gösterilmiştir. Şekil 16’da ise ortalama Nusselt sayıları verilmiştir. Sonuçlarda görüldüğü üzere b/a oranı arttıkça ısı transferi miktarı ve buna bağlı olarak ortalama Nusselt sayılarında düşüş izlenmiştir. b/a oranının artması ile birlikte lüenin çapının düşmesi sebebi ile elektronik elemanın soğuma miktarı azalır. Bunun sebebi çapı düşen lüleden giren hava miktarının azalması bu sebeple üst yüzeyin soğuma miktarının da düşmesidir.

Yapılan simülasyonlar sonucu elde edilen veriler ışığında hesaplanan ısı transfer miktarının ve ortalama Nusselt sayısının değerleri Çizelge 2 ve Çizelge 3’de toplu olarak verilmiştir.

Çizelge 2: b/a oranının 2 olduğu farklı V_j/V_k oranları için yapılan tüm analizlerin ısı transferi miktarı ve ortalama Nusselt Sayıları

V_j/V_k	b/a	Isı Transferi Miktarı	Ortalama Nusselt Sayısı
0	2	1,8916	28,2159905
-	2	1,5732	23,4665871
0,25	2	1,9254	28,7201671
0,5	2	1,9606	29,2452267
1	2	2,0494	30,5698091
2	2	2,5225	37,62679
3	2	3,1103	46,3946897
4	2	3,5538	53,0101432

Çizelge 3

V_j/V_k	b/a	q	Ortalama Nu
1	1	2,2606	33,7201671
1	2	2,0494	30,5698091
1	3	1,964	29,2959427
1	6	1,9042	28,4039379

SONUÇ

Bu çalışmada, sabit sıcaklığa sahip olan bir elektronik elemanın çapraz akış çarpan jet kombinasyonu yardımıyla farklı b/a oranı ve farklı V_j/V_k oranı ile soğutulması incelenmiştir. Çalışmada b/a oranı ile lüle çapının, V_j/V_k oranı ile jet giriş hızının soğutmaya etkileri incelenmiştir. Çalışma boyunca kanalın yüksekliği sabit tutulmuş ve lüle çapı değiştirilerek b/a oranı incelenmiştir. Diğer taraftan kanal giriş hızı sabit tutulup jet giriş hızı değiştirilerek V_j/V_k oranı incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda elektronik elemanın çevresindeki akış yapıları, sıcaklık dağılımları, ısı transferi miktarı ve ortalama Nusselt Sayıları incelenmiştir.

Jet hızının düşük olduğu simülasyonlarda kanal akışın daha baskın olması beklenen bir durumdur. Bu durum sonucunda jetin durma noktası kanalın çıkışına doğru kaydığı görülmüştür. Bu kayma sonucunda elektronik elemanın sıcaklık değerleri daha yüksek çıktığı gözlemlenmiştir. Bir başka

deyişle jetin durma noktasının kanal akış yönünde kayması sebebi ile ısı transferinin azaldığı görülmüştür. Jet akış hızı arttıkça durma noktası giderek elektronik elemanın orta noktasına yaklaşmış ve bunun sonucunda ısı transferi miktarında artış gözlemlenmiştir.

V_j/V_k oranının sabit olduğu durum incelendiğinde ise b/a oranı artmaya başladıkça lülenin çapında düşüş olmaktadır. Bu düşüş sebebiyle lüleden giren havanın debisinde düşüş olmuştur. Ayrıca lüle çapının düşmesi sebebi ile akış elektronik elemanın yüzey alanında daha düşük bir alana temas etmektedir. Debideki düşüş ve elektronik elemanın yüzey alanında daha az bir alana havanın temas etmesi sebebi ile ısı transferi miktarında dolayısıyla ortalama Nusselt sayılarında ciddi miktarda düşüş gözlemlenmiştir. b/a oranı arttıkça hem debi hem akışın temas ettiği yüzey alanının artması ile birlikte ısı transferi miktarı ve ortalama Nusselt sayılarında önemli artış olduğu gözlemlenmiştir.

Tüm simülasyonlar göz önüne alındığında maksimum ısı transferi ve ortalama Nusselt Sayısının V_j/V_k oranının 4 ve b/a oranının 1 olduğu durumlarda gerçekleşmiştir. En düşük ısı transferi ve buna bağlı olarak en düşük ortalama Nusselt sayısı ise V_j/V_k oranının sıfır (jet akışın olmadığı) ve b/a oranının 6 olduğu durumlarda gözlemlenmiştir.

Bu sonuçlar göz önüne alındığı zaman, sabit b/a oranı için jet hızının artmasının ısı transferi konusunda olumlu bir sonuç verdiği söylenebilmektedir. Buna karşılık sabit V_j/V_k oranı için lüle çapının küçülmesinin ise ısı transferine olumsuz yönde etki ettiği söylenebilir.

REFERANSLAR

- [1] Baydar, E. (1999), Confined impinging air jet at low Reynolds numbers. *Experimental Thermal and Fluid Science* 19, 27-33.
- [2] Bilen, K. (1994), Isıtılan Düzlem Bir Plakaya Dik Ve Eğik Hava Jeti Çarpmasında Isı Transfer Karakteristiklerinin Deneysel İncelenmesi. Doktora Tezi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- [3] Chiriac, V. A., Ortega A. (2002), A numerical study of the unsteady flow and heat transfer in a transitional confined slot jet impinging on an isothermal surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(6), 1237-1248.
- [4] Chung, Y. M., Luo, K. H., Sandham, N. D. (2002), Numerical study of momentum and heat transfer in unsteady impinging jets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 23(5), 592-600.
- [5] Gordon, R., Akfirat, J. C. (1965), The role of turbulence in determining the heat-transfer characteristics of impinging jets. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 8, 1261-1272.

- [6] Maghrabie, H.M., Attalla, M., Fawaz, H.E., Khalil, M. (2017), Numerical investigation of heat transfer and pressure drop of in-line array of heated obstacles cooled by jet impingement in cross-flow. *Alexandria Engineering Journal* 56, 285-296.
- [7] Mergen, S. (2014), Kanal İçi Akış Ve Çarpan Jet İle Birlikte Elektronik Eleman Soğutulmasının Sayısal Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [8] Miyazaki, H., Silberman, E. (1972), Flow and heat transfer on a flat plate normal to a two dimensional laminar jet issuing from a nozzle of finite height. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 15, 2097-2107.
- [9] Morris, G. K., Garimella, S. V., Fitzgerald, J. A. (1999), Flow-field prediction in submerged and confined jet impingement using the Reynolds stress model. *Journal of Electronic Packaging*, 121, 255-262.
- [10] Örs, E. (2017), Kanal İçi Akış Ve Çarpan Jet Kullanımı İle Elektronik Elemanların Soğutulmasının Sayısal Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [11] Öztürk, M. S. (2020), Elektronik Bir Elemanın Çarpan Jet Ve Çapraz Akış Kombinasyonu İle Soğutulmasının Sayısal Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale.
- [12] Saleha, N., Fadela, N., Abbas, A. (2015), Improving cooling effectiveness by use chamfers on the top of electronic components. *Microelectronics Reliability* 55, 1067-1076.
- [13] Yan, X., Saniei, N. (1997), Heat transfer from an obliquely impinging circular air jet to a flat plate. *Int. J. Heat and Fluid Flow*, 18, 591-599.
- [14] Zuckerman, N., Lior, N. (2006), Jet impingement heat transfer: Physics, correlations, and numerical modeling. *Advances in Heat Transfer* 39, 565-631.

Mikrokontrolcü Tabanlı Optik Deney Sistem Tasarımı: Kutuplanma Ölçümü

Tayyar GÜNGÖR¹

1- Prof. Dr.; Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü. tgungor@mehmetakif.edu.tr ORCID No: 0000-0003-2518-9535

ÖZET

Bu çalışmada, iki adet doğrusal kutuplayıcının step motor sürücü ile açısal konumları kontrol edilerek kutuplanma ölçümünün gerçekleştirildiği mikrokontrolcü tabanlı bir optik deney sistemi tasarlanmıştır. Arduino UNO, step motor sürücü, dc motor hız kontrol devresi, lazer diyot sürücü devresi ve mekanik ışık dilici ile sistem bir optik ölçüm sistemi haline getirilmiştir. Birinci kutuplayıcının θ_0 açısı değeri $-4,8110^\circ$, ışık şiddetinin maksimum (0,0689) ve minimum (0,0023) değerleri ile kutuplanma derecesi (Degree of Linear Polarization) DoLP=0,9367 ve % 93,67 olarak hesaplanmıştır. Ticari olarak motorize kutuplayıcıların yerine daha ekonomik bir tasarım ile hem düşeyde hem de yatayda açısal konum değişimi sağlanabilir. Sistem, laboratuvar ortamında hızlı ve güvenilir optik ölçümler için uygun, düşük maliyetli bir alternatif olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, sistem ışık yoluna belirli açılarda yerleştirilen kutuplayıcılar ile eliptik kutuplanma ve/veya uygun sayıda doğrusal ve dairesel kutuplayıcılar kullanılarak farklı kutuplanma deneyleri içinde kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler –Doğrusal kutuplayıcı, Arduino UNO, Faz-Kilitlemeli yükselteç, Işık dilici, Işık şiddet ölçümü.

GİRİŞ

Optik, fiziğin en önemli ve temel dallarından birisidir. Esas olarak ışığın madde ile etkileşmesini ve madde içinde hareketini inceler. Geometrik Optik (Ray Optiği) tanım olarak, ışığın dalga doğasını ihmal ederek, doğrusal “ışın” (ray) modeliyle incelendiği optik dalıdır. Geometrik Optikte ışık, dalga boyundan çok daha büyük boyutlu ortamlarda yayıldığında, girişim ve kırınım gibi dalga olguları göz ardı edilebilir. Temelde ışığın doğrultu boyunca ilerleyen kırımlar hâlinde yayılımı dikkate alındığında yansıma (gelme açısının yansıma açısına eşit olması ($\theta_i = \theta_r$)), kırılma (ışığın n_1 ve n_2 gibi farklı kırıcılık indisine sahip ortamlar arası geçişi sırasında geliş açısı (θ_1) ile kırılma açısı (θ_2) arasındaki ($n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$) ilişki Snell Yasası olarak bilinir), mercekle ve/veya aynalardan oluşan sistemlerde cisim ve görüntü özelliklerini incelemeye kullanılır.

Fizik Optik (Dalga Optiği) ise ışığın elektromanyetik dalga doğasını göz önüne alarak, girişim, kırınım ve polarizasyon gibi dalga olgularını inceleyen optik dalıdır. Burada ışığın dalga boyu ile karşılaşılacak yapı boyutları kıyaslandığında dalga etkileri (ölçülebilir) önem kazanır. Özellikle iki veya daha fazla dalganın üst üste binmesiyle oluşan yapıcı veya yıkıcı girişim desenlerinin (Çift yarık deneyi) açıklandığı girişim olayı, dalganın bir engel veya yarıktan geçerken dalga cephesinin bükülmesi, Fresnel ve Fraunhofer bölgelerinin incelendiği kırınım olayı, ışığın elektrik alan vektörünün belirli bir düzlemde salınımı ile oluşan lineer, dairesel, eliptik

polarizasyon olayları ile elektromanyetik dalganın yayılımını ve malzemeye etkileşimini belirleyen temel Maxwell Denklemleri açıklanabilir. Fizik optik interferometreler (Michelson vb.), difraksiyon (Kırınım) ızgaraları, lazer rezonatörleri, optik filtre tasarımı, fiber Bragg ızgaraları gibi çok farklı kullanım alanları vardır. Her ne kadar farklı iki dal gibi gözükse de ışık kaynağından çıkan küresel dalgalar kaynaktan yeterince uzun bir mesafede düzlemsel dalgalar olarak ifade edilir. Bu düzlemsel dalgaların ilerleme yönünü gösteren ışınlar ile de fizik optik ile geometrik optik arasında bağlantı kurulmuş olur.

Birçok optik deneyinde genel olarak ışık şiddeti ölçülür. Maliyet ve basitlik dikkate alındığında bu şiddet bilgisi bazen ışığa duyarlı bir direnç olan LDR ile bazen uygun optik dalgaboyu aralığında alıšan bir fotodiyot ile ölçülebilir. Ölçümler basit bir voltmetre, ampermetre ile doğrudan yapılabildiği gibi işlemsel yükselteç vb. elemanlarla dolaylı olarak da yapılabilir. Ayrıca söz konusu ışık şiddeti maliyetli fakat daha hassas elektronik aygıtlar ile de ölçülebilir. Genellikle çok düşük foto akımları ölçmek için elektrometre veya faz-kilitlemeli yükselteç (lock-in amplifier) kullanılır. Faz-kilitlemeli yükselteç bir optik ışın bölücü (shutter) ile birlikte kullanıldığında çevresel etkiler, ölçülen sinyali etkilemez.

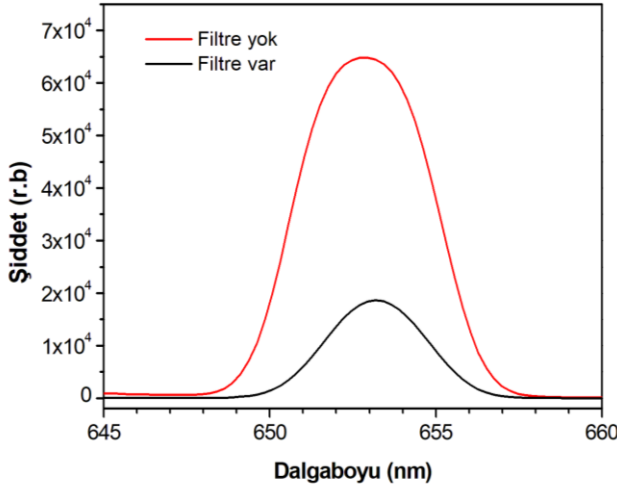
Kolay kullanım ve çeşitli sensörler ile birlikte uyum içinde hızlı kullanıma sahip olmalarından dolayı mikrokontrolcü kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır. Buna ek olarak söz konusu mikrokontrolcülerin farklı yazılım programları ile seri-port, kablolu veya kablosuz internet gibi farklı protokoller ile haberleşebilmeleri nedeni ile birçok basit veya karmaşık projelerde kullanım alanı bulmaktadır (Güngör, 2025; Güngör ve Güngör, 2022; Güngör, Güngör ve Saka, 2022; Guilherme, ve Tiago, 2022; Thedsakhulwong ve Hernmek, 2018). Bu tür mikrokontrolcüler kullanılarak tasarlanan deney sistemlerinde toplanan verilerin bilgisayara veya hafıza kartlarında (Sequire-Digital, SD) kayıt edilebilmesi de büyük kolaylık sağlamaktadır. Daha çok kendi-başına da “stand-alone” çalışan bu mikrokontrolcül platformları çok sayıda girdi/çıkıı işlemleri için uygun portlar, farklı besleme gerilimleri (3,3 V ve 5 V), analog/sayısal dönüştürücüler ve PWM (Puls-Width-Modulation) çıkış gibi farklı birimlere sahiptirler (Ismailov ve Jo'rayev, 2022). Her gün artan yeni sensörler ve bu sensörlere ait kütüphane fonksiyonları sayesinde ışık şiddeti, sıcaklık, basınç, ivme, kütle, ses şiddeti, motor-kontrol ve devir ölçümü gibi birçok konuda ölçme ve kontrol sağlamaktadır.

Literatürde ışığın kutuplanmasının ölçüldüğü çalışmalar vardır (Garg, Sharma ve Dhingra, 2011; Ishafit, Mundilarto ve Surjono, 2020). Bu çalışmada hem geometrik optik hem de fizik optik kullanılarak ışığın doğrusal kutuplanmasını içeren ölçümlerin yapılabileceği opto-mekanik bir sistem tasarlanmıştır. Ayrıca sistem Labview grafik programlama programı ile seri-port üzerinden entegre edilmiştir. Sistem ana hatları ile bir mikrokontrolcü (Arduino UNO) ve adım motor sürücü ile kutuplayıcının

açışal konumunu kontrol ederken PWM özellikli dc motor hız kontrol devresi ile yapılan mekanik ışık dilici (chopper) ve faz-kilitlemeli yükselteç ile analizörden geçen ışık şiddetini bir fotodiyot yardımı ile ölçebilmektedir.

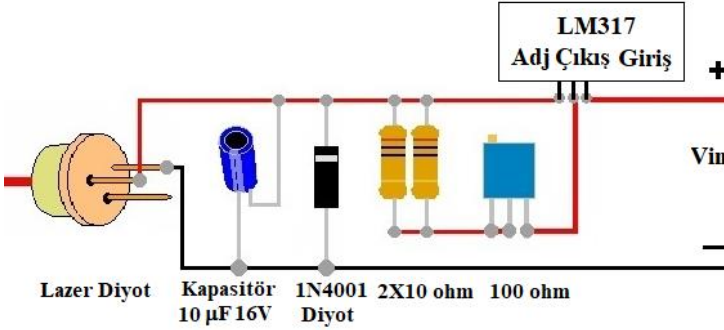
MATERYAL VE YÖNTEM

Işık kaynağı olarak kırmızı 650 nm merkezli kırmızı renkli lazer diyot kullanılmıştır. Çok dar band optik geçirgen (very narrow band pass filter) ile 650 nm dalgaboyuna sahip kırmızı renkli lazerin dalgaboyu belirsizliği azaltılmıştır. Lazer ışığının filtreden geçmeden önce ve sonrasında ışık şiddetinin dalgaboyu ile değişimi yük-eşleşmeli-aygıt adı verilen CCD (Charge-Coupled-Device) dedektörlü bir minyatür spektrometre ile ölçülmüştür (Şekil 1). Filtre olmadan 652,870 nm merkezli ve 4,0887 nm yarı eğri genişliğine sahip lazer ışığının filtrenin olduğu durumda 653,20 nm merkezli ve 2,9971 nm yarı eğri genişliğine sahip olduğu gözlenmiştir. Buna göre ışık şiddeti azalırken lazer dalgaboyundaki belirsizlik de azalmıştır. Ayrıca, lazer ışığının optik şiddeti fotodedektör akımını ölçecek sistemin ölçüm sınırları dışına çıkacak olursa (Neutral Density Filter, NDF) adı verilen özel filtreler yardımı ile ışık şiddeti 10, 100, 1000 ve 10.000 kat azaltılabilir. Bu özellikle birbirine dik iki doğrusal kutuplayıcıdan geçen ışık şiddetinin minimum bir değerde olmasını garanti eder. Aksi halde iki kutuplayıcı birbirlerine dik konumda olsa bile dedektör belirgin bir ışık şiddeti ölçebilir. Bu durumda ışık şiddetinin açığa bağlı değişimine bir polinom uydurma işlemi yapılarak ışık şiddetinin dalgaboyu ile değişiminde bulunan minimum açı değeri hesaplanabilir.



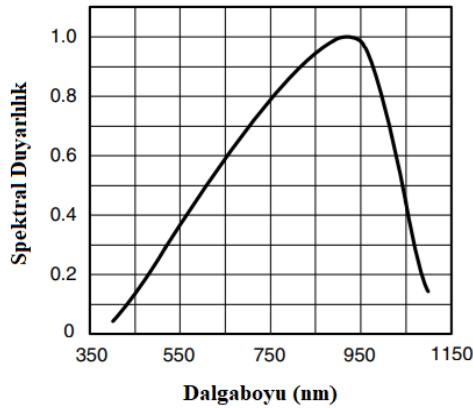
Şekil 1: Filtreden geçmeden önce ve sonrasında lazer şiddetinin dalgaboyu ile değişimi.

Lazer ışık şiddetinin ölçüm boyunca sabit kalması için lazer diyot LM317 gerilim regülatörü ile tasarlanan bir sabit akım kaynağı ile sürülmüştür. Lazer diyota paralel bağlı elektrolitik kapasitör, dalgalanan sinyalleri yumuşatmak için bir güç yük dengeleyici görevi görür. Birbirine paralel 10 ohm'luk dirençlere seri bağlanan ayarlanabilen direnç ile oluşan R_{toplam} direnci dikkate alındığında çıkış akımı $I_0=1,25V/R_{toplam}$ formülü ile hesaplanabilir. Maksimum 0,250 A akım değeri elde edilebilir. Devrede bulunan 100 ohm'luk ayarlı direncin değeri değiştirilerek lazer diyotun parlaklığı artırabilir veya azaltılabilir (Şekil 2).

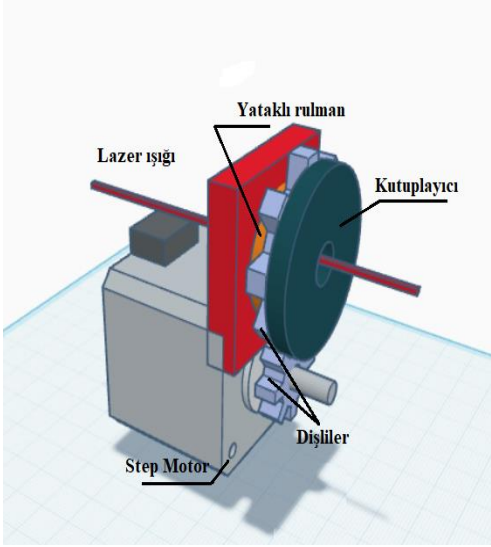


Şekil 2: Lazer diyot için sabit akım devresi (Driver, 2025).

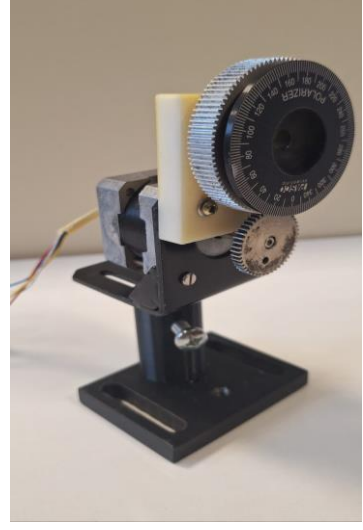
Lazer ışığını kutuplamak için üzerinde 1 derecelik işaret çizgileri bulunan 52 mm dış çap ölçüsündeki dairesel disk üzerine monte edilmiş iki adet doğrusal kutuplayıcı kullanılmıştır. Dedektör olarak BPW-34 silikon fotodiyot kullanılmıştır. Bu fotodedektörün dalgaboyuna bağlı spektral duyarlılık değişimine bakıldığında 650 nm dalgaboyuna sahip kırmızı renkli lazerin dalgaboyunu da içine alan özellikle UV-Vis bölgesinde oldukça doğrusal bir davranış sergilediği görülmektedir (Şekil 3).



Şekil 3: BPW-34 Fotodedektöre ait dalgaboyuna bağlı rölatif spektral duyarlılık değişimi (BPW-34, 2025).



(a)



(b)

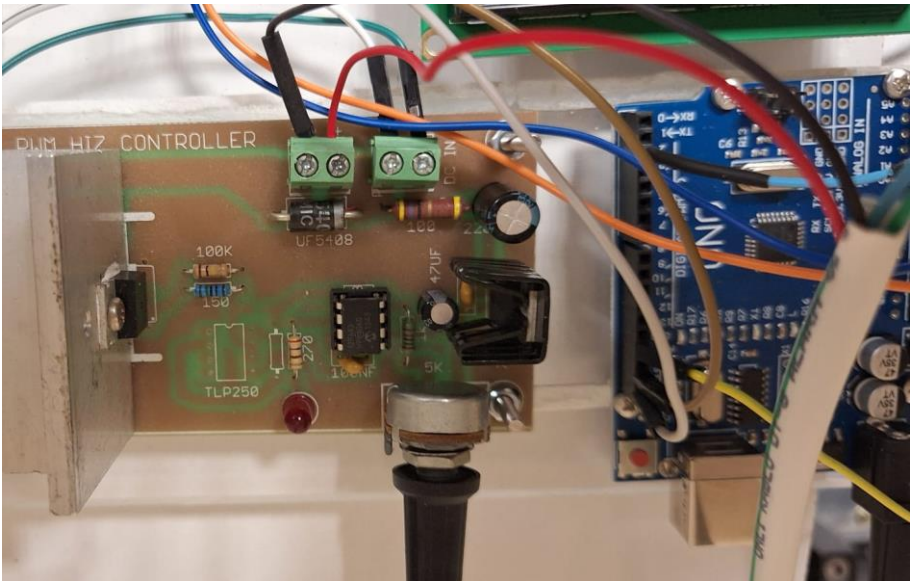
Şekil 4: Bir doğrusal kutuplayıcının step motor üzerine montajına ait 3-boyutlu tasarımı (a) ve tasarımın gerçekleştirilmiş hali (b).

Doğrusal kutuplayıcılar Nema 17 step motor ile şekilde gösterilen dişliler yardımı ile $0-360^\circ$ arasında 6 farklı seçenek ile (200, 400, 800, 1600, 3200 ve 6400 adım) döndürülmektedir. Motorize kutuplayıcının 3-boyutlu tasarımı ve tasarımın gerçekleştirilmiş hali Şekil 4-a ve Şekil 4-b’de gösterilmiştir. Kutuplayıcının monte edildiği dişli 10 mm iç çapında bir rulmanın (6000ZZ) içine sabitlenmiştir. Bu sayede kutuplayıcı kolaylıkla dönebilmektedir. Step motor miline bağlanan 48 dişe sahip çark ile kutuplayıcının üzerine bağlandığı disk üzerindeki diş sayısı (96) dikkate alındığında en küçük adım ile döndürme açısındaki belirsizlik 0,028 derece olmaktadır.

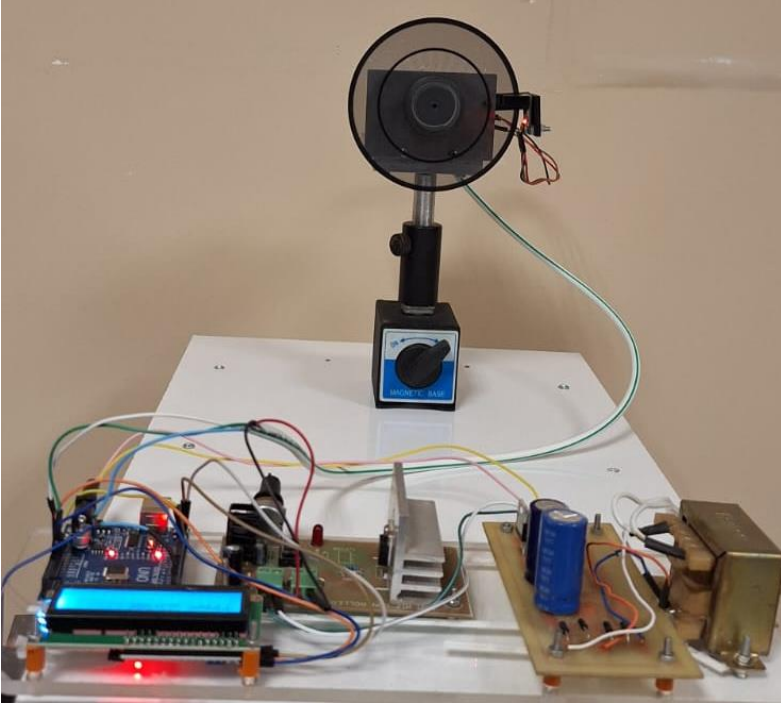
Kutuplayıcılardan geçerek fotodedektör üzerine gelen ışık şiddetini ölçmek için faz-kilitlemeli (lock-in amplifier) yükselteç olarak SR530 model bir yükselteç kullanılmıştır. Faz-kilitlemeli yükselteç ile düşük akımları ölçmek için f frekansında optik olarak dilimleme yapan chopper adı verilen birim kullanılır. Bu çalışmada üzerinde X adet yarık bulunan ışık bölücü (shutter) plaka (Şekil 5), PWM modül ile hızı kontrol edilen bir dc motorun miline bağlanmıştır. TTL çıkışı olan bir foto-gate ile yükselteç için gerekli kesikli aydınlatma sağlanmıştır. Foto-gate tarafından üretilen sinyal Arduino Uno yardımı ile devir/dak (Hz) olarak hesaplanarak 2x16 I2C modül ile deney süresince monitörlenmiştir (Şekil 6). Arduino UNO, foto-gate, LCD ekran, PWM ile dc motor hız kontrol ünitesi ve besleme katının genel görünüşü Şekil 7’de gösterilmiştir.



Şekil 5: Mekanik ışık dilici ve foto-gate.



Şekil 6: PWM modül ile foto-gate modülünün Arduino Uno bağlantısı



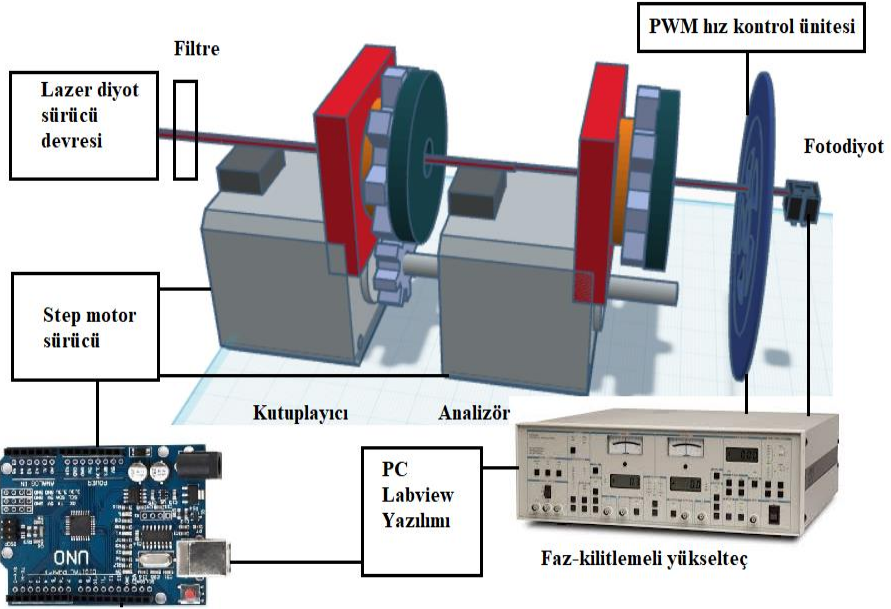
Şekil 7: Arduino UNO, foto-gate, LCD ekran, PWM ile dc motor hız kontrol ünitesi ve besleme katının genel görünüşü.

BULGULAR

Faz-kilitlemeli yükselteç, Labview adlı grafiksel programlama dili ile yazılan bir program kullanılarak kontrol edilmiştir. Bu yükselteç, giriş sinyali olarak gerilim veya akım seçeneğine sahiptir. Eğer akım girişi seçilirse, yükselteç bu akımı kullanıcının belirleyeceği kazanç değerleri ile gerilime çevirerek ölçer. Sonrasında istenirse bu kazanç değeri kullanılarak akım değeri elde edilebilir.

Kutuplayıcının bağlı olduğu adım motorların kontrolü için bilgisayarın printer portu (Centronics portu) Labview aracılığı kullanılmıştır. Belirli bir adres bilgisi ile ulaşılabilen 8 data ve 4 kontrol biti uygun durumlar için TTL (Transistör-Transistör Logic) giriş ve çıkış özellikli olarak kullanılabilir. Her bir motor için *yön*, *yarım/tam adım* ve *Enable* fonksiyonları olmak üzere 6 veri biti (D0, D1...D5) adım motor sürücüyeye bağlanmıştır. Kutuplanma deneyi için izlenen yol: ilk olarak birinci kutuplayıcının konumunu belirli bir değere getirmek için gerekli adım ve yön bilgisi gönderilir. Sonrasında ikinci adım motora bağlı kutuplayıcıyı önceden 0-360° arasında belirlenen açı adımları ile döndürülür. Her bir açı için faz-kilitlemeli yükselteç çıkış sinyali ölçülerek eş zamanlı olarak

Filtre  PWM hız kontrol ünitesi

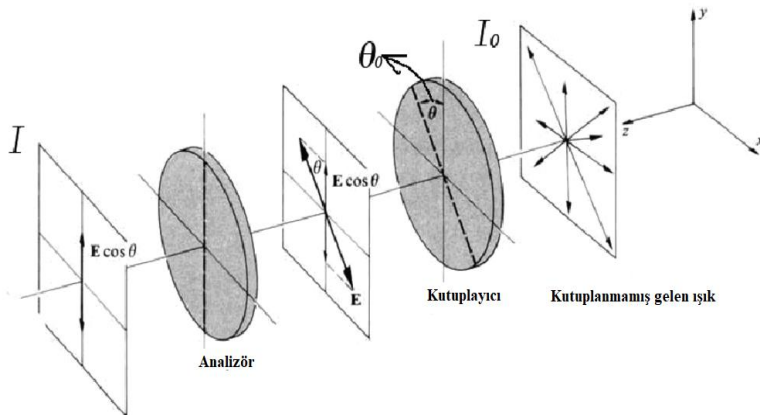


Şekil 8: Kutuplanma ölçüm sisteminin genel görünüşü.

Doğrusal kutuplanmış ışığın elektrik alan vektörü sabit bir düzlemde salınım yapar. Söz gelimi x doğrultusunda doğrusal kutuplanma için ışığın elektrik alan bileşeni,

$$\mathbf{E}(t)=E_0\text{Cos}(wt)\mathbf{x} \quad (1)$$

şeklinde verilebilir.



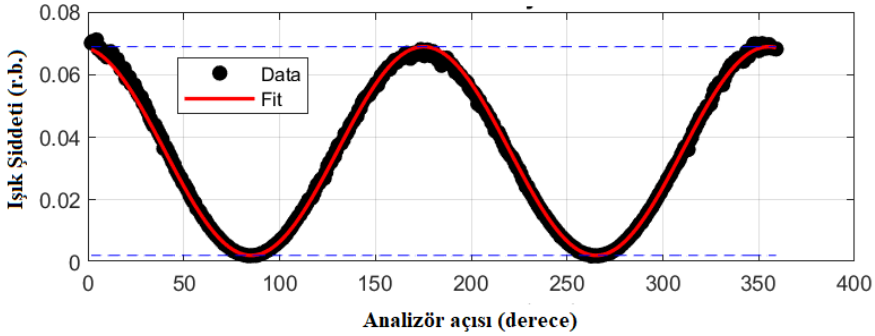
Şekil 9: Malus Yasasının şematik gösterimi (Li, 2009).

Kutuplayıcı gelen ışığın elektrik alan bileşeninden bir tanesini geçirirken, analizör ise kutuplayıcının doğrultusuna göre ışığın geçişini ayarlar. Malus yasası (Şekil 9) analizörden geçen ışık şiddetini analizör açısına (θ) ve analizörün giriş kutuplanma azimut açısı (θ_0) bağlı değişimini aşağıdaki eşitlikle

$$I(\theta)=I_0\cos^2(\theta-\theta_0) \quad (2)$$

ifade eder.

Kutuplanma deneylerinde genellikle birinci kutuplayıcı kutuplayıcı olarak ikinci kutuplayıcı ile analizör olarak isimlendirilir. Birinci kutuplayıcının kutuplanma yönü ilk olarak istenilen açı değerine getirilir. Genelde 0° veya 90° konumu seçilir. Şekil 10'da biri önceden belirlenen değerde, biri sabit diğeri 0 - 360° açı aralığında döndürülerek elde edilen ışık şiddetinin açıya bağlı değişimi ve Malus yasasına uyumu gösterilmiştir.

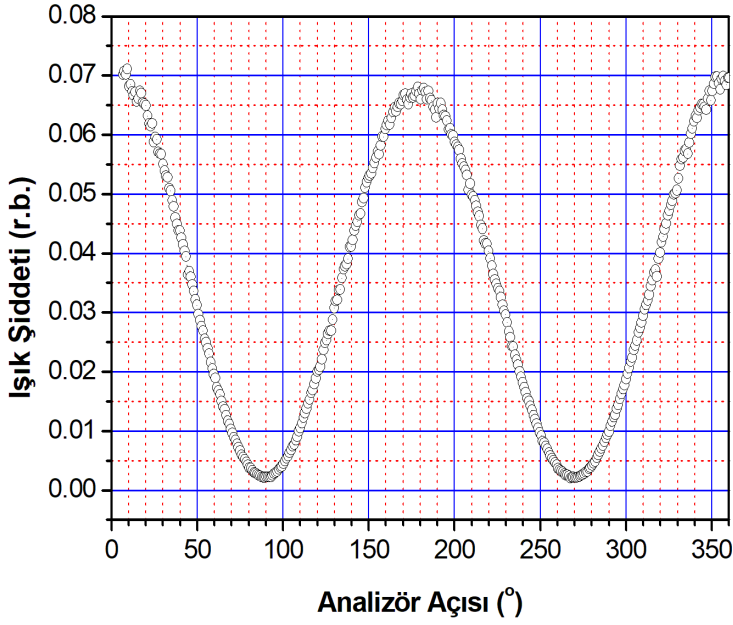


Şekil 10: Işık şiddetinin analizörün açısına bağlı deneysel değişimi ve Malus yasasına uyumu.

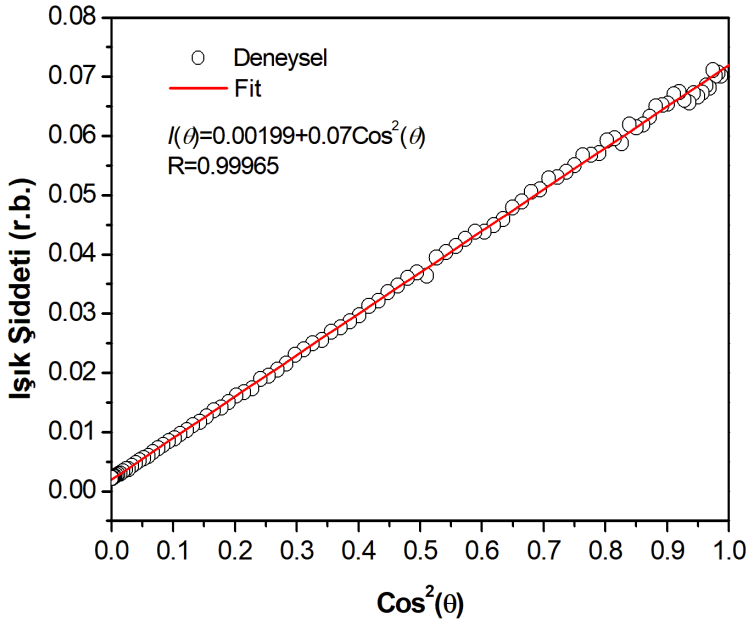
Matlab programı ile oluşturulan bilgisayar programı yardımı ile analizör açısına bağlı ışık şiddeti değerleri kullanılarak Malus yasasına uygunluğu nümerik analiz yardımı ile incelenmiştir. Buna göre ışık şiddeti ile analizör açısı arasında aşağıda verilen eşitlik kullanılmıştır:

$$I(\theta)=C+D\cos(2\theta)+E\sin(2\theta). \quad (3)$$

Bu fit işlemi sayesinde kutuplayıcının θ_0 açı değeri $-4,8110^\circ$ olarak hesaplanmıştır. Buna göre düzeltilmiş ışık şiddetinin analizörün açısına bağlı değişimi Şekil 11'de ve Eş. (2) ile verilen matematiksel ifadenin doğrulaması ise Şekil 12'de gösterilmiştir. $I_{max}= 0,0689$ ve $I_{min}= 0,0023$ değerleri ile kutuplanma derecesi (Degree of Linear Polarization) DoLP= $0,9367$ ve $\%93,67$ olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bulgular doğrultusunda tasarımı gerçekleştirilen bu sistem ile ışığın doğrusal kutuplanabildiği gösterilmiştir.



Şekil 11: θ_0 açısı değeri dikkate alınarak ışık şiddetinin analizörün açısına bağlı değişimi.



Şekil 12: Işık şiddetinin $\text{cos}^2\theta$ ile değişimi ve doğrusal fit işlemi.

SONUÇ

Arduino UNO, step motor, step motor sürücü, doğrusal kutuplayıcılar ve ışık şiddetini algılamak için kullanılan fotodedektör ile faz-kilitlemeli yükselteç kullanılarak bir polarimetre ölçüm sistemi tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu sistem vasıtasıyla kutuplayıcı ve analizör yardımı ile lazer ışığının doğrusal kutuplandığını deneysel olarak gösterilmiştir. θ_0 açısı değeri $-4,8110^\circ$ olarak hesaplanmıştır. Buna göre düzeltilmiş ışık şiddetinin, analizörün açısının karesi ile değişiminde Malus yasasına uyumu gösterilmiş ve maksimum ışık şiddeti (0,0689) ile minimum ışık şiddeti (0,0023) değerleri kullanılarak kutuplanma derecesi (Degree of Linear Polarization) $DoLP=0,9367$ ve %93,67 olarak hesaplanmıştır. Bu sistem uygun maliyetli ve açık bir sistemdir. Ayrıca sadece kutuplayıcıların düşey ekseninde açısal konumlarını değiştirmek için değil aynı zamanda yatay ekseninde de açısal konum değişiminde de kullanılabilir. Bu sayede yarı saydam cam vb. yüzeylerden yansıyan ışığın kutuplanma açısı da belirlenebilir veya elipsometrik ölçümler için de kullanılabilir.

REFERANSLAR

- BPW-34, <https://www.vishay.com/docs/81521/bpw34.pdf> adresinden 4 Mayıs 2025 tarihinde alınmıştır.
- Driver, <https://tr.pinterest.com/pin/127367495705463715/14> adresinden 17 Ağustos 2025 tarihinde alınmıştır.
- Garg, A., Sharma, R., ve Dhingra, V. (2011). Polarization studies in a computer based laboratory, *Latin-American Journal of Physics Education*, 5, 17.
- Guilherme, C.C.J., Tiago J.C. (2022). Low-cost and easily replicable apparatus: an Arduino controlled device for educational activities focused on measuring Brewster's angle, *Phys. Educ.* 57 (2), 025007.DOI:10.1088/1361-6552/ac3f71.
- Güngör, T. (2025) Mühendislikte Öncü ve Akademik Çalışmalar. Editör: Dr. Öğr. Üyesi Umut ÖZKAYA, *Optik Ölçümler için Maliyet Etkin Arduino Tabanlı Bir Spektrofotometrenin Geliştirilmesi*, (pp.111-123). All Sciences Academy
- Güngör, E., Güngör, T. ve Saka, B. (2022). Angle dependent wavelength measurement using open spectrophotometer and optical characterization of thin films. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 24(11-12), 523–529.
- Güngör, T., Güngör, E. (2022). Yarıiletken Aygıt Karakterizasyonu için Arduino UNO Tabanlı Otomatik Hall/Direnç Ölçüm Sistem Tasarımı ve Uygulaması. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen Ve Mühendislik Dergisi*, 24(70), 205-212. <https://doi.org/10.21205/deufmd.2022247019>.
- Ishafit, Mundilarto, Surjono, H.D. (2020). Development of light polarization experimental apparatus for remote laboratory in physics education. *Physics Education*, 56 (1), 015008. DOI: 10.1088/1361-6552/abc4da.
- Ismailov, A.S., Jo'rayev, Z.B. (2022). Study of arduino microcontroller board. *Science and Education, Scientific Journal*, 3(3), 172-179.

- Li, W., Lu, X., & Lin, Y. (2009). Novel Absolute Displacement Sensor with Wide Range Based on Malus Law. *Sensors*, 9(12), 10411-10422. <https://doi.org/10.3390/s91210411>
- Thedsakhulwong, A., Hernmek, P. (2018). Development of the low-cost hot plate temperature controller using Arduino Uno R3. *Journal of Physics: Conference Series*, 1144.

Gıda Mühendislerinin Mesleki Memnuniyet Durumu

Volkan SEVİNÇ¹

Aydan DALBASTI²

İsmail YILMAZ³

- 1- Yüksek Gıda Mühendisi; Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gıda Mühendisliği Anabilim dalı. yadela@gmail.com, ORCID No: 0009 -0001-6131-6928
- 2- Yüksek Lisans Öğrencisi; Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gıda Mühendisliği Anabilim dalı. aydandalbasti@yemek365.com.tr , ORCID No: 0009-0007-7480-4182
- 3- Prof. Dr.; Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Ziraat Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü. Tekirdağ iyilmaz@nku.edu.tr ORCID No: 0000-0003-1116-0934

ÖZET

Bu çalışmada gıda mühendisliği diplomasına sahip, Türkiye veya yurtdışında bulunan gıda mühendislerinin, meslek ve mesleki hayatı ile ilgili düşünceleri, sosyal yaşamı ve meslek odasının meslek hayatına katkılarının incelenmesi amaçlanmıştır. Gıda Mühendislerinin eğitim dönemi başlangıç alınarak, mesleğe adım attığı dönemlerde istihdam süreçleri, iş bulmada yaşadığı zorluklar, günümüzdeki maddi şartları ve özlük hakları ile ilgili durumları hakkında detaylı tarama yapılmıştır. Başlıca konu başlıkları bölümlendirilerek çoktan seçmeli ve açık uçlu sorular ile elektronik anket yöntemi ile veriler toplanmıştır. Verilere ulaşmak için çeşitli gıda mühendisliği mesleki topluluklarına, üniversite gıda mühendisleri mezun topluluklarına ve TMMOB Gıda Mühendisleri Odası üyelerine ulaşılarak anket uygulanmıştır. Araştırmanın anket çalışma grubu Türkiye'nin farklı illeri başta olmak üzere, dünyanın farklı ülkelerinde bulunan "gıda mühendisleri" ne uygulanmıştır. Ankete toplamda 509 kişi katılımcı olup, gıda mühendisi olduğunu beyan eden 480 katılımcının yanıtları araştırma kapsamında değerlendirmeye alınmıştır. Yapılan çalışma sonuçlarına göre; gıda mühendislerinin %86,25'i ülkemizde gıda mühendisliği bölümünün sayıca fazla olduğunu ifade etmiştir. Bu durum, son yıllarda kontenjanların dolmaması nedeniyle kapanan gıda mühendisliği bölümlerinin durumuyla örtüşmektedir. YÖK verilerine göre 2022 yılında Türkiye'de Gıda Mühendisliği bölümlerine toplam 1778 kontenjan ayrılmışken, bu kontenjanlara 1.275 öğrenci yerleşmiştir. 2024 verilerine göre ise açılan 1311 gıda mühendisliği kontenjanına yerleşen öğrenci sayısı 1013' tür. Bu veri, bir anlamda gıda mühendisliği mesleğine olan talebin de düşmekte olduğunun bir göstergesidir. Yapılan anket çalışmasında; yeniden meslek seçecek olsam yine gıda mühendisliğini seçerdim diyenlerin oranı sadece %22,08 olup, bu veri gıda mühendislerinin mesleki memnuniyet durumunun bir özeti olarak değerlendirilebilir.

Anahtar Kelimeler: Gıda, Gıda Mühendisi, Meslek Odası, Aidiyet, Memnuniyet

1. GİRİŞ

Gıda mühendisliği, gıdanın işlenmesi, kalitesinin kontrolü, muhafaza edilmesi ve pazara güvenli şekilde sunulması gibi tüm süreçlerin eksiksiz yerine getirilmesini sağlayan; ayrıca yeni ürün geliştirmek amacıyla tedarik, araştırma-geliştirme, üretim, kalite kontrol, ambalaj, depolama ve lojistik gibi aşamalarda teorik ve pratik bilgiye sahip bireylerin yetiştirildiği bir mühendislik dalıdır. Gıda mühendisliği, multidisipliner bir mühendislik alanı olup diğer mühendislik disiplinleriyle etkileşim içindedir (Aksoy vd., 2020).

Türkiye’de gıda mühendisliği eğitiminin temelleri Cumhuriyet’in ilk yıllarına dayanmaktadır. Tarıma dayalı sanayileşmenin önem kazandığı bu dönemde, gıda üretiminin modernleşmesi ve bilime dayalı yöntemlerle geliştirilmesi ihtiyacı, gıda mühendisliği disiplininin doğuşuna zemin hazırlamıştır.

O dönemlerde Ziraat Enstitüleri ile başlayan gıda mühendisliği eğitimi, zaman içerisinde farklı enstitü ve fakültelerde farklı isimlerle gelişimini sürdürmüştür. Ülkemizde gıda teknolojisi alanındaki ilk fakülte olarak kabul edilebilecek “Ziraat Sanatları Fakültesi” (ZSF), 1933 yılında Ankara’da kurulan “Yüksek Ziraat Enstitüsü” (YZE)’nin dört fakültesinden biridir. Bu anlamda, ülkemizde gıda alanındaki ilk bilimsel araştırmaların ve çalışmaların yapıldığı kuruluş olarak bilinmektedir (Anonim, 2025a). Ankara Üniversitesi’nin kuruluşundan iki yıl sonra, 1948’de YZE, Ziraat Fakültesi adıyla Ankara Üniversitesi’ne bağlanmıştır. Bu doğrultuda, Ziraat Sanatları Fakültesi (ZSF) de “Ziraat Teknolojisi” bölümüne dönüştürülmüştür. Bu bölümde, gıda dallarına göre; süt mamulleri, mezbaha mahsulleri, ziraat sanatları ve ihtimar sanatları gibi kürsüler oluşturulmuştur (Anonim, 2025a). Ülkemizde gıdayla ilgili ilk lisans programı ise yine Ankara Üniversitesi’nde, 1954 yılında, Ziraat Teknolojisi adı altında bu bölümde başlatılmıştır (Anonim, 2025a). Ankara Üniversitesi ve daha sonra başta Ege, Çukurova, Ondokuz Mayıs ve Uludağ üniversiteleri olmak üzere birçok üniversitede bu alan; 1970’li yıllarda “Gıda ve Fermantasyon Teknolojisi”, 1980’li yıllarda “Tarım Ürünleri Teknolojisi”, 1990’lı yıllarda ise “Gıda Bilimi ve Teknolojisi” isimlerini almıştır (Anonim, 2025a; Anonim, 2025b; Anonim, 2025c; Anonim, 2025d; Anonim, 2025e).

Gıda Mühendisleri Odası’nın yazılı kayıtlarına göre, ülkemizde gıda mühendisliği mesleği resmî olarak ilk mezunlarını 1979 yılında, Ege Üniversitesi Gıda Mühendisliği Bölümü’nden vermiştir. Ancak mesleğin kurumsallaşması zaman almıştır. İlk olarak, 1990 yılına kadar Ziraat Mühendisleri Odası çatısı altında faaliyet gösteren meslek grubu, sonrasında Kimya Mühendisleri Odası bünyesinde yer almıştır. Bu dönemlerde meslek mensupları, kendi kimliklerini oluşturmak ve gıda mühendisliğinin önemini vurgulamak amacıyla çeşitli komisyonlar kurarak faaliyetlerde bulunmuşlardır (Anonim, 2025f). 2023 yılı itibarıyla, ülkemizde 57 üniversitede Gıda Mühendisliği eğitimi verilmektedir. Bunların 55’i Türkiye sınırları içinde, 2’si ise yurt dışında (Kıbrıs ve Kırgızistan) yer almaktadır. Üniversitelerin 52’si devlet, 5’i vakıf üniversitesidir. 2023 yılı kontenjan verilerine göre, o yıl için kontenjan açmayan üniversiteler hariç tutulduğunda, örgün eğitime devam eden 41 üniversitede Gıda Mühendisliği Bölümü bulunmaktadır (Anonim, 2025g).

Gıda Mühendisliği bölümlerinde 4 yıllık lisans eğitimi verilmekte olup, bazı üniversitelerde yabancı dil hazırlık programları da yer almaktadır (Anonim, 2025g). Ülkemizin gıda sanayisi dikkate alındığında, geçmişte çok eskiye dayanmayan gıda mühendisliği eğitimi toplumumuz için oldukça

önemli bir konumdadır. Her ne kadar öğrenci kabul eden bölüm sayısı azalmış olsa da, mevcut bölüm sayısının fazla ve altyapının yetersiz olduğu değerlendirilmektedir (Buzrul, 2022).

Eğitim sürecinde; matematik, fen bilimleri, mühendislik bilimleri, gıda bilimi, gıda işleme teknolojileri, mikrobiyoloji, kalite, istatistik, tasarım, ekonomi ve yönetim gibi alanlarda dersler verilmektedir. Gıda mühendisleri, gıda üretim süreçlerinde kalite kontrol, hijyen ve sürdürülebilirlik gibi alanlarda kritik roller üstlenmektedir. Özellikle modern gıda sanayisinin gelişmesiyle birlikte, gıda mühendislerine duyulan ihtiyaç artmış, mesleğin toplum sağlığı ve sanayi açısından önemi daha net biçimde anlaşılır hale gelmiştir. Gıda mühendisleri yalnızca üretim süreçlerinde değil, aynı zamanda ARGE, kalite yönetimi ve denetim gibi alanlarda da aktif görev almaktadır.

Gökçe (2011), yaptığı bir çalışmada gıda mühendisliği bölümünün görece genç bir bölüm olmasının avantaj ve dezavantajlarına şu şekilde değinmiştir: “En eskisi 36 yıllık geçmişe sahip olan gıda mühendisliği bölümlerini, bugün 150. veya 170. kuruluş yıl dönümlerini kutlayan diğer bazı mühendislik dallarının altyapıları ile kıyaslamak mümkün değildir ve kıyaslanmamalıdır. Dolayısıyla, meslek olarak yeni olmak bazı avantajlar sağlasa da ciddi eksiklikleri de beraberinde getirmektedir. Örneğin, çoğu yeni açılan gıda mühendisliği bölümünde ciddi laboratuvar eksiklikleri bulunmaktadır. Öğrencilerin öğrendiklerini uygulamalı olarak tecrübe edebilmeleri için son derece önemli olan pilot tesisler, birçok bölümde mevcut değildir, var olan yerlerde ise süreklilik arz eden bir çalışma programı bulunmamaktadır. Öğretim elemanı yetersizliği nedeniyle, öğrencilerin aynı hocadan birkaç farklı ders aldığı ve bu durumun hocaların araştırma yapmasını ve kendini geliştirmesini engellediği bir ortamda, kalifiye gıda mühendisleri yetiştirmek pek çok gıda mühendisliği bölümü için mümkün görünmemektedir.

Gelecekteki hedeflerden biri, bölüme kabul edilen öğrenci sayısının azaltılması yoluyla eğitim kalitesinin artırılması ve uygulama ağırlıklı çağdaş eğitim düzeyinin daha da yükseltilmesidir. Ayrıca, bölüm bünyesinde alt bilim dallarına ait pilot gıda üretim ve işleme tesislerinin kurulması, mevcut tesislerin geliştirilmesi ve laboratuvar imkanlarının artırılması yönünde çalışmalar yürütülmektedir. Bu doğrultuda, çağdaş gıda mühendisliği eğitimi ve araştırmaları alanındaki gelişmeler titizlikle takip edilmekte olup, bölümün güçlendirilmesi konusunda her türlü çaba gösterilmelidir (Sert, 2011).

Gıda mühendisliği eğitiminde staj uygulamaları önemli bir yer tutmaktadır. Tüm mühendislik dallarında olduğu gibi, gıda mühendisliği eğitiminde de staj, mühendis adaylarının iş dünyasıyla ve sektörel uygulamalarla ilk buluşma noktasıdır. Staj deneyimi, mezunların hızla gelişen ulusal ve uluslararası gıda endüstrisine adaptasyonlarını kolaylaştıran önemli bir kazanım sağlamaktadır. Öğrencilerde mesleki gelişim, özgüven ve ekip çalışmasına uyum açısından staj uygulamaları oldukça faydalıdır. Bu sürecin yalnızca eğitim kurumları açısından değil, sektör açısından da verimli ve

başarılı geçmesi hedeflenmektedir (Doğan, 2019). İntörn gıda mühendisi uygulamasının, gıda mühendisliği bölümleri ile gıda işletmeleri arasındaki bağı güçlendirebileceği ve mezuniyete yaklaşmış öğrenciler için önemli bir fırsat olduğu değerlendirilmektedir. Bu nedenle, gıda mühendisliği bölümlerinin bu uygulamayı gözden geçirmesi ve uygulanabilirliğini değerlendirmeye başlaması gerekmektedir. Halihazırda intörn mühendislik uygulamasına sahip bölümlerin ise bu uygulamadaki eksiklikleri ve aksaklıkları tespit ederek gerekli iyileştirmeleri yapmaları yerinde olacaktır. Ülkemizin gıda mühendisi ihtiyacının orta ve uzun vadede belirlenebilmesi için, Gıda Mühendisleri Odası, Gıda Mühendisliği Bölümleri, gıda sanayi temsilcileri, Tarım ve Orman Bakanlığı ile diğer ilgili devlet kurumlarından yetkili kişilerin bir araya gelerek mesleğin geleceğine dair değerlendirme yapmaları gerekmektedir (Buzrul, 2022).

Toplu yemekçilik sektörünün önem kazanmasıyla birlikte, bu alanda gıda mühendisi istihdamı hızla artmıştır. Gıda mühendisleri, toplu yemek hizmetinin her aşamasında aktif rol almakta ve özellikle gıdanın muhafazası ile işlenmesi süreçlerinde işletmelere rehberlik etmektedir (Günaydın, 2018). Ancak büyük şehirlerde gıda mühendislerinin en yoğun olarak istihdam edildiği bu sektör, aynı zamanda mesleki memnuniyetin en düşük olduğu alanlardan biri olarak öne çıkmaktadır.

Ülkemizde gıda mühendisleri, iş sağlığı ve güvenliği alanlarında da görev almaktadır. Yapılan incelemeler, gıda mühendislerinin, çalıştıkları ortamlardaki olumsuz koşulları iyileştirme düşüncesine sahip olduklarını ve iş sağlığı ve güvenliği konularında özverili bir şekilde çalıştıklarını göstermektedir. Bu mühendislerin daha verimli çalışabilmeleri ve iş doyumlarının artırılması amacıyla takım çalışmasına yatkın ekiplerin oluşturulması gerektiği değerlendirilmektedir. Ayrıca, gıda mühendislerinin görevlerini istekle yerine getirdikleri, çalıştıkları alanlardaki aksaklıkları tespit ederek hem iş süreçlerini hem de kişisel gelişimlerini ilerlettikleri gözlemlenmektedir (Süngü, 2021).

Kalite Yönetim Sistemleri kapsamında çalışan gıda mühendislerine yönelik yapılan bir çalışmada, bu kişilerin görevlerini gururla yerine getirdikleri ve işlerini zevkli buldukları belirlenmiştir. Gıda mühendislerinin iş tatmininin artırılması için ücret ve diğer maddi haklar, terfi ve ödül mekanizmaları ile ekip içi ilişkiler gibi unsurlarda iyileştirmeler yapılmalıdır. Bu iyileştirmeler gerçekleştirilirken, çalışanların demografik özellikleri ve bu değişkenlere göre farklılaşan ihtiyaçları da mutlaka dikkate alınmalıdır (Sertkaya, 2011). Gıda güvenliği açısından devlet otoritelerinin kontrol mekanizmalarını işletmesi önem arz etmektedir (Yılmaz ve ark., 2015). Kontrol mekanizmalarında da bu eğitimi almış olan kişilerin görevlendirilmesi ve görevlilere bu konuda yetki ve sorumluluk verilmesi tüketici sağlığı açısından da gerekmektedir (Yılmaz ve ark. 2009).

Gıda mühendislerinin mesleki yaşamlarını ve mesleki memnuniyetlerini konu alan çeşitli araştırmalarda, en olumsuz düşüncelerin

genellikle işyerinden sağlanan maddi ve sosyal haklara yönelik olduğu gözlemlenmiştir. Gıda mühendisleri örnekleminde gerçekleştirilen ve etik davranma niyetinin Planlı Davranış Teorisi çerçevesinde değerlendirildiği bir çalışmada, etik davranış söz konusu olduğunda, gıda mühendislerinin ahlaki normlara sosyal normlardan daha fazla önem verdikleri belirlenmiştir. Bu bağlamda kişisel prensipler, hissedilen suçluluk duygusu, toplumdaki saygınlık ve dini inanç gibi bireysel ve ahlaki unsurların meslektaşların, iş arkadaşlarının ya da değer verilen diğer kişilerin düşüncelerinden daha fazla önemsendiği ortaya konmuştur. Diğer bir ifadeyle, ahlaki kuralların gıda mühendisleri için sosyal kurallardan daha öncelikli olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca, gıda mühendislerinin ahlaki ve sosyal normların önemine yönelik algıları arttıkça, etik davranış sergileme niyetlerinin de yükseldiği belirlenmiştir (Uzunsoy, 2012). Gıda Mühendisliği mezunları ve meslek mensuplarının sayısının artmasıyla birlikte, birlik, beraberlik ve örgütlü hareket etme ihtiyacı doğmuştur. Diğer mühendislik ve mimarlık meslek dallarında olduğu gibi meslek odasının kurulması, meslektaşların haklarını korumak ve mesleğin tanınırlığını, bilinirliğini artırmak amacıyla Türkiye Mimar ve Mühendis Odaları Birliği (TMMOB) çatısı altında Gıda Mühendisleri Odası'nın kurulmasına karar verilmiştir (Anonim, 2025f; Anonim, 2025h).

2023 yılı verilerine göre, Gıda Mühendisleri Odası'na kayıtlı yaklaşık 25.000 asıl üye ve 3.000 öğrenci üye bulunmaktadır (Anonim, 2025f). Diğer meslek kollarında olduğu gibi, iş hayatına atılan gıda mühendisleri için Gıda Mühendisleri Odası önemli görev ve sorumluluklar üstlenmektedir. Gıda Mühendisleri Odası hem en genç hem de en hızlı büyüyen meslek odalarından biri olarak gösterilmektedir. Bu kapsamda, Odaların tüm sektörlerde olduğu gibi gıda sektöründe de deneyimli mühendislerle yeni mezunları bir araya getirerek çalışma grupları oluşturması gerekmektedir (Şen, 2020). Gıda Mühendisleri Odası'nın, mühendislik mesleğine katkı sağlamak ve meslektaşlarına destek olmak gibi sorumlulukları bulunmaktadır. Ancak burada unutulmaması gereken husus mühendislerin karşılaştıkları sorunları adaya açık ve somut biçimde iletmeleri ve aynı zamanda odaya destek olmaları gerektiğidir (Şen, 2020).

1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın amacı, Türkiye'de gıda mühendislerinin mesleki memnuniyet düzeylerini incelemek, karşılaştıkları zorlukları belirlemek ve meslek odalarının bu sürece sağladığı katkıları değerlendirmektir. Araştırma kapsamında, gıda mühendislerinin meslek hayatına dair görüşleri, istihdam süreçleri ve sosyal yaşamları detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Bu kapsamda, Gıda Mühendisliği diplomasına sahip olan ve Türkiye'de veya yurtdışında ikamet eden gıda mühendislerinin mesleki yaşama dair düşünceleri, sosyal yaşamları ve meslek odalarının meslek hayatlarına katkıları araştırılmıştır. Sonuç olarak bu çalışma, gıda mühendislerinin meslekleriyle ilgili memnuniyet düzeylerini anlamaya yönelik veriler sunarak hem sektör

temsilcilerine hem de meslek örgütlerine politika geliştirme süreçlerinde katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

1. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu araştırmanın materyalini, 2023 yılı Temmuz–Aralık ayları arasında Türkiye genelinde ve yurtdışında gıda mühendisliği diplomasına sahip, mesleğini aktif olarak yapan veya yapmayan gıda mühendisleri oluşturmaktadır. Araştırma için düzenlenen online anket ile 509 kişiye ulaşılmış olup, gıda mühendisi olduğunu beyan eden 480 meslek sahibinin yanıtları değerlendirmeye alınmıştır. 29 katılımcı ise başlangıçta gıda mühendisi olmadığını beyan ettiğinden kapsam dışı bırakılmıştır. Anket sorularının değerlendirilmesine istinaden çıkan sonuçlar, görüş ve öneriler kısmında yorumlanmıştır. Çalışmanın anket aşamasında uygulanacak anketlerdeki eksiklikleri gidermek amacıyla pilot anketler hazırlanmıştır. Hazırlanan bu anketler tesadüfi olarak seçilen gıda mühendislerine uygulanmıştır. Pilot anketlerden elde edilen sonuçlar dikkate alınarak anket formları tekrar gözden geçirilmiş, düzenlemeler yapılmış ve esas anketler hazırlanarak tezde kullanılan anket çalışmasına başlanmıştır.

Araştırmanın uygulanabilmesi için, Gıda Mühendisleri Odası’ndan üye listesi alınmıştır. Elde edilen listeye göre aktif olarak çalışan toplam 24270 gıda mühendisi ile anket uygulama zorluğundan dolayı örnekleme yapılmıştır. Anket sayısı oransal örnekleme yöntemine göre %95 güven aralığında ve ortalamadan %5 sapma ile 385 olarak tespit edilmiştir. Meydana gelebilecek veri kayıplarını önleyebilmek adına çalışma kapsamında %25 ilave anket yapılmıştır. Gerekli veri temizliği yapıldıktan sonra toplam olarak hatasız 480 ankete ait veriler dikkate alınmıştır. Anket sayısını belirlemek için eşitlik 1 kullanmıştır (Daniel, 1999).

$$n = z^2 * p * q / c^2$$

(1)

n: Örnek büyüklüğü z: z cetvel değeri (%95 güven aralığında 1.96)
p: gıda mühendislerinin oranı (0.5) q: (1-p) gıda mühendisi olmayanların oranı (0.5)

c: Hata terimi (0.05 = ±5)

Çalışma kapsamında mevcut veriler, aritmetik ortalama ve yüzde hesapları kullanılarak değerlendirilmiştir. Ankete katılan gıda mühendislerinin görüşleri temel istatistiki yöntemlerle (frekans dağılımı ve ortalama) ölçülmüştür. Gıda Mühendislerinin mesleki memnuniyet durumları 5’li Likert Ölçeği kullanılarak belirlenmiştir. Bu çalışmada, sosyal içerik göz önünde bulundurularak online anket yöntemi tercih edilmiştir. Anket, toplam 60 sorudan oluşmakta olup, veriler yedi ayrı başlık altında analiz ve değerlendirmeye tabi tutulmuştur.

2. ARAŞTIRMA BULGULARI

2.1. Gıda Mühendislerine Uygulanan Anket Sonuçları

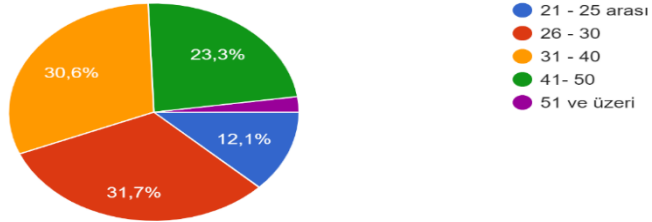
Gıda Mühendislerinin Mesleki Memnuniyetlerini değerlendirmek amacıyla uygulanan online anket çalışmasında anket sorularının yanıtlanması

istenmiştir. Çalışmaya katılan katılımcıların profili değerlendirildiğinde aşağıdaki verilere ulaşılmıştır.

2.1.1 Anket Katılımcısı Gıda Mühendislerinin Demografik Özelliklerine Göre Değerlendirilmesi

Ankete katılan gıda mühendislerinin; 58' inin 21-25 yaş arası (%12,1), 152' sinin 26-30 yaş arası (%31,7), 147' sinin 31-40 yaş aralığında (%30,6), 112' sinin 41-50 yaş arası (%23,3) ve 11' inin 51 yaş ve üzerinde (%2,3) olduğu tespit edilmiştir. Ankete katılan gıda mühendislerinin yaş aralığına göre dağılımı Şekil 1' de gösterilmiştir. Gıda mühendislerinin yaş aralığı dağılımına bakıldığında yaş ortalamasının 25 ve üzeri olanların dolayısıyla yeni mezunlara kıyasla belli bir süre iş hayatında olan katılımcı sayısının oransal olarak oldukça yüksek olduğu gözlenmektedir.

Yaşınız ?
480 yanıt



Şekil 1. Anket katılımcısı gıda mühendislerinin yaş aralığı profili dağılımı

Anket sorularını yanıtlayan gıda mühendislerinin; 324' ünün kadın (%67,5), 155' inin erkek (%32,3) erkek olup, 1' inin cinsiyetini belirtmek istemediği (%0,2) belirlenmiştir. Yanıtlara göre, gıda mühendisliği eğitiminde ve gıda sektöründeki çalışan gıda mühendisi dağılımındaki olduğu gibi ankete katılımda da kadın oranının fazla olduğu gözlenmiştir.

Yaşadıkları yere göre dağılım değerlendirildiğinde gıda mühendislerinin; 6' sının köy/kasabada (%1,3), 90' ının ilçede (%18,8), 381' inin ilde ve sadece 3' ünün (%0,6) yurtdışında yaşadığı belirlenmiştir. Yanıtlara göre, gıda mühendislerinin büyük çoğunluğunun büyük şehirlerde ve şehir merkezlerinde yaşadığı tespit edilmiştir.

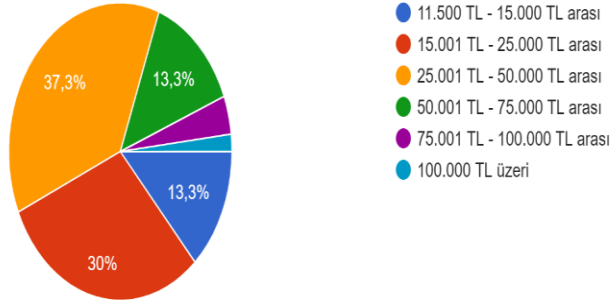
Medeni durumlarına incelendiğinde Gıda mühendislerinin, 197' sinin bekar (%41), 266' sının evli (%55,4) ve 17' sinin dul/boşanmış (%3,5) olduğu belirlenmiştir. Anket katılan gıda mühendislerinin yarısından fazlasının evli ya da daha öncesinde en az bir evlilik yaşadığı gözlenmektedir. Gıda mühendisleri çocuk sahibi olma durumlarına ve çocuk sayılarına göre analiz edilmiştir. Anket sorularının yanıtları incelendiğinde, katılımcıların 267' sinin (%55,6) hiç çocuğu olmadığı; 101' inin (%21) bir çocuğu; 91' inin (%19) iki çocuğu; 19' unun (%4) üç çocuğu; 2' sinin ise dört çocuğu olduğu belirlenmiştir. Beş ve üzeri çocuğa sahip katılımcı bulunmamaktadır. Anketi yanıtlayan gıda mühendislerinin yarısından fazlasının çocuk sahibi olmadığı,

çocuk sahibi olanların büyük çoğunluğunun ise bir veya iki çocuk sahibi olduğu gözlemlenmiştir.

Aylık gelir düzeyine (eve giren aylık gelir düzeyine göre) gıda mühendislerinin dağılım durumu incelendiğinde ankete katılan gıda mühendislerinin yanıtlarına göre, 64 katılımcının (%13,3) eve giren aylık gelir toplamı 11.500,00 – 15.000 TL arasında; 144 katılımcının (%30) 15.000,01 – 25.000 TL arasında; 179 katılımcının (%37,3) 25.000,01 – 50.000 TL arasında; 64 katılımcının (%13,3) 50.000,01 – 75.000 TL arasında; 20 katılımcının (%4,2) 75.000,01 – 100.000 TL arasında ve 9 katılımcının (%1,9) ise 100.000 TL üzerinde olduğu belirlenmiştir. Ankete katılan gıda mühendislerinin aylık gelir düzeyine göre dağılımı Şekil 2’de gösterilmiştir. Yanıtların analizinde sonuç olarak; ankete katılan gıda mühendislerinin yaklaşık yarısının, aylık gelir düzeyinin (eve giren toplam aylık gelir seviyesine göre) İZP/ÇZP maaşının altında olduğu gözlenmektedir. Anketin yapıldığı 2023 Temmuz-Aralık döneminde Türkiye’de net asgari ücret 11.402 TL, İZP/ÇZP maaşı ise net 28.500 TL’dir (Anonim, 2025i). Aynı döneme ait Türk-İş verilerine göre dört kişilik bir ailenin aylık gıda harcaması tutarı (açlık sınırı) 11.658 TL, gıda ile birlikte diğer temel ihtiyaçlar için haneye girmesi gereken toplam gelir tutarı (yoksulluk sınırı) ise 37.974 TL olarak belirlenmiştir. Ayrıca, bekâr bir çalışanın aylık yaşam maliyeti 15.123 TL’dir (Anonim, 2025k).

Aylık gelir düzeyi nedir ? (Evinize giren toplam aylık gelir seviyesi ?)

480 yanıt



Şekil 2. Anket katılımcısı gıda mühendislerinin aylık gelir düzeyine (eve giren toplam aylık gelir seviyesine göre) göre dağılımı

Ankete katılım gösteren 480 gıda mühendisinin hangi tür liselerden mezun olduklarını belirlemek amacıyla sorulan sorunun yanıtlarına göre, meslek mensuplarının; 191’ inin Anadolu Lisesi (%39,8), 17’ sinin Fen Lisesi (%3,5), 28’inin Teknik Meslek Lisesi (%5,8), 198’inin Düz Lise (%41,2), 16’sının İmam Hatip Lisesi (%3,3), 9’unun Kolej (%1,9) ve 21’inin diğer tür liselerden (%4,5) mezun olduğu tespit edilmiştir.

Gıda mühendislerinin hangi üniversiteden mezun olduğuna göre dağılımı incelenmiştir. Katılımcı gıda mühendislerinin mezun oldukları üniversiteleri belirlemek amacıyla yöneltilen soruya verilen yanıtlar doğrultusunda; 95 katılımcının (%19,79) Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi'nden (eski adıyla Trakya Üniversitesi'nden mezun olanlar dahil), 37 katılımcının (%7,71) Uludağ Üniversitesi'nden, 19 katılımcının (%3,96) Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi'nden, 18 katılımcının (%3,75) Samsun Ondokuz Mayıs Üniversitesi'nden, 17 katılımcının (%3,54) Ege Üniversitesi'nden, 16 katılımcının (%3,33) Manisa Celal Bayar Üniversitesi'nden, 15 katılımcının (%3,12) Selçuk Üniversitesi'nden ve 14 katılımcının (%2,92) Erzurum Atatürk Üniversitesi'nden mezun olduğu belirlenmiştir. Katılımcıların 249'u ise (%51,88) diğer üniversitelerden mezun olmuştur.

Gıda mühendislerinin Gıda Mühendisliği bölümüne dikey geçiş yapma durumları incelenmiştir. Anket katılımcılarının verdikleri yanıtlara göre, dikey geçiş yoluyla bölüme yerleşen gıda mühendisi oranının oldukça düşük olduğu görülmektedir. Katılımcıların 59'unun (%12,3) dikey geçiş ile bölüme giriş yaptığı, 421'inin (%87,7) ise doğrudan yerleştiği belirlenmiştir. Gıda mühendisliği bölümlerinde yatay geçiş oranının belirlenmesi amaçlanmış ve verilen yanıtlara göre gıda mühendislerinin üniversitelerine yatay geçiş yapma durumlarına göre dağılımı incelenmiştir. Verilen yanıtlara göre gıda mühendislerinin; 24' ünün üniversitesine yatay geçiş yaptığı (%5) ve 456' sının yatay geçiş yapmadığı (%95) yani kazanmış olduğu aynı üniversitede eğitimini tamamladığı belirlenmiştir.

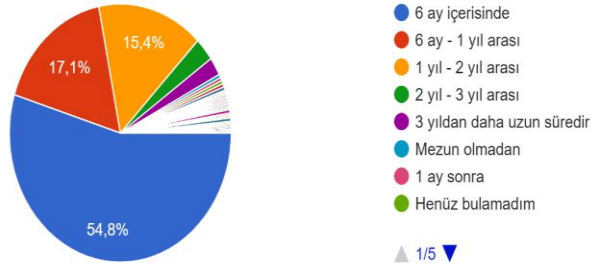
2.1.2 Anket Katılımcısı Gıda Mühendislerinin Mesleki ve İş Hayatı Bilgilerine Göre Değerlendirilmesi

Anketin dördüncü bölümünde katılımcıların meslek ve iş hayatı bilgilerini değerlendirmek amacıyla sorular sorulmuştur. Bu bölümde anket katılımcısı gıda mühendislerinin; eğitim hayatını tamamladıktan sonra mesleğe atılma süreçleri, mesleki ve sektörel deneyim süreleri, sektör tercihleri incelenmiş ve değerlendirilmiştir.

Gıda mühendisliği meslek mensuplarının, lisans eğitimini tamamladıktan ne kadar süre sonra iş buldukları analiz edilmiştir. Gıda Mühendislerine, mezun olduktan sonra ne kadar sürede iş bulduklarını tespit etmeye yönelik sorular sorulduğunda verdikleri yanıtlara göre dağılım şu şekilde olmuştur; gıda mühendislerinin; 276'sı mezun olduktan sonra 6 ay içerisinde (%57,5), 82' si 6 ay – 1 yıl arasında (%17,08), 74' ü 1yıl – 2 yıl arasında (%15,42), 14' ü 2 yıl – 3 yıl arasında (%2,92), 11' i 3 yıldan daha uzun süre sonra (%2,29), 11' i mezun olmadan önce (%2,29) iş bulup çalışmaya başladığını belirtmiştir. Bunların dışında 12 kişi ise iş bulamadığını/çalışmadığını (%2,5) beyan etmiştir. Ankete katılan gıda mühendislerinin mezun olduktan sonra iş bulma ve çalışmaya başlama(istihdam) sürelerine göre dağılımı Şekil 3' de gösterilmiştir.

Mezun olduktan ne kadar süre sonra iş buldunuz ?

480 yanıt



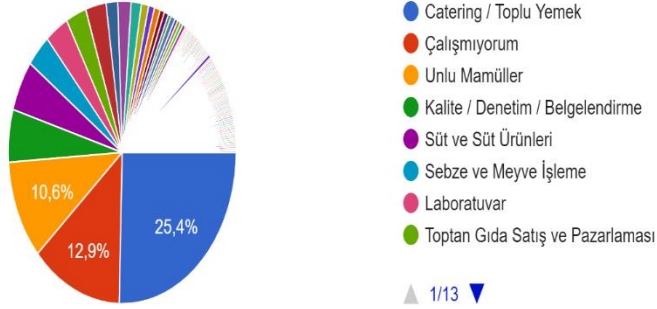
Şekil 3. Anket katılımcısı Gıda Mühendislerinin mezun olduktan sonra iş bulma ve çalışmaya başlama (istihdam) sürelerine göre dağılımı

Anket sorularını yanıtlayan 480 gıda mühendisinin, staj yaptığı işletmede çalışma durumunu belirlemek amacıyla, mezun olduktan sonra staj yaptıkları işletmede iş başlayıp başlamadıkları sorusu yöneltilmiştir. Verilen yanıtlar incelendiğinde, gıda mühendislerinin; 54' ü mezun olduktan sonraki dönemlerde staj yaptığı işletmede çalışmış (%11,2) ve 426'sı ise staj yaptığı işletmede çalışmamıştır (%88,8). Yanıtlara göre, gıda mühendisleri çok düşük bir oranda lisans eğitimi sırasında staj yaptıkları işletmede iş hayatına atılmış/çalışmış durumda, bu anlamda staj uygulamalarının etkinliğinin ve verimliliğinin de düşük olduğunu düşündürmektedir.

Gıda mühendislerinin çalıştığı sektörlerle göre dağılımı incelenmiştir. Gıda Mühendislerinin, çalıştığı sektörlerle göre dağılımını belirlemek amacıyla sorulan sorunun yanıtlarına göre, katılımcı 480 Gıda Mühendisinden; 122'si Catering/Toplu Yemek sektöründe (%25,42), 54' ü Unlu Mamuller Sektöründe (%11,25), 28' i Kalite/Denetim/ Belgelendirme sektöründe (%5,83), 27' si Süt ve Süt Ürünleri Sektöründe (%5,63), 21' i Toptan Gıda Satış ve Pazarlama Sektöründe (%4,38), 17' si Sebze ve Meyve İşleme Sektöründe (%3,54), 16'sı laboratuvar sektöründe(%3,33), 14' ü Et ve Et ürünleri sektöründe (%2,92), 10'u gıda katkı maddeleri sektöründe (%2,08), 9'u Akademisyen olarak (%1,88), 7'si gıda ambalaj sektöründe(%1,46), 5' i Yağ Sanayiinde(%1,04) ve 87' si bunlar dışında kalan diğer sektörlerde (%18,13) çalışmaktadır. Ankete katılan gıda mühendislerinin çalıştıkları sektörlerle göre dağılımı Şekil 4' de gösterilmiştir.

Hangi sektörde çalışıyorsunuz ?

480 yanıt



Şekil 4. Gıda Mühendislerinin çalıştığı sektörlere göre dağılımı

Gıda mühendislerinin çalıştıkları sektörde çalışma sürelerine göre dağılımları verdikleri yanıtlara göre şu şekilde dağılım göstermektedir. Gıda Mühendislerinden, 35' i 1 yıldan az süredir sektöründe çalışıyor(%7,29), 160'ı 1-3 yıl arasında sektöründe çalışıyor(%33,33) 57' si 4- 5 yıl arasında sektöründe çalışıyor (%11,88), 85' i 6-10 yıl arasında sektöründe çalışıyor(%17,71), 40'ı 11-15 yıl arasında sektöründe çalışıyor (%8,33), 38'i 16-20 yıldır sektöründe çalışıyor (%7,92), 33'ü 21-25 yıldır sektöründe çalışıyor (%6,88), 7' si 26-30 yıldır sektöründe çalışıyor (%1,46), 3'ü 30'dan fazla yıldır sektöründe çalışıyor (%0,63) ve 22' si ise çalışmadığını beyan etmiştir(%4,58).

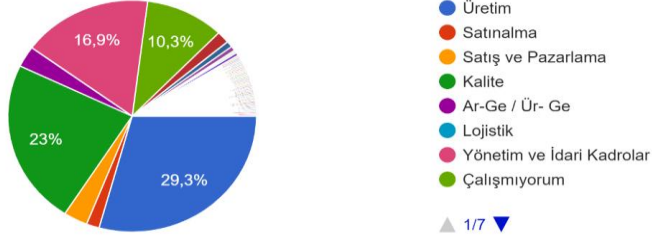
Ankete katılım gösteren 480 katılımcı gıda mühendisine, “toplam iş hayatında olduğu süreyi” belirlemeye yönelik soru sorulduğunda yanıtlar şu şekilde dağılım göstermiştir. Gıda mühendislerinin; 15' i 1 yıldan az süredir iş hayatında (%3,13), 102' si 1-3 yıl arasında iş hayatında (%21,25), 65' i 4-5 yıl arasında iş hayatında (%13,54), 101' i 6-10 yıl arasında iş hayatında (%21,04), 52' si 11-15 yıl arasında iş hayatında (%10,83), 52'si 16-20 yıl arasında iş hayatında (%10,83), 54'ü 21-25 yıl arasında iş hayatında (%11,25), 16'sı 26-30 yıl arası iş hayatında (%3,33), 7'si 30' dan fazla yıldır iş hayatında (%1,46) ve 16'sı ise çalışmadığını beyan etmiştir(%3,33).

Gıda mühendislerinin, hangi bölüm ve/veya departmanda çalıştıklarını belirlemeye yönelik soru sorulmuştur. Gıda Mühendislerinin, 148'i üretim departmanında (%30,96), 9'u satın alma departmanında (%1,88), 16'sı satış ve pazarlama departmanında (%3,34), 114' ü kalite departmanında (%23,86), 14' ü ARGE/ ÜRGE departmanında (%2,93), 82' si yönetim ve idari kadrolarda (%17,15) çalışmaktadır. 49 kişi çalışmamakta (%10,25) ve 46 kişi ise diğer bölümlerde (%9,63) çalışmaktadır. 2 kişi ise soruyu

yanıtlamamıştır. Ankete katılan gıda mühendislerinin toplam iş hayatında olduğu süreye göre dağılımı Şekil 5’ da gösterilmiştir.

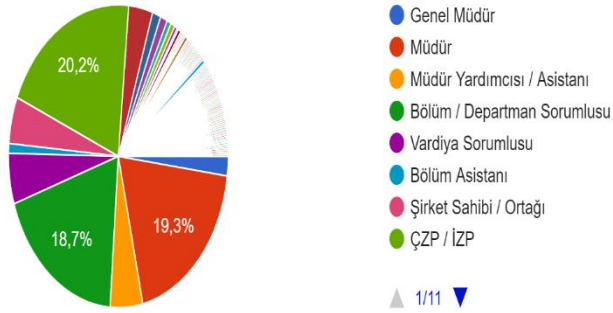
Hangi Bölümde / departmanda çalışmaktasınız ?

478 yanıt



Şekil 5. Anket katılımcısı Gıda Mühendislerinin hangi bölümde/ departmanda çalıştığına göre dağılımı

Gıda Mühendislerinin, “çalıştığı iş yerindeki görevine göre” dağılımını belirlemek amacıyla sorulan sorunun yanıtlarına göre, 480 Gıda Mühendisinden; 11’i genel müdür (%2,29), 93’ü Müdür (%19,38), 23’ü müdür yardımcısı/asistanı (%4,79), 90’ ı bölüm/departman sorumlusu (%18,75), 26’sı vardiya sorumlusu (%5,42), 5’i bölüm asistanı (%1,04), 24’ü şirket sahibi/ortağı (%5,00), 97’si ÇZP/İZP (%20,21) ve 89’ ı diğer görevlerde (%18,54) çalışıyor. 22 kişi ise çalışmıyor/emekli (%4,58) olarak soruyu yanıtlamıştır. Ankete katılan gıda mühendislerinin, çalıştıkları işyerindeki görevlerine göre dağılımı Şekil 6’ de gösterilmiştir.



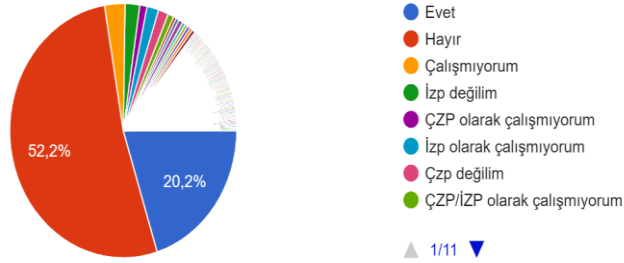
Şekil 6. Gıda Mühendislerinin çalıştıkları işyerindeki görevlerine göre dağılımı

Gıda mühendislerine, bugüne kadar kaç farklı işyerinde çalıştıkları sorulmuştur. Katılımcı 480 gıda mühendisinin “bugüne kadar kaç farklı iş yerinde çalıştıklarına ilişkin verilen yanıtlar şu şekilde dağılım göstermektedir: 77’si 1 işyerinde (%16,04), 96’sı 2 farklı işyerinde (%20,00), 115’i 3 farklı işyerinde (%23,96), 76’sı 4 farklı işyerinde (%15,83), 49’u 5

farklı işyerinde (%10,21) ve 67'si 6 ve üzeri farklı işyerinde (%13,96) çalışmıştır.

Gıda mühendislerinin “aldıkları maaşa göre” dağılımı şu şekildedir: 79'u 11.500 – 15.000 TL arası (%16,42), 95'i 15.001 – 20.000 TL arası (%19,75), 125'i 20.001 – 30.000 TL arası (%25,99), 67'si 30.001 – 40.000 TL arası (%14,14), 13'ü 40.001 – 50.000 TL arası (%2,70), 31'i ise 50.000 TL üzeri maaş aldığını belirtmiştir. Ankete katılanlardan 70'i “diğer” seçeneğini işaretlemiştir.

ÇZP / İZP olarak çalışmakta olan gıda mühendislerinin Gıda Mühendisleri Odasının belirlemiş olduğu taban ücretini alıp almadıkları değerlendirilmiştir. Gıda Mühendislerinden, ÇZP/İZP olarak çalışanların gıda mühendisleri odasının belirlemiş olduğu taban ücretini alıp almadığını belirlemek amacıyla sorulan sorunun yanıtlarına göre, katılımcı 480 Gıda Mühendisinden; 100' ü ÇZP olarak çalıştığını ve odanın belirlediği taban ücretini ve üzerini aldığını (%20,83), 252' si ÇZP olarak çalıştığını ve odanın belirlediği taban ücretini ve üzerini alamadığını (%52,50) belirtmiştir. Katılımcı gıda mühendislerinden 128'i ise ÇZP/İZP olarak çalışmadığını (%26,67) belirtmiştir. Ankete katılan gıda mühendislerinin, aldıkları maaşa göre dağılımı Şekil 7' de gösterilmiştir.



Şekil 7. Gıda Mühendislerinin ÇZP/İZP olarak çalışıyorsa Gıda Mühendisleri Odasının belirlemiş olduğu taban ücretini alabilme durumuna göre dağılımı

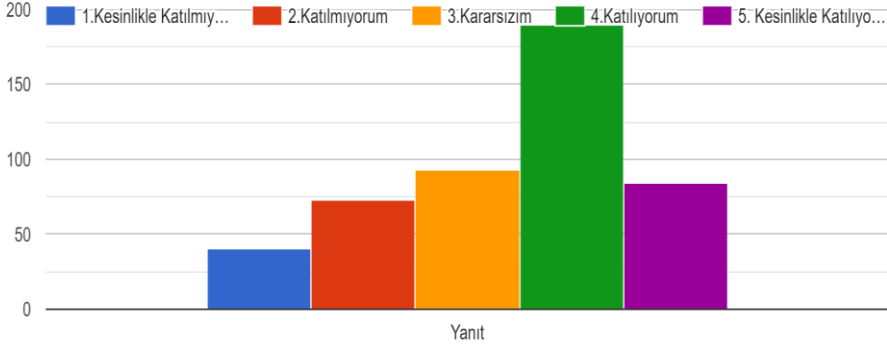
2.1.3 Anket Katılımcısı Gıda Mühendislerinin Çalışma Ortamı ve Koşullarına Göre Değerlendirilmesi

Anketin beşinci bölümünde anket katılımcısı gıda mühendislerine çalışma ortamı ve koşulları ile ilgili sorular yöneltilmiştir. Bu bölüm 27 sorudan oluşmakta olup, katılımcılardan soruları, şu an çalışmakta oldukları ya da en son çalışmış oldukları işyerini düşünerek yanıtlamaları istenmiştir.

Gıda Mühendislerinden, çalışma ortamındaki koşulları çalışan sağlığı ve iş güvenliği açısından değerlendirmesi istendiğinde; 40'ı Kesinlikle katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%8,33), 73'ü katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%15,21), 93'ü kararsızım seçeneğini işaretlemiş (%19,38), 190'ı katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%39,58) ve 84'ü kesinlikle katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%17,50)'tir. Ankete katılan gıda mühendislerinin,

çalışma ortamlarını çalışan sağlığı ve güvenliği açısından uygun olma durumuna göre dağılımı Şekil 8’ de gösterilmiştir.

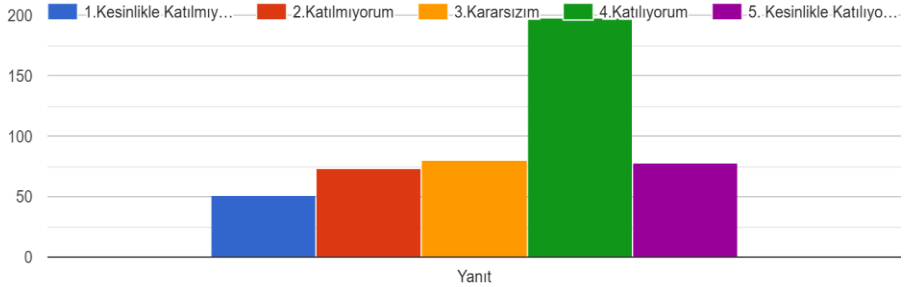
Çalışma ortamınızda koşullar çalışan sağlığı ve iş güvenliği açısından uygun mudur?



Şekil 8. Gıda Mühendislerinin, çalışma ortamlarının çalışan sağlığı ve iş güvenliği açısından uygun olma durumuna göre dağılımı

Gıda mühendislerinin çalışma ortamlarının fiziki uygunluğu ile ilgili değerlendirme yapılmıştır. Gürültü düzeyi, ısıtma, soğutma, havalandırma, temizlik, aydınlatma şartları çalışma ortamının fiziki uygunluk şartları kapsamında ele alınmıştır. Gıda Mühendislerinden, çalışma ortamlarının fiziki koşulları (gürültü düzeyi, ısıtma, soğutma, havalandırma, temizlik, aydınlatma) uygunluğunun değerlendirmesi istendiğinde; 51’i Kesinlikle katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%10,63), 73’ü katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%15,21), 80’i kararsızım seçeneğini işaretlemiş (%16,67), 198’i katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%41,25) ve 78’i kesinlikle katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%16,25)’tir. Ankete katılan gıda mühendislerinin, çalışma ortamlarının fiziki koşulları (gürültü düzeyi, ısıtma, soğutma, havalandırma, temizlik, aydınlatma) uygun olma durumuna göre dağılımı Şekil 9’ da gösterilmiştir.

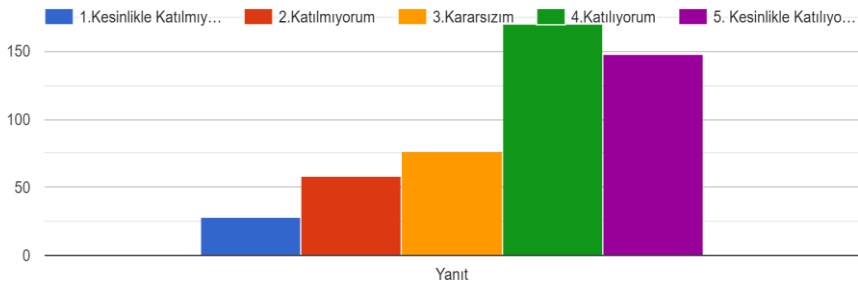
Çalışma ortamınızın fiziki koşulları(gürültü düzeyi, ısıtma, soğutma, havalandırma, temizlik, aydınlatma) uygun mudur?



Şekil 9. Gıda Mühendislerinin, çalışma ortamlarının fiziki koşulları (gürültü düzeyi, ısıtma, soğutma, havalandırma, temizlik, aydınlatma) uygun olma durumuna göre dağılımı

Gıda mühendisliği eğitiminin, iş hayatına atıldıkları aşamada, gıda mühendislerinin işlerini doğru yapmak için yeterli olup olmadığı konusu analiz edilmiştir. Gıda Mühendislerinden; 28'i Kesinlikle katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%5,83), 58' i katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%12,08), 76'sı kararsızım seçeneğini işaretlemiş (%15,83), 170'i katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%35,42) ve 148'i kesinlikle katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%30,83)'tir. Ankete katılan gıda mühendislerinin, iş hayatına atıldıkları aşamada, gıda mühendislerinin işlerini doğru yapmak için yeterli olma durumuna göre dağılımı Şekil 10' da gösterilmiştir.

Aldığım eğitim işimi doğru yapmak için gereklidir.

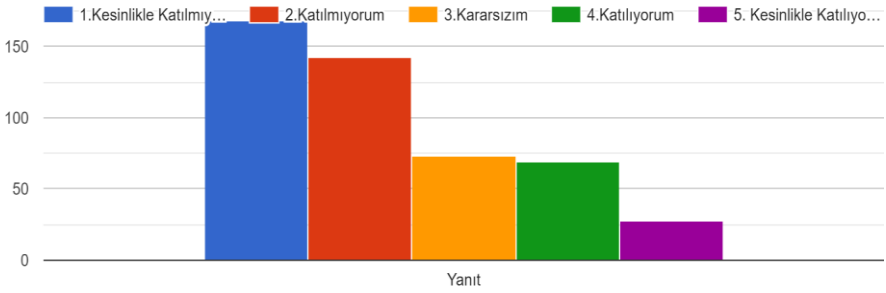


Şekil 10. Gıda Mühendislerinin, aldıkları eğitimin işini doğru yapmak için gerekliliği durumuna göre dağılımı

Gıda mühendislerinin ücret durumunun değerlendirilmesine ve bu konuda düşüncelerini analiz etmeye yönelik sorular sorulmuş ve yanıtları

değerlendirilmiştir. Çalıştıkları görevde, yaptıkları iş karşılığında aldıkları ücret bakımından memnuniyet durumu konusundaki düşünceleri sorulduğunda yanıtlarının dağılımı şu şekilde olmuştur. Gıda Mühendislerinden; 168'i kesinlikle katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%35), 142'si katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%29,58), 73'sü kararsızım seçeneğini işaretlemiş (%15,21), 69' u katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%14,38) ve 28'i kesinlikle katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%5,83)'tir. Ankete katılan gıda mühendislerinin, çalıştıkları görevde, yaptıkları iş karşılığında aldıkları ücret bakımından memnuniyet durumuna göre dağılımı Şekil 11' de gösterilmiştir.

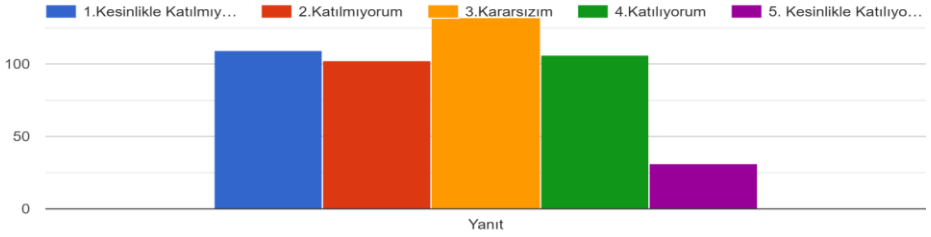
Çalıştığım görevde, yaptığım iş karşılığında aldığım ücret bakımından memnunuz.



Şekil 11. Gıda Mühendislerinin, çalıştıkları görevde, yaptıkları iş karşılığında aldıkları ücret bakımından memnuniyet durumuna göre dağılımı

Gıda Mühendislerine, açıklanan ÇZP/İZP ücretinin kendileri için uygunluğu konusundaki düşünceleri sorulduğunda, 109'u kesinlikle katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%22,71), 102'si katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%21,25), 132'si kararsızım seçeneğini işaretlemiş (%27,50), 106'sı katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%22,08) ve 31'i kesinlikle katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%6,46)'tir. Ankete katılan gıda mühendislerinin, açıklanan ÇZP/İZP ücretinin kendileri için uygunluğu durumuna göre dağılımı Şekil 12' de gösterilmiştir.

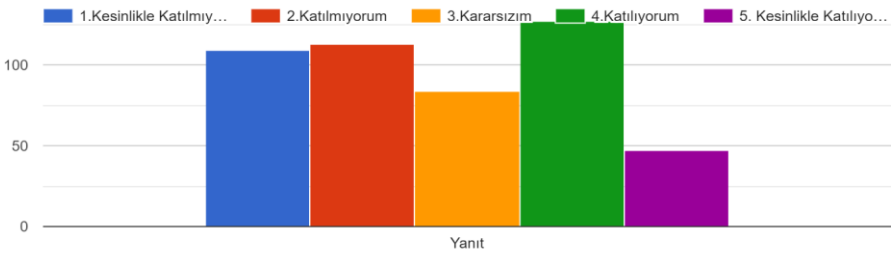
Açıklanan İZP/ÇZP ücreti benim için uygundur.



Şekil 12. Gıda Mühendislerinin, açıklanan ÇZP/İZP ücretinin kendileri için uygunluğu durumuna göre dağılımı

Gıda mühendislerinin, çalıştıkları şirketin sunduğu yan faydaları yeterli bulup bulmadıklarına yönelik değerlendirme yapılmıştır. Gıda mühendisliği meslek mensuplarının çalıştıkları şirketin sunduğu yan faydalar (Sağlık hizmeti, yemek hizmeti, personel taşıma hizmeti vb.) yeterliliği konusundaki düşünceleri sorulduğunda verdikleri yanıtların dağılımı; 109’u Kesinlikle katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%22,71), 113’ ü katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%23,54), 84’ü kararsızım seçeneğini işaretlemiş (%17,50), 127’ si katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%26,46) ve 47’si kesinlikle katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%9,79)’tir (Şekil 13).

Şirketimin sunduğu yan faydalar (Sağlık hizmeti, yemek hizmeti, personel taşıma hizmeti vb.) yeterlidir.

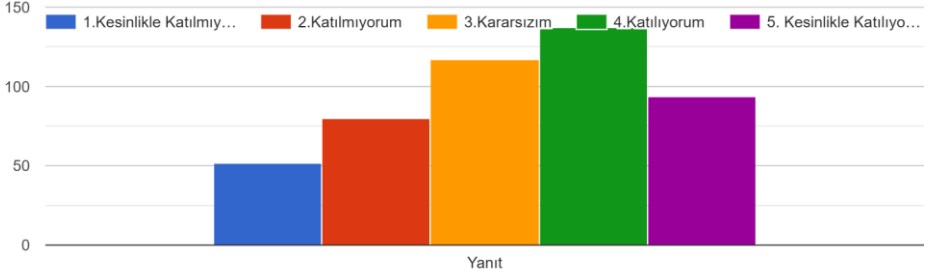


Şekil 13. Gıda Mühendislerinin çalıştığı şirketin sunduğu yan faydalar (Sağlık hizmeti, yemek hizmeti, personel taşıma hizmeti vb.) yeterliliği konusundaki durumuna göre dağılımı

Gıda Mühendislerine, “çalıştığım yerde yöneticim yeni fikir, öneri ve davranışları desteklemektedir.” sorusu sorulduğunda verdikleri yanıtlar şu şekilde olmuştur. Gıda Mühendislerinin 52’si kesinlikle katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%10,83), 80’i katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%16,67), 117’si kararsızım seçeneğini işaretlemiş (%24,38), 137’si

katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%28,54) ve 94’ü kesinlikle katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%19,58)’tir (Şekil 14).

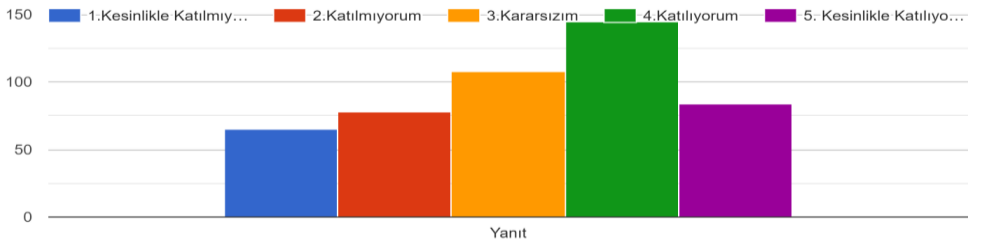
Çalıştığım yerde yöneticim yeni fikir, öneri ve davranışları desteklemektedir.



Şekil 14. Gıda Mühendislerinin, çalıştığı yerde yöneticisinin yeni fikir, öneri ve davranışları desteklemesi konusundaki durumuna göre dağılımı

Gıda mühendislerinin, bağlı olduğu yöneticisinin, kendisi ve diğer çalışanlar ile kurduğu ilişkilerin açık ve güvene dayalı olup olmadığı konusundaki görüşleri değerlendirilmiştir. Gıda Mühendislerine, “Bağlı olduğum yöneticim benimle ve diğer çalışanlar ile açık ve güvene dayalı ilişkiler kurmaktadır.” sorusu sorulduğunda yanıt seçeneklerini; 65’i kesinlikle katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%13,54), 78’i katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%16,25), 108’i kararsızım seçeneğini işaretlemiş (%22,50), 145’ i katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%30,21) ve 84’ü kesinlikle katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%17,50)’tir (Şekil 15).

Bağlı olduğum yöneticim benimle ve diğer çalışanlar ile açık ve güvene dayalı ilişkiler kurmaktadır.

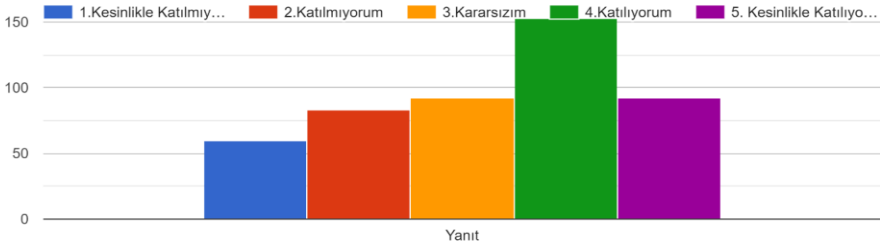


Şekil 15. Gıda Mühendislerinin, bağlı olduğu yöneticisinin, kendisi ve diğer çalışanlar ile açık ve güvene dayalı ilişkiler kurmakta olduğu konusundaki durumuna göre dağılımı

Anketi yanıtlayan meslek sahipleri, “bağlı olduğum yöneticim bilgi ve deneyimlerini paylaşarak, yol göstermektedir” sorusuna yanıtladığında, yanıtların sayısal ve oransal dağılımı şu şekilde olmuştur. Gıda mühendislerinin 60’ı kesinlikle katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%12,50), 83’ü katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%17,29), 92’si

kararsızım seçeneğini işaretlemiş (%19,17), 153'ü katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%31,88) ve 92'si kesinlikle katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%19,17)'tir. Ankete katılan gıda mühendislerinin, bağlı olduğu yöneticisinin, bilgi ve deneyimlerini paylaşarak kendisine yol gösterdiği konusundaki düşüncelerine göre dağılımı Şekil 16' da gösterilmiştir.

Bağlı olduğum yöneticim bilgi ve deneyimlerini paylaşarak yol göstermektedir.

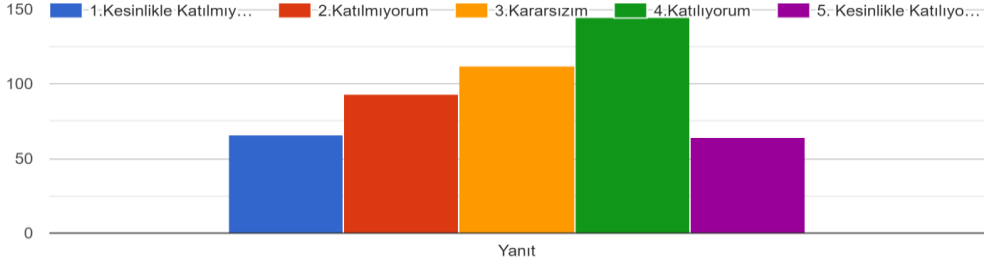


Şekil 16. Gıda Mühendislerinin, bağlı olduğu yöneticisinin, bilgi ve deneyimlerini paylaşarak kendisine yol gösterdiği konusundaki düşüncelerine göre dağılımı

Gıda Mühendisine, çalıştığı yerde ortak hedeflere ulaşmak için ekip ruhu olduğu konusundaki düşünceleri sorulduğunda, 66'sı kesinlikle katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%13,75), 93'ü katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%19,38), 112'si kararsızım seçeneğini işaretlemiş (%23,33), 145'i katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%30,21) ve 64'ü kesinlikle katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%13,33)'tür (Şekil 17).

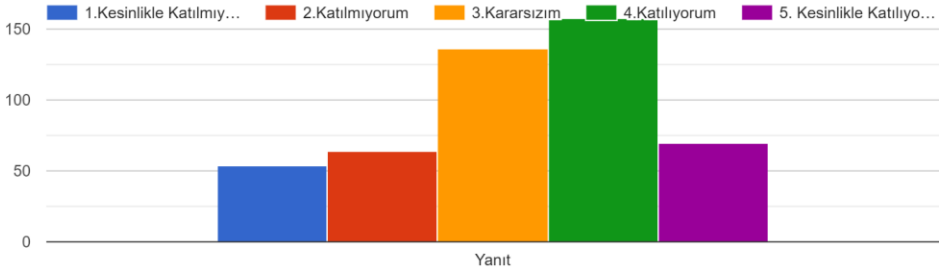
Gıda mühendislerinin çalıştığı iş yerindeki mutlu ve huzurlu olma durumu araştırılmıştır. Bu doğrultuda gıda mühendislerine; “çalıştığım ekiple çalışmaktan mutluyum” sorusu sorulmuştur. Gıda mühendislerinin bu soruya verdiği yanıtlar analiz edilmiş ve dağılımı şu şekilde olmuştur. Gıda Mühendisleri, çalıştığı ekiple çalışmaktan mutlu olduğu konusundaki düşünceleri sorulduğunda; 54'ü Kesinlikle katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%11,25), 64'ü katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%13,33), 136'sı kararsızım seçeneğini işaretlemiş (%28,33), 157' si katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%32,71) ve 69'u kesinlikle katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%14,38)'dir. Ankete katılan gıda mühendislerinin, çalıştığı ekiple çalışmaktan mutlu olduğu konusundaki düşüncelerine göre dağılımı Şekil 18' de gösterilmiştir.

Çalıştığım yerde ortak hedeflere ulaşmak için ekip ruhu vardır.



Şekil 17. Gıda Mühendislerinin, çalıştığı yerde ortak hedeflere ulaşmak için ekip ruhu olduğu konusundaki düşüncelerine göre dağılımı

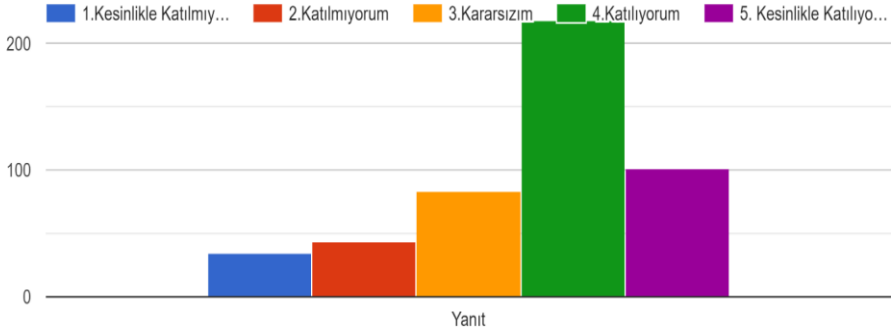
Çalıştığım ekiple çalışmaktan mutluyum.



Şekil 18. Anket katılımcısı Gıda Mühendislerinin, çalıştığı ekiple çalışmaktan mutlu olduğu konusundaki düşüncelerine göre dağılımı

Gıda mühendislerine; işyerinde saygı görüp görmediklerine yönelik hissiyatları sorulmuş, bu konudaki düşünceleri verdikleri yanıtlara dayanarak analiz edilmiştir. Anket soruların yanıtlayan gıda mühendisleri, çalıştığı iş yerinde saygı görmekte olduğu konusundaki düşünceleri sorulduğunda; 35'i Kesinlikle katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%7,29), 43'ü katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%8,96), 83'ü kararsızım seçeneğini işaretlemiş (%17,29), 218' i katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%45,42) ve 101'i kesinlikle katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%21,04)'dir. Ankete katılan gıda mühendislerinin, çalıştığı işyerinde saygı görmekte olduğu konusundaki düşüncelerine göre dağılımı Şekil 19' da gösterilmiştir.

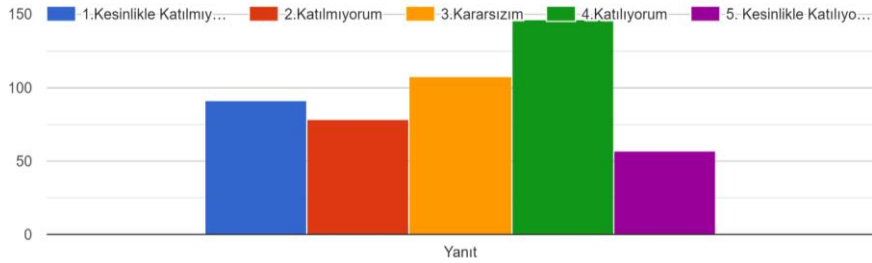
Çalıştığım iş yerinde saygı görmekteyim.



Şekil 19. Gıda Mühendislerinin, çalıştığı işyerinde saygı görmekte olduğu konusundaki düşüncelerine göre dağılımı

Gıda mühendislerinin iş yerinde aldıkları eğitimler ve bu eğitimleri işine yansıtma durumu ile ilgili veriler değerlendirilmek istenmiştir. Ankete katılan gıda mühendislerine; “iş yerinde uygulanan eğitim programlarının bilgime katkıda bulunduğuna ve kendimi geliştirme imkânı sağladığına inanıyorum.” sorusu sorulmuştur. Gıda mühendislerinin; 91’i kesinlikle katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%18,96), 78’i katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%16,25), 108’i kararsızım seçeneğini işaretlemiş (%22,50), 146’sı katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%30,42) ve 57’si kesinlikle katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%11,88)’dir (Şekil 20).

İş yerinde uygulanan eğitim programlarının bilgime katkıda bulunduğuna ve kendimi geliştirme imkânı sağladığına inanıyorum.

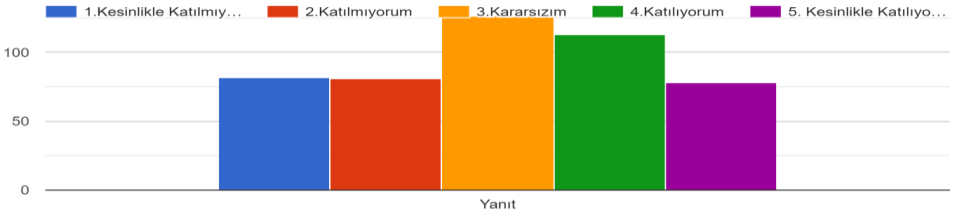


Şekil 20. Gıda Mühendislerinin, çalıştığı işyerinde uygulanan eğitim programlarının bilgisine katkıda bulunduğuna ve kendisini geliştirme imkânı sağladığını düşünmesine göre dağılımı

Gıda mühendislerine şu an yapmakta oldukları işin, ileriki dönemlerde kendisini daha yüksek kademelere taşıyacağına olan inancı ve bu

konudaki fikirlerini öğrenmek amacıyla sorular sorulmuş ve yanıtları değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda anket sorusu olarak “yaptığım işin ileride beni daha yüksek kademelere getireceğine eminim” sorusu sorulmuştur. Gıda mühendislerinden; 82’si Kesinlikle katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%17,08), 81’i katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%16,88), 126’sı kararsızım seçeneğini işaretlemiş (%26,25), 113’ ü katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%23,54) ve 78’i kesinlikle katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%16,25)’dir. Ankete katılan gıda mühendislerinin, yaptığı işin ileride kendisini daha yüksek kademelere getireceğine olan inancına göre dağılımı Şekil 21’ de gösterilmiştir.

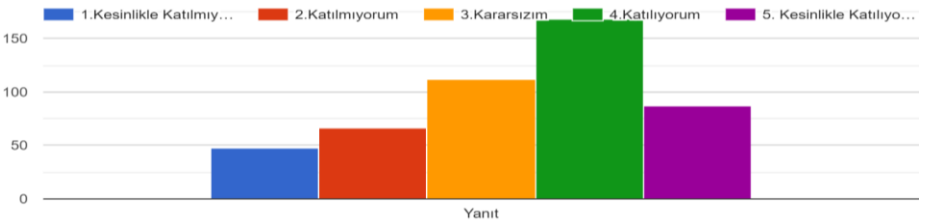
Yaptığım işin beni ileride daha yüksek kademelere getireceğine eminim.



Şekil 21. Gıda Mühendislerinin, yaptığı işin ileride kendisini daha yüksek kademelere getireceğine olan inancına göre dağılımı

Gıda mühendisliği meslek mensuplarının, işyerindeki yöneticileri ile ilgili olarak, çalışmalarının yöneticileri tarafından takdir edilme durumu ile ilgili düşünceleri değerlendirilmek istenmiş ve bu konu ile ilgili soruya verilen yanıtlar değerlendirilmiştir. Anket katılımcısı gıda mühendislerine; “Çalışmam yöneticilerim tarafından takdir edilmektedir.” sorusu sorulduğunda 47’si kesinlikle katılmıyorum seçeneğini tercih etmiş, (%9,79), 66’sı katılmıyorum seçeneğini tercih etmiş, (%13,75), 112’si kararsızım seçeneğini işaretlemiş (%23,33), 168’i katılıyorum seçeneğini belirtmiş (%35,00) ve 87’si kesinlikle katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%18,13)’dir. Ankete katılan gıda mühendislerinin çalışmalarının yöneticileri tarafından takdir edilmesi konusundaki düşüncesine göre dağılımı Şekil 22’ de gösterilmiştir.

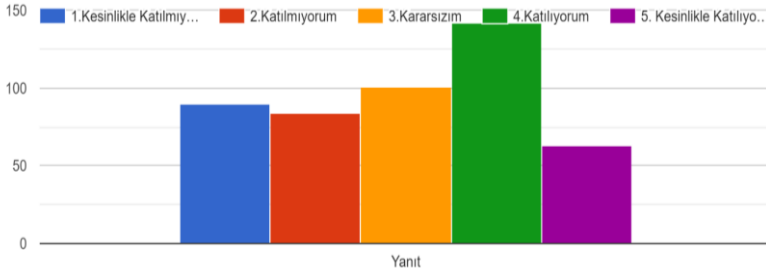
Çalışmam yöneticilerim tarafından takdir edilmektedir.



Şekil 22. Gıda Mühendislerinin, çalışmasının yöneticileri tarafından takdir edilmesi konusundaki düşüncesine göre dağılımı

Gıda mühendislerinin iş yerindeki terfi ve görev değişiklik durumlarının değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Gıda Mühendislerine, “İş yerimdeki terfi ve görev değişikliklerinde, işteki başarı ve yetkinlikler belirleyici olmaktadır.” sorusu sorulmuş ve bu konudaki düşünceleri değerlendirilmiştir. Verilen yanıtların dağılımına göre, gıda mühendislerinin; 90’ı kesinlikle katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%18,75), 84’ü katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%17,50), 101’i kararsızım seçeneğini işaretlemiş (%21,04), 142’ si katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%29,58) ve 63’ü kesinlikle katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%13,13)’dir (Şekil 23).

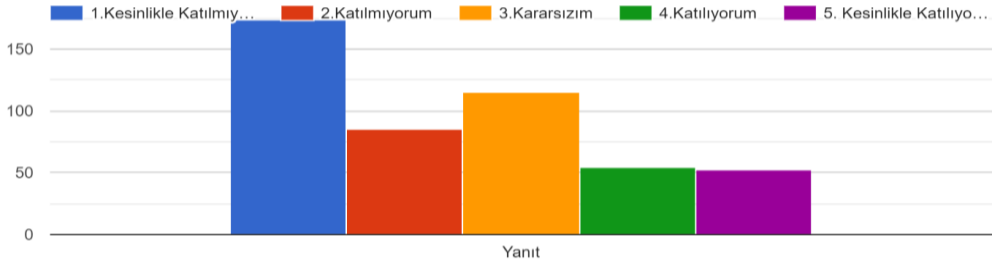
İş yerimdeki terfi ve görev değişikliklerinde, işteki başarı ve yetkinlikler belirleyici olmaktadır.



Şekil 23. Gıda Mühendislerinin, iş yerindeki terfi ve görev değişikliklerinde, işteki başarı ve yetkinlikler belirleyici olduğu konusundaki düşüncesine göre dağılımı

Gıda mühendislerine; “Yeniden meslek seçecek olsam yine Gıda Mühendisliğini seçerim.” sorusu yöneltilmiştir. Soruya verilen yanıtlar değerlendirildiğinde, araştırma sonucunun da genel bir özetini sunmaktadır. Gıda Mühendisleri, yeniden meslek seçecek olsa gıda mühendisliğini seçme konusundaki fikir ve düşüncelerini şu şekilde ifade etmiştir. Ankete katılınlıların 174’ ü Kesinlikle katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%36,25), 85’i katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%17,71), 115’i kararsızım seçeneğini işaretlemiş (%23,96), 54’ü katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%11,25) ve 52’si kesinlikle katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%10,83)’dir. Ankete katılan gıda mühendislerinin, yeniden meslek seçecek olsa yine gıda mühendisliğini seçme konusundaki inancına göre dağılımı Şekil 24’ de gösterilmiştir.

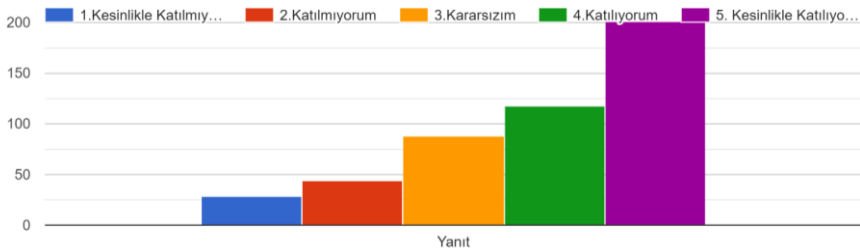
Yeniden meslek seçecek olsam yine Gıda Mühendisliğini seçerim.



Şekil 24. Gıda Mühendislerinin, yeniden meslek seçecek olsa yine Gıda Mühendisliğini seçme konusundaki düşüncelerine göre dağılımı

Gıda mühendislerine “Daha iyi bir ücret ve pozisyon bulursam iş yerimden ayrılıyorum.” sorusu sorulmuştur. Verilen yanıtların dağılımı incelendiğinde, gıda mühendislerinin; 29’ u Kesinlikle katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%6,04), 44’ü katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%9,17), 88’i kararsızım seçeneğini işaretlemiş (%18,33), 118’ i katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%24,58) ve 201’i kesinlikle katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%41,88)’dir (Şekil 25).

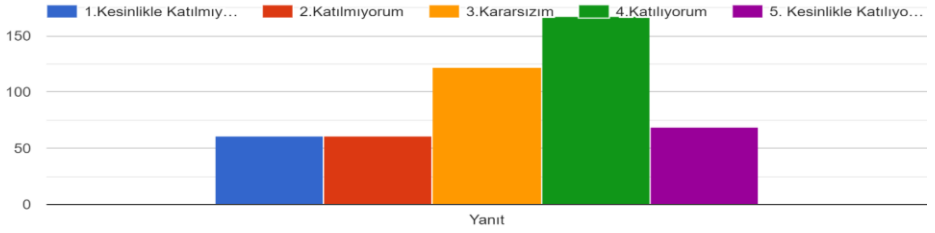
Daha iyi bir ücret ve pozisyon bulursam iş yerimden ayrılıyorum.



Şekil 25. Gıda Mühendislerinin, daha iyi bir ücret ve pozisyon bulursa iş yerinden ayrılacağı konusundaki düşüncesine göre dağılımı

Gıda mühendislerine; işyerinde kendisini değerli hissedip hissetmediği ile ilgili duygu ve düşüncelerini anlamaya yönelik soru sorularak, değerlendirmek için gıda mühendislerine “Çalıştığım yerde kendimi değerli hissedirim” sorusu sorulmuş ve alınan yanıtlar analiz edilmiştir. Gıda Mühendislerinden; 61’i kesinlikle katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%12,71), 61’i katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%12,71), 122’si kararsızım seçeneğini işaretlemiş (%25,42), 167’si katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%34,79) ve 69’u kesinlikle katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%14,38)’dir. Ankete katılan gıda mühendislerinin, çalıştığı yerde kendisini değerli hissetmesine göre dağılımı Şekil 26’ da gösterilmiştir.

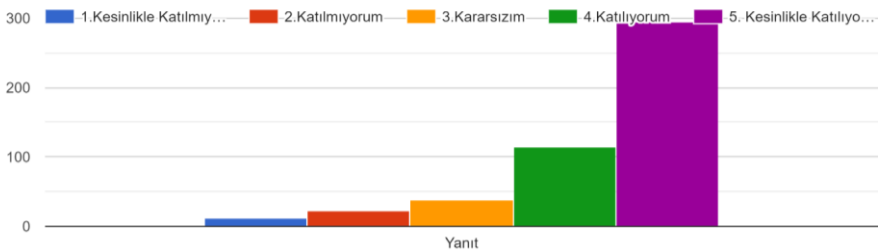
Çalıştığım yerde kendimi değerli hissederim.



Şekil 26. Gıda Mühendislerinin, çalıştığı yerde kendisini değerli hissetmesine göre dağılımı

Meslek mensuplarına, “Çalıştığım yerde işimi severek yapıyorum” sorusu sorulmuştur. Gıda Mühendislerinden, 46’sı kesinlikle katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%9,58), 54’ü katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%11,25), 92’si kararsızım seçeneğini işaretlemiş (%19,17), 193’ü katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%40,21) ve 95’i kesinlikle katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%19,79)’dur. Gıda mühendisliği mesleğinin bugünkü durumu ve meslek sahiplerinin bu konudaki düşüncelerinin öğrenilmesi için “gıda mühendisliği her geçen gün kan kaybediyor.” sorusuna yer verilmiştir. Gıda Mühendislerine, gıda mühendisliği her geçen gün kan kaybettiği konusundaki düşünceleri sorulduğunda; alınan cevapların dağılımı şöyle olmuştur. Katılımcılardan 12’si kesinlikle katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%2,50), 22’si katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%4,58), 38’i kararsızım seçeneğini işaretlemiş (%7,92), 114’ü katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%23,75) ve 294’ü kesinlikle katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%61,25)’tir. Ankete katılan gıda mühendislerinin, gıda mühendisliği mesleğinin her geçen gün kan kaybettiği konusundaki düşüncesine göre dağılımı Şekil 27’ de gösterilmiştir.

Gıda Mühendisliği mesleği her geçen gün kan kaybediyor.

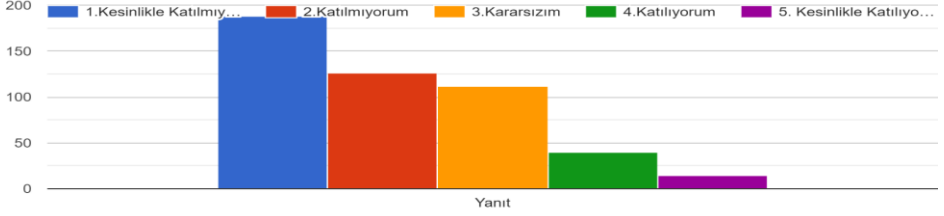


Şekil 27. Gıda Mühendislerinin, gıda mühendisliği mesleğinin her geçen gün kan kaybettiği konusundaki düşüncelerine göre dağılımı

Gıda mühendislerine; “Türkiye’ de Gıda Mühendisliği mesleğinin toplumdaki karşılığı iyidir” sorusu sorulmuştur. Gıda Mühendislerinden;

188'i kesinlikle katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%39,17), 126'sı katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%26,25), 112'si kararsızım seçeneğini işaretlemiş (%23,33), 40' ı katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%8,33) ve 14'ü kesinlikle katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%2,92)'dir (Şekil 28).

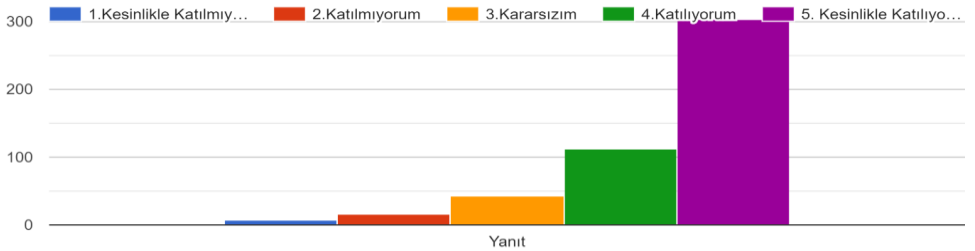
Türkiye' de Gıda Mühendisliği mesleğinin toplumdaki karşılığı iyidir.



Şekil 28. Gıda Mühendislerinin, Türkiye' de Gıda Mühendisliği mesleğinin toplumdaki karşılığı iyidir konusundaki düşüncesine göre dağılımı

Ülkemizde gıda mühendisliği bölümleri son yıllarda kapanmakta olup, tercih oranları da düşmektedir. Bu kapsamda gıda mühendislerinin, ülkemizdeki gıda mühendisliği bölümlerinin sayısı hakkındaki fikirleri değerlendirilmiştir. Ankete yanıt veren gıda mühendisleri “Ülkemizde Gıda Mühendisliği bölümü sayısı fazladır” sorusuna şu şekilde yanıt vermiştir. Gıda Mühendislerinden; 7'si kesinlikle katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%1,46), 16'sı katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%3,33), 43'ü kararsızım seçeneğini işaretlemiş (%8,96), 112'si katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%23,33) ve 302'si kesinlikle katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%62,92)'dir. Gıda mühendislerinin, ülkemizde Gıda Mühendisliği bölümünün sayısının fazla olduğu konusundaki düşüncesine göre dağılımı Şekil 29' da gösterilmiştir.

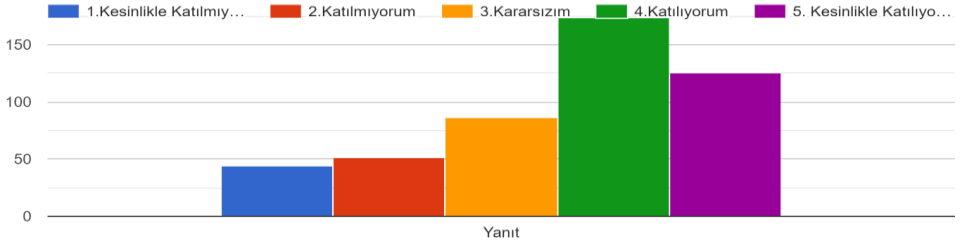
Ülkemizde Gıda Mühendisliği bölümü sayısı fazladır.



Şekil 29. Gıda Mühendislerinin, ülkemizde Gıda Mühendisliği bölümünün sayısının fazla olduğu konusundaki düşüncesine göre dağılımı

Gıda mühendislerinin kendi mezun oldukları üniversitesinin eğitiminden memnun olup olmadığına yönelik görüşlerinin değerlendirilmesinin hedeflediği soru, “Mezun olduğum üniversitemin eğitiminden memnunuz” olmuştur. Gıda mühendislerinin bu soruya verdiği çoktan seçmeli yanıtların dağılımı incelendiğinde; gıda mühendislerinin, 44’ü Kesinlikle katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%9,17), 51’i katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%10,63), 86’sı kararsızım seçeneğini işaretlemiş (%17,92), 174’ü katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%36,25) ve 125’i kesinlikle katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%26,04)’tir. Ankete katılan gıda mühendislerinin, mezun olduğu üniversitenin eğitiminden memnun olduğu konusundaki düşüncesine göre dağılımı Şekil 30’ da gösterilmiştir.

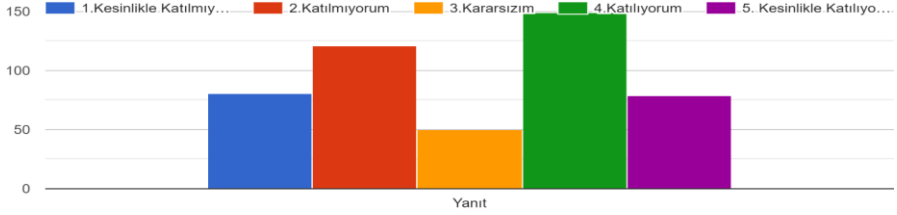
Mezun olduğum Üniversitemin eğitiminden memnunuz.



Şekil 30. Gıda Mühendislerinin, mezun olduğu üniversitenin eğitiminden memnun olduğu konusundaki düşüncesine göre dağılımı

Gıda mühendislerinin bir kısmı, lisans eğitimi sonrası mezun oldukları üniversitedeki akademisyenlerle görüşmeye devam etmektedir. Bu durumun dağılımını belirlemek amacıyla, "Mezun olduğum üniversitedeki akademisyenlerle halen görüşüyorum" sorusu yöneltilmiştir. Sorunun yanıtlarının dağılımı şu şekilde olmuştur. Katılımcılardan, 81’i kesinlikle katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%16,88), 121’i katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%25,21), 50’si kararsızım seçeneğini işaretlemiş (%10,42), 149’u katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%31,04) ve 79’u kesinlikle katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%16,46)’tir (Şekil 31).

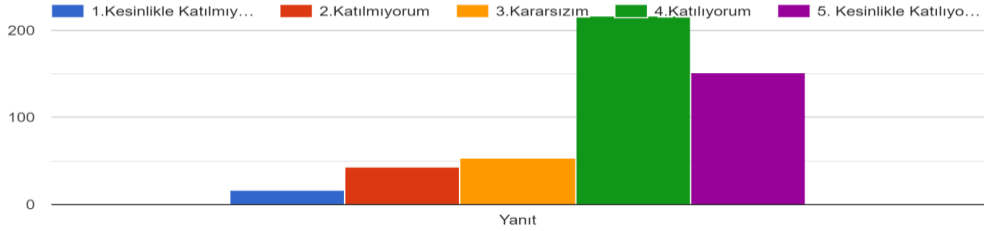
Mezun olduğum üniversitedeki akademisyenlerle halen görüşüyorum.



Şekil 31. Gıda Mühendislerinin, mezun olduğu üniversitedeki akademisyenlerle halen görüştüğü konusuna göre dağılımı

Halen bölüm/sınıf arkadaşlarıyla görüşmeye devam eden gıda mühendislerinin oranını ve dağılımını belirlemek amacıyla “Mezun olduğum üniversitedeki bölüm/sınıf arkadaşlarımla halen görüşüyorum” sorusu sorulduğunda; katılımcıların 16’sı kesinlikle katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%3,33), 43’ü katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%8,96), 54’ü kararsızım seçeneğini işaretlemiş (%11,25), 216’sı katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%45,00) ve 151’i kesinlikle katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%31,46)’tir. Gıda mühendislerinin, mezun olduğu üniversitedeki bölüm/sınıf arkadaşlarıyla görüştüğü konusuna göre dağılımı Şekil 32’ de gösterilmiştir.

Mezun olduğum üniversitedeki bölüm/sınıf arkadaşlarımla halen görüşüyorum.

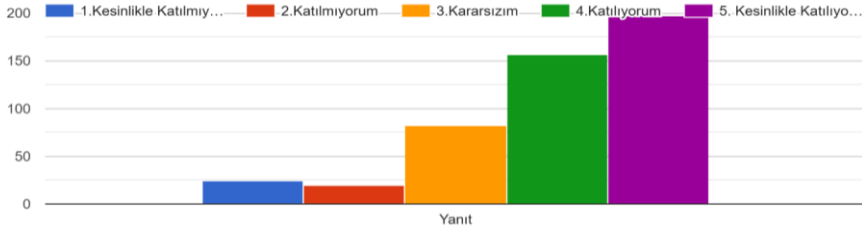


Şekil 32. Gıda Mühendislerinin, mezun olduğu üniversitedeki bölüm/sınıf arkadaşlarıyla görüştüğü konusuna göre dağılımı

Staj uygulamaları diğer mühendislik dallarında olduğu gibi gıda mühendisliği alanında son derece önem taşımaktadır. Son yıllarda, üniversitelerde uygulanan "İşletmede Mesleki Eğitim (İMEP)" veya "İntörn Mühendislik" uygulaması da staj uygulamalarına ek olarak mesleki anlamda önemli rol oynamaktadır. Bu konuda anket katılımcısı gıda mühendislerinin fikirleri alınmıştır. Gıda Mühendislerine, Üniversitelerde uygulanan "İşletmede Mesleki Eğitim (İMEP)" veya "İntörn Mühendislik" uygulamasının mesleki anlamda önemli olduğu konusu sorulduğunda, 24’ü kesinlikle katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%5), 20’si katılmıyorum

seçeneğini işaretlemiş (%4,17), 82'si kararsızım seçeneğini işaretlemiş (%17,08), 157'si katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%32,71) ve 197'si kesinlikle katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%41,04)'tir. Gıda mühendislerinin, Üniversitelerde uygulanan "İşletmede Mesleki Eğitim (İMEP)" veya "İntörn Mühendislik" uygulamasının mesleki anlamda önemli olduğu düşüncesine göre dağılımı Şekil 33' de gösterilmiştir.

Üniversitelerde uygulanan "İşletmede Mesleki Eğitim (İMEP)" veya "İntörn Mühendislik" uygulamasının mesleki anlamda önemli olduğunu düşünüyorum.



Şekil 33. Gıda Mühendislerinin, Üniversitelerde uygulanan "İşletmede Mesleki Eğitim (İMEP)" veya "İntörn Mühendislik" uygulamasının mesleki anlamda önemli olduğu düşüncesine göre dağılımı

2.1.4 Anket Katılımcısı Gıda Mühendislerinin Sosyal ve Psikolojik Konulara Göre Değerlendirilmesi

Anketin altıncı bölümünde, anket katılımcısı gıda mühendislerine sosyal ve psikolojik konularla ilgili sorular yöneltilmiştir. Bu bölüm 5 sorudan oluşmakta olup, katılımcılardan soruları, şu an çalışmakta oldukları ya da en son çalışmış oldukları işyerini düşünerek yanıtlamaları istenmiştir.

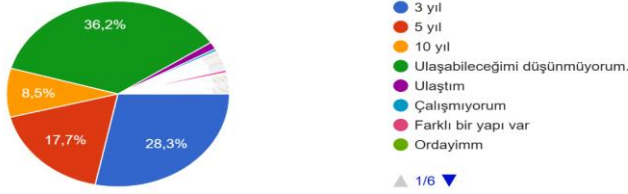
Takip eden bölümde, istihdam konusu ilgili sorular yöneltilmeye devam edilmiştir. Gıda Mühendisine, iş bulmakta zorluk çekip çekmedikleri sorusu sorulduğunda; 260' ı evet seçeneğini işaretlemiş (%54,17), 220'si hayır seçeneğini işaretlemiş (%45,83)'tir.

Meslek seçimlerinin bilinçli olarak yapılmasının, meslek hayatında olumlu etkileri olduğu bilinmektedir. Bu doğrultuda gıda mühendislerinin meslek tercihlerini bilinçli olarak yapıp yapmadıkları ölçülmek istenmiştir. Bu amaçla, gıda mühendislerine, mesleğinizi isteyerek mi seçtiniz? sorusu sorulmuştur. Bu soruda 323'si evet seçeneğini işaretlemiş (%67,29), 138'i hayır seçeneğini işaretlemiş (%28,75), 16'sı diğer seçeneğini işaretlemiş (%3,33) ve 3' ü Kararsız olarak fikir beyan etmiş (%0,63)'tir.

Gıda mühendislerine, çalıştığınız iş yerinde hedeflediğiniz statüye kaç yılda ulaşacağınızı düşünüyorsunuz? sorusu sorulmuştur. Gıda Mühendislerinden; 140'ı 3 yıl seçeneğini işaretlemiş (%29,17), 85'i 5 yıl seçeneğini işaretlemiş (%17,71), 42'si 10 yıl seçeneğini işaretlemiş (%8,75) ve 16'sı ise ulaştığını beyan etmiş (%3,33), 6' sı hedefi olmadığını (%1,25), 4'ü çalışmıyor (%0,83), 12'si bilmediğini ifade etmiş (%2,50) ve 175'i

ulaşabileceğini düşünmediğini (%36,46) beyan etmiştir. Gıda mühendislerinin, çalıştığı iş yerinde hedeflediği statüye kaç yılda ulaşacağı düşüncesine göre dağılımı Şekil 34’ de gösterilmiştir.

Çalıştığınız iş yerinde hedeflediğiniz statüye kaç yılda ulaşacağınızı düşünüyorsunuz ?
481 yanıt



Şekil 34. Gıda Mühendislerinin çalıştığı iş yerinde hedeflediği statüye kaç yılda ulaşacağı düşüncesine göre dağılımı

Gıda mühendislerinin mevcut tecrübeleriyle yeni bir iş bulma konusundaki fikirlerinin değerlendirilmesi amacıyla, gıda mühendislerine, şu anki tecrübenizle yeni bir iş bulmakta zorlanacağınızı düşünüyor musunuz? sorusu sorulmuştur. Gıda Mühendislerinin, bu soruya dair yanıtları; katılımcı 480 Gıda Mühendisinden; 181’i evet seçeneğini işaretlemiş (%37,71), 297’ si hayır seçeneğini işaretlemiş (%61,88), 2’si kararsız olduğunu beyan etmiş (%0,42)’ tir.

Gıda Mühendisine, mesleğinizde kendinizi geliştirmek için neler yaptınız/yapıyorsunuz? sorusu sorulmuştur. Soru çoklu seçenekli olup, farklı kombinasyonları içeren 808 yanıt alınmıştır. Gıda Mühendislerinin 808 yanıtı değerlendirildiğinde; 246’ sı “farklı sektörlerde çalıştım/çalışıyorum” seçeneğini işaretlemiş (%30,45), 344’ü “eğitim aldım/alıyorum” seçeneğini işaretlemiş (%42,57), 141’i “lisansüstü eğitim aldım/alacağım” seçeneğini işaretlemiş (%17,45), 42’si “koçluk/mentörlük aldım/alıyorum” seçeneğini işaretlemiş (%5,20), diğer seçeneğini işaretleyen 35 kişi verdiği açık uçlu yanıtlarda (yabancı dil öğrenmek, araştırmalar yapmak, uluslararası projelere/yarışmalara katılmak ve okumak başlıklarını ağırlıklı olarak belirtmiş (%4,33) tir.

2.1.5 Anket Katılımcısı Gıda Mühendislerinin TMMOB Gıda Mühendisleri Odası, Çalışmaları ve İş Hayatımıza Katkıları Hakkındaki Düşüncelerinin Değerlendirilmesi

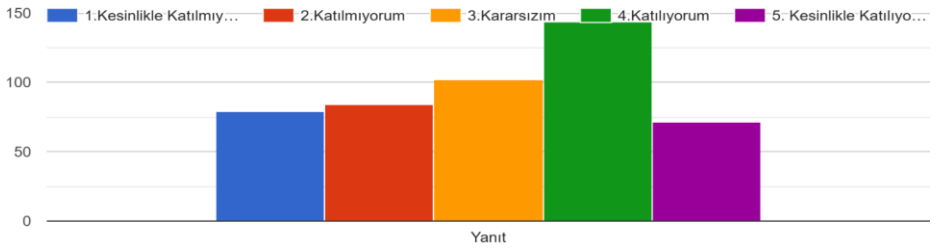
Anketin yedinci bölümünde, gıda mühendislerine TMMOB Gıda Mühendisleri Odası, çalışmaları ve iş hayatımıza katkıları hakkında sorular yöneltmiştir. Bu bölüm biri açık uçlu olmak üzere 7 sorudan oluşmaktadır.

Gıda mühendislerine, meslek odasına üyelik durumu değerlendirilmiştir. Gıda Mühendislerine, gıda mühendisleri odasına üye olup

olmadıkları sorusu sorulduğunda; katılımcı 480 Gıda Mühendisinden; 378'i evet seçeneğini işaretlemiş (%78,75), 102'si hayır seçeneğini işaretlemiş (%21,25)'tir.

Gıda mühendislerinin, TMMOB Gıda Mühendisleri Odasının hizmetlerinden ve çalışmalarından haberdar olup olmadıkları konusu hakkında soru yöneltilmiştir. Gıda Mühendislerine, TMMOB Gıda Mühendisleri Odasının hizmetlerinden ve çalışmalarından bilgisi/haberi olup olmadığı sorusu sorulduğunda 79'u kesinlikle katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%16,46), 84'ü katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%17,50), 102'si kararsızım seçeneğini işaretlemiş (%21,25), 144'ü katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%30,00) ve 71'i kesinlikle katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%14,79)'dir. Gıda mühendislerinin, TMMOB Gıda Mühendisleri Odasının hizmetlerinden ve çalışmalarından bilgisi/haberi olma durumlarına göre dağılımı Şekil 35' de gösterilmiştir.

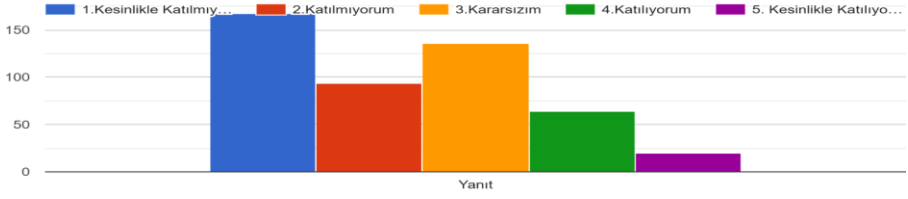
TMMOB Gıda Mühendisleri Odasının hizmetlerinden ve çalışmalarından bilgim/haberim var.



Şekil 35. Gıda Mühendislerinin TMMOB Gıda Mühendisleri Odasının hizmetlerinden ve çalışmalarından bilgisi/haberi olma durumlarına göre dağılımı

Meslek odasına üye olsun ya da olmasın gıda mühendislerinin kendi meslek odalarının çalışmaları ile ilgili düşünceleri sorgulanmıştır. Gıda mühendislerine, “TMMOB Gıda Mühendisleri Odasının çalışmalarını başarılı buluyorum” sorusu sorulmuştur. Soruya verilen yanıtların dağılımı şu şekilde olmuştur; 167'si Kesinlikle katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%34,79), 93'ü katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%19,38), 136'sı kararsızım seçeneğini işaretlemiş (%28,33), 64'ü katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%13,33) ve 20'si kesinlikle katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%4,17)'dir. Ankete katılan gıda mühendislerinin, TMMOB Gıda Mühendisleri Odasının çalışmalarını başarılı bulup bulmadığı konusundaki düşüncelerine göre dağılımı Şekil 36' da gösterilmiştir.

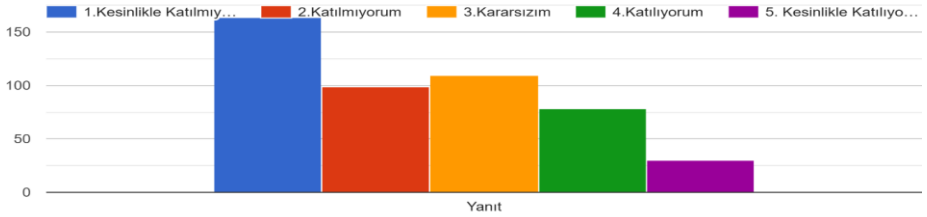
TMMOB Gıda Mühendisleri Odasının çalışmalarını başarılı buluyorum.



Şekil 36. Gıda Mühendislerinin TMMOB Gıda Mühendisleri Odasının çalışmalarını başarılı bulup bulmadığı konusundaki düşüncelerine göre dağılımı

Gıda mühendislerine, “TMMOB Gıda Mühendisleri Odasının meslek hayatına katkı sağlayacağını düşünüyorum” sorusu sorulmuştur. Gıda mühendislerinin 164’ü Kesinlikle katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%34,17), 99’u katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%20,63), 109’u kararsızım seçeneğini işaretlemiş (%22,71), 78’i katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%16,25) ve 30’u kesinlikle katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%6,25)’dir. Ankete katılan gıda mühendislerinin, TMMOB Gıda Mühendisleri Odasının meslek hayatına katkı sağlayacağını konusundaki düşüncelerine göre dağılımı Şekil 37’ de gösterilmiştir.

TMMOB Gıda Mühendisleri Odasının meslek hayatına katkı sağlayacağını düşünüyorum.

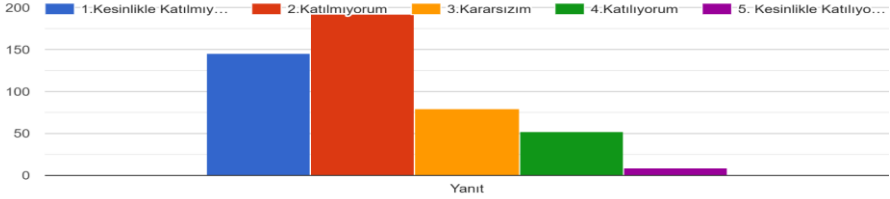


Şekil 37. Gıda mühendislerinin, TMMOB Gıda Mühendisleri Odasının meslek hayatına katkı sağlayacağına ilişkin görüşlerine göre dağılımı

Her meslek grubunda olduğu gibi, meslek hayatında kendini geliştirmek ve yenilikleri takip edebilmek için eğitimlerin önemi büyüktür. Bu doğrultuda, meslek odaları mesleki ve kişisel gelişime yönelik eğitim ve seminerler düzenlemektedir. Gıda mühendislerine “TMMOB Gıda Mühendisleri Odası’nın düzenlediği eğitim ve seminerlere düzenli olarak katılıyorum” sorusu yöneltilmiştir. Gıda mühendisleri meslek mensuplarının, kendi meslek odalarının eğitim ve seminerlerine katılım durumları verdikleri yanıtlara göre şu şekilde değerlendirilmiştir. 145 gıda mühendisi kesinlikle katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%30,21), 193’ü katılıyorum

seçeneğini işaretlemiş (%40,21), 81'i kararsızım seçeneğini işaretlemiş (%16,88), 52'si katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%10,83) ve 9'u kesinlikle katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%1,88)'dir (Şekil 38).

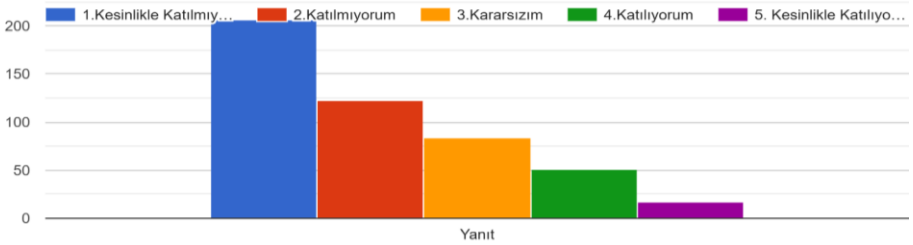
TMMOB Gıda Mühendisleri Odasının düzenlediği eğitim ve seminerlere düzenli olarak katılıyorum.



Şekil 38. Gıda Mühendislerinin TMMOB Gıda Mühendisleri Odasının düzenlediği eğitim ve seminerlere düzenli olarak katılım durumuna göre dağılımı

Meslek hayatının her aşamasında, meslek mensubunun meslek odasını arkasında hissetmesi önemlidir. Bu doğrultuda gıda mühendislerinin kendi meslek odalarını, arkalarında hissedip hissetmedikleri ile ilgili düşünceleri değerlendirilmek istenmiştir. Gıda mühendislerine, “TMMOB Gıda Mühendisleri Odasını her zaman arkamda hissederim” sorusu sorulmuştur. Anket sorularını yanıtlayan gıda mühendislerinin meslek odalarını arkalarında görmesiyle ilgili yanıtlarının dağılımı; 205'i Kesinlikle katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%42,71), 122'si katılmıyorum seçeneğini işaretlemiş (%25,42), 85'i kararsızım seçeneğini işaretlemiş (%17,71), 51'i katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%10,63) ve 17'si kesinlikle katılıyorum seçeneğini işaretlemiş (%3,54) şeklindedir (Şekil 39).

TMMOB Gıda Mühendisleri Odasını her zaman arkamda hissederim.

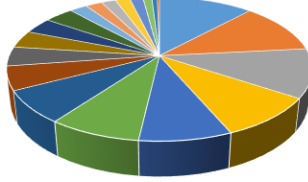


Şekil 39. Gıda Mühendislerinin TMMOB Gıda Mühendisleri Odasını her zaman arkasında hissettiği konusundaki düşüncesine göre dağılımı

Gıda mühendislerine, “Gıda Mühendisleri Odasının, Gıda Mühendislerine katkı sağlamak için neler yapmasını istersiniz?” sorusu sorulmuştur. Soru açık uçlu olarak sorulmuş olup, katılımcı gıda

mühendislerinin yorumları alınmıştır. Yorumlar tek tek değerlendirilip, pareto analizi yapılmıştır. 480 anket katılımcısı gıda mühendisinin 714 farklı yorumuna göre, 85 kişi “odanın siyasetten uzak ve herkese eşit mesafede olması, daha çok çalışması ve kendi işini yapması, çalışmalarından memnun değilim” şeklinde yanıt vermiş (%11,91), 82 kişi “izp/çzp şartlarının ve taban ücretinin takibi / taban ücretinin SGK ile işbirliği halinde takibi ve yaptırım)” şeklinde yanıt vermiş (%11,49), 78 kişi “eğitim, seminer, proje ve danışmanlık desteği (eğitim içeriklerinin özgünleştirilmesi ve çeşitliliğinin artırılması/sektörel eğitimler/ kişisel gelişim eğitimleri /ücretsiz eğitimler sağlanması” ” şeklinde yanıt vermiş (%10,93), 66 kişi “istihdam desteği (kamu ve özel sektörde) farklı meslek mensuplarının çalışmasının engellenmesi/devletle iş birliği ” şeklinde yanıt vermiş (%9,24), 59 kişi “kamuda istihdam ve atamalar/ kamu ile iş birliği” şeklinde yanıt vermiş (%8,26) , 59 kişi “üyeleri ile iletişimi arttırması, iş yeri ziyaretlerinde bulunması, yönlendirmesi ve yol gösterici olması” şeklinde yanıt vermiş (%8,26), 52 kişi “özel sektörde meslek haklarının savunulması/çalışma koşullarının iyileştirilmesine yönelik faaliyetler ve hukuki destek sağlanması (sektörde mesleğe saygı)” (%7,29), 38 kişi “GM nin çalışma şartları ve ücret sisteminin düzenlenmesine yönelik çalışmalar yapması (izp/çzp dışında kalan)” (%5,32), 31 kişi “GM mesleğinin saygınlığını ve itibarını arttırmaya yönelik çalışmalar yapılsın” şeklinde yanıt vermiş (%4,34), 28 kişi “odanın kendi saygınlığını ve görünürlüğünü arttırmaya yönelik çalışmalar yapması” şeklinde yanıt vermiş (%3,92), 26 kişi “yeni mezun GM’lerinin sektöre adaptasyonunu sağlayacak faaliyetlerin arttırılması (bölümlerle işbirliği” şeklinde yanıt vermiş (%3,64), 26 kişi “GM meslek sorunlarına odaklanıp, çözüme yönelik faaliyetlerde bulunma” şeklinde yanıt vermiş (%3,64), 16 kişi “örgütlülüğün geliştirilmesine, şube ve temsilciliklerin arttırılmasına yönelik çalışmalar yapması” (%2,24), 15 kişi “odadan bir beklentim yok, odaya da gerek yok” şeklinde yanıt vermiş (%2,10), 13 kişi “gıda bakanlığının kurulmasına ve meslek yasasının çıkarılmasına yönelik faaliyetler” (%1,82), 13 kişi “oda üyeliğinin isteğe bağlı olması/üyelikten ayrılma hakkı tanınması ve oda aidatlarının kaldırılması/düzenlenmesi ile ilgili çalışmalar” (%1,82), 12 kişi “sosyal etkinliklerin ve akademik organizasyonların artırılması” şeklinde yanıt vermiş (%1,68), 8 kişi “GIDAMO yönetiminin yetkinliğinin arttırılması ve vizyonunu geliştirmesi” (%1,12), 5 kişi “GIDAMO’nun çalışmalarından memnunum” (%0,70), 2 kişi “gıda mühendisleri için hijyen eğitim sertifikası zorunluluğunun kaldırılması ve bu konudaki eğitim yetkisinin gıda mühendislerine verilmesi konusunda çalışma yapması” şeklinde yanıt vermiş (%0,28)’ tir (Şekil 40 ve Çizelge 1).

**Gıda Mühendisleri Odasının, Gıda
Mühendislerine katkı sağlamak için neler
yapmasını istersiniz ?**



- ODANIN SİYASETEN UZAK VE HERKESE EŞİT MESAFEDE OLMASI, DAHA ÇOK ÇALIŞMASI VE KENDİ İŞİNİ YAPMASI MEMNUN DEĞİLİM EŞİT MESAFEDE OLMASI
- İZP/ÇZP ŞARTLARININ VE TABAN ÜCRETİNİN TAKİBİ / TABAN ÜCRETİNİN SGK İLE İŞBİRLİĞİ HALİNDE TAKİBİ VE YAPTIRIM)
- EĞİTİM, SEMİNER, PROJE VE DANIŞMANLIK DESTEĞİ (EĞİTİM İÇERİKLERİNİN ÖZGÜNLEŞTİRİLMESİ VE ÇEŞİTLİLİĞİNİN ARTTIRILMASI/SEKTÖREL EĞİTİMLER/ KİŞİSEL GELİŞİM EĞİTİMLERİ /ÜCRETSİZ EĞİTİMLER SAĞLANMASI
- İSTİHDAM DESTEĞİ (KAMU VE ÖZEL SEKTÖRDE) - FARKLI MESLEK MENSUPLARININ ÇALIŞMASININ ENGELLENMESİ/DEVLETLE İŞ BİRLİĞİ

Şekil 40. Gıda Mühendislerinin TMMOB Gıda Mühendisleri Odasının, Gıda Mühendislerine katkı sağlamak için neler yapmasını istersiniz?” konusundaki düşüncelerine göre dağılımı

Çizelge 1.Gıda Mühendislerinin TMMOB Gıda Mühendisleri Odasının, Gıda Mühendislerine katkı sağlamak için neler yapmasını istersiniz?” konusundaki düşüncelerine göre dağılımı

N O	Anket Katılımcısı Gıda Mühendislerinin “Gıda Mühendisleri Odasının, Gıda Mühendislerine katkı sağlamak için neler yapmasını istersiniz?” konusundaki düşünceleri	Yanıt Sayısı	Oran
1	Gıda mühendisleri odasının siyasetten uzak kalması ve her üyesine eşit mesafede davranarak, kendi görev ve sorumluluklarını gerçekleştirmek için çalışması	85	%11,91
2	İZP / ÇZP şartlarının ve taban ücretinin takibi / taban ücretinin SGK ile iş birliği halinde takibi ve yaptırım	82	%11,49
3	Eğitim, seminer, proje ve danışmanlık desteği (eğitim içeriklerinin özgünleştirilmesi ve çeşitliliğinin artırılması/ sektörel eğitimler/ kişisel gelişim eğitimleri /ücretsiz eğitimler sağlanması	78	%10,93
4	İstihdam desteği (kamu ve özel sektörde)- farklı meslek mensuplarının çalışmasının engellenmesi/devletle iş birliği	66	%9,24
5	Kamuda istihdam ve atamalar/ kamu ile iş birliği	59	%8,26
6	Üyeleri ile iletişimi artırması, iş yeri ziyaretlerinde bulunması, yönlendirmesi ve yol gösterici olması	59	%8,26
7	Özel sektörde meslek haklarının savunulması/çalışma koşullarının iyileştirilmesine yönelik faaliyetler ve hukuki destek sağlanması (sektörde mesleğe saygı)	52	%7,29
8	GM’ nin çalışma şartları ve ücret sisteminin düzenlenmesine yönelik çalışmalar yapması (İZP / ÇZP dışında kalan)	38	%5,32
9	GM mesleğinin saygınlığını ve itibarını artırmaya yönelik çalışmalar yapılın	31	%4,34
10	Odanın kendi saygınlığını ve görünürlüğünü arttırmaya yönelik çalışmalar yapması	28	%3,92
11	Yeni mezun GM’lerinin sektöre adaptasyonunu sağlayacak faaliyetlerin artırılması (bölümlerle iş birliği/işletmelerle iş birliği/ mezun sayısının kontrolü)	26	%3,64
12	GM meslek sorunlarına odaklanıp, çözüme yönelik faaliyetlerde bulunma	26	%3,64
13	Örgütlülüğün geliştirilmesine, şube ve temsilciliklerin artırılmasına yönelik çalışmalar yapması	16	%2,24
14	Odadan bir beklentim yok, odaya da gerek yok	15	%2,10
15	Gıda bakanlığının kurulmasına ve meslek yasasının çıkarılmasına yönelik faaliyetler	13	%1,82

1 6	Oda üyeliğinin isteğe bağlı olması/üyelikten ayrılma hakkı tanınması ve oda aidatlarının kaldırılması/düzenlenmesi ile ilgili çalışmalar	13	%1,82
1 7	Sosyal etkinliklerin ve akademik organizasyonların artırılması	12	%1,68
1 8	Oda yönetiminin yetkinliğinin artırılması ve vizyonunu geliştirmesi	8	%1,12
1 9	Odanın çalışmalarından memnuniyet	5	%0,70
2 0	Gıda Mühendisleri için hijyen eğitim sertifikası zorunluluğunun kaldırılması ve bu konudaki eğitim yetkisinin gıda mühendislerine verilmesi konusunda çalışma yapılması	2	%0,28
Toplam		714	%100

Bu açık uçlu sorunun yanıtları analiz edilip değerlendirildiğinde, katılımcı gıda mühendislerinin; mesleki memnuniyetsizlikleri, beklentileri ve çözüm önerilerini karşımıza çıkmaktadır. Katılımcıların talepleri/görüş ve önerileri, 20 temel kategori altında toplanmıştır. Bu kategoriler, mesleki hakların korunması, eğitim faaliyetlerinin artırılması, istihdam sorunlarının çözümü ve GIDAMO'nun yapısal etkinliği gibi temalar etrafında şekillenmektedir.

Bu doğrultuda katılımcı gıda mühendislerinin öne çıkan beklenti ve yorumları; GIDAMO'nun siyasetten uzak, tarafsız ve etkin olması, odanın siyasetten uzak, tarafsız ve adil bir şekilde çalışması, İZP/ÇZP taban ücretinin takibi ve bu konuda odanın yaptırım gücünün olması beklentisi, eğitim-seminer-danışmanlık desteği talebi özellikle mesleki eğitimlerin artırılması, özgünleştirilmesi ve ücretsiz sağlanması, istihdam desteği özellikle kamu ve özel sektörde gıda mühendislerinin istihdamını artırmaya yönelik çalışmalar yapılması beklentisi ve farklı meslek gruplarının gıda mühendisliği alanında çalışmasının engellenmesi talebi, kamuda gıda mühendislerine daha fazla kadro açılması ve atamaların artırılması konusu olarak değerlendirilebilmektedir.

Anket katılımcısı gıda mühendisleri, orta düzeyde dikkat çektiği konular ise; Mesleğin toplumdaki itibarının yükseltilmesi ve gıda mühendisliğinin önemine yönelik farkındalık çalışmalarının yapılması beklentisi, yeni mezunların sektöre daha kolay uyum sağlamasını sağlayacak çalışmaların beklentisi, özel sektörde çalışma koşullarının iyileştirilmesi ve odanın üyelerine hukuki destek sağlanması olarak sayılabilir.

Daha düşük oranda ancak yine de önemli sayılabilecek diğer beklentiler ise; odanın saygınlığının artırılması, sosyal ve akademik etkinliklerin artırılması, gıda sektörü çalışanlarına yasal zorunluluk statüsünde olan hijyen eğitimlerinin yetkisinin gıda mühendislerine verilmesi olarak sıralanabilir. Katılımcıların görüşlerinden sadece %0,70 oranında ise odanın mevcut çalışmalarından memnuniyet görüşü belirtilmiştir. Bu yorum ve beklentilerin tamamı; GIDAMO üyelerinin GIDAMO'nun mevcut

işlevselliğini artırması ve birçok konuda çözüm üretmeye yönelik faaliyetlerini beklediğini bize göstermektedir.

3. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, gıda mühendislerinin mesleki memnuniyet düzeyleri, istihdam koşulları, ücret tatmini ve meslek odasının etkinliği derinlemesine analiz edilmiştir. Araştırma, bireysel, sektörel ve örgütsel düzeyde meslek mensuplarının ve mesleğin karşılaştığı sorunları ortaya koyarak, yapısal dönüşüme yönelik önemli bulgular sunmaktadır.

Bu çalışmanın sonuçlarının öne çıkan başlıklarını değerlendirmek gerekirse; meslek mensuplarının istihdam ve iş olanakları, ücret ve sosyal haklar, çalışma ortam ve koşulları, eğitim ve mesleki yeterlilik gibi konularda sorunlar yaşamakta ve bu konuların çözülmesi noktasında meslek odasından yeterli destek ve faydayı göremediği düşüncesinde görülmektedir.

Demografik ve mesleki profiller yönünden; araştırmaya katılan gıda mühendislerinin %62,3'ü 26-40 yaş aralığındadır, bu da sektörde genç ve deneyimli bir çalışan profilinin hâkim olduğunu göstermektedir. Bu durum, istihdam sürekliliği açısından avantaj sağlamakla birlikte, kariyer ilerlemesi beklentilerini de artırmaktadır.

Kadın mühendislerin sektördeki oranının %67,5 düzeyinde olması, gıda mühendisliği mesleğinin cinsiyet eşitliğine yatkın olduğunu ortaya koymaktadır. Ancak, kadınların kariyer ilerlemelerinin yönetim pozisyonlarıyla sınırlı olması, cam tavan sendromu varlığını düşündürmektedir.

Katılımcıların büyük çoğunluğunun büyük şehirlerde çalıştığı belirlenmiştir. Bu durum, kırsal bölgelerde istihdam eksikliğini ve mesleki fırsatların coğrafi olarak dengesiz dağılımını göstermektedir.

İstihdam durumu ve sektörel dağılım yönünden; gıda mühendisliği mezunlarının %57,5'inin 6 ay içerisinde iş bulması, sektörde kısmi bir istihdam olanağı bulunduğunu göstermektedir. Ancak, iş bulma süresi 1 yıl ve üzeri olanların oranı (%20) dikkate değerdir ve mezunların sektöre adaptasyon sürecinde yaşanan zorlukları işaret etmektedir.

İstihdam dağılımı incelendiğinde: Catering/Toplu Yemek sektörü (%25,4) ve Unlu Mamuller sektörü (%11,2) ön plana çıkmaktadır. Buna karşılık, stratejik öneme sahip süt ve süt ürünleri (%5,6), kalite-denetim (%5,8) ve laboratuvar sektörü (%3,3) gibi alanlarda istihdam oranlarının düşük olması, meslekî uzmanlıkların etkin değerlendirilemediğini göstermektedir.

Kamuda çalışmak isteyen GM sayısı oldukça fazla olup, GIDAMO'dan bu konuda aktif bir destek ve çaba beklentisi olduğu anlaşılmaktadır. Resmi kimliği olmayan ve gönüllülük esasıyla faaliyet gösteren çeşitli GM toplulukları, kamuda GM istihdamı ve atamalar konusunda sosyal medya mecralarında kampanyalar yürütmektedir.

Staj sonrası işe devam oranının %11,2 düzeyinde kalması, eğitim ve iş yaşamı arasındaki bağın zayıf olduğunu ortaya koymaktadır. Üniversite-staj-iş entegrasyonunda sistematik eksiklikler söz konusudur.

Ücret memnuniyetine yönelik veriler incelendiğinde; katılımcıların %52,6'sı, GIDAMO tarafından belirlenen İZP/ÇZP taban ücretinin altında maaş aldıklarını beyan etmiştir. Bu durum, meslekî hakların korunmasında ciddi eksiklikler olduğunu göstermektedir. Yine katılımcıların %64,5'i mevcut ücret politikalarını yetersiz bulmaktadır. Özellikle deneyimli mühendisler arasında bu memnuniyetsizlik daha belirgin hale gelmektedir. Ücret tatminsizliği, mesleki motivasyonu olumsuz etkilemekte ve sektörde yetenek kaybına, farklı meslek alanlarına kaymalara veya beyin göçüne neden olabilmektedir.

Çalışma koşulları ve iş güvenliği yönünden varılan sonuçlar ise; çalışma ortamlarının fiziksel koşulları ve iş sağlığı-güvenliği standartları açısından katılımcıların yalnızca %39,6'sı memnuniyet bildirmiştir. Bu durum, iş güvenliği politikalarının uygulama alanında yetersiz kaldığını ortaya koymaktadır.

Gıda mühendislerinin büyük bir kısmının üretim (%30,9) ve kalite kontrol departmanlarında (%23,8) yoğunlaşması, yönetim ve Ar-Ge gibi alanlarda yeterince yer alamadıklarını göstermektedir. Meslekteki “beyaz önlüklü mühendis” algısı ve yönetici pozisyonlarına erişimdeki zorluklar, yetkinliklerin yetersiz değerlendirilmesine neden olabilmektedir.

Eğitim ve mesleki yeterlilik konusunda; anket sorularını yanıtlayan gıda mühendislerinin büyük bir kısmı, üniversite eğitiminin teorik olarak yeterli olduğunu ancak pratik uygulama eksikliklerinin mesleki yeterliliklerini kısıtladığını belirtmiştir. Mezunların sektörün ihtiyaçlarına yönelik olarak yeterince donanımlı olmadıkları ifade edilmiş, bu durum müfredatların sektörel odaklı ve sahaya yönelik yeniden yapılandırılması gerektiğine işaret etmiştir.

Gıda Mühendislerinin mesleki ve sosyal hayatlarında meslek odasının rolünü değerlendirdiğimizde; meslek odasının sektördeki ücret politikaları ve mesleki hakların korunması noktasında yetersiz görüldüğü anlaşılmaktadır. Katılımcıların önemli bir kısmı odanın faaliyetlerinin yetersiz kaldığını ifade ederken, örgütlülüğün artırılmasına yönelik beklentiler de sıkça dile getirilmiştir.

Bu çalışmanın sonuçlarına göre gıda mühendislerinin mesleki memnuniyetini arttırmaya yönelik şu öneriler sunulabilir;

Ücret politikalarının güçlendirilmesi; TMMOB Gıda Mühendisleri Odası, İZP/ÇZP taban ücret uygulamasının sektörde bağlayıcı hale gelmesi için yasal düzenleme çalışmalarını hızlandırmalı ve uygulamaların sıkı denetim mekanizmalarıyla desteklenmesini sağlamalıdır. Bu konuda kamu (Tarım ve Orman Bakanlığı, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, SGK vb.) ile iş birlikleri yapmalıdır. İZP/ÇZP dışında, gıda işletmelerinde ve gıda sektöründe çalışan tüm gıda mühendisleri için ücret politikaları belirlenmeli

ve oda tarafından bu politikaların etkin takibi sağlanmalı ve işletmelerin gıda mühendisinin emeğini adil bir şekilde değerlendirmesi teşvik edilmelidir.

İstihdam olanaklarının artırılması; GIDAMO, üniversiteler ile sanayi arasında köprü görevini üstlenerek iş birliklerinin güçlendirilmesine ve mezunların sektöre adaptasyon sürecinin hızlanmasına katkı sağlamalıdır. Üniversiteler, sanayi ile iş birliklerini arttırarak staj programlarının etkin hale getirilmesi, intörn mühendisliğin daha yaygınlaştırılmasını ve müfredatın eksik kalan pratik kısmını staj programlarında tamamlatmaya yönelik entegrasyonu sağlanmalıdır.

Çalışma koşullarının iyileştirilmesi; GIDAMO'nun yetkileri artırılarak, sektördeki gıda mühendislerinin çalışma koşullarının ve çalışma alanlarının iyileştirilmesine yönelik denetimler ve yasal yaptırımlar sağlanabilir. Özellikle iş yeri ziyaretleri, üyelerin GIDAMO'ya olan aidiyetlerini artıracığı gibi, işverenin gıda mühendisine bakışını da olumlu yönde değiştirecektir. Fiziki çalışma koşulları iyileştirildiğinde, gıda mühendislerinin mesleki memnuniyeti artacak ve iş gücü devir oranı azalacaktır.

Eğitim programlarının ve müfredatların yeniden yapılandırılması; gerek üniversitelerin gıda mühendisliği bölümlerinde gerekse GIDAMO'nun bünyesinde gerçekleşen eğitim müfredatlarının güncellenmesi ve pratik uygulamalara odaklanması, sektörel ihtiyaçlarla uyumlu hâle getirilmesi gerekmektedir.

GIDAMO, mezuniyet sonrası sektörde yer alan üyelerinin sektöre adaptasyonunu sağlamak amacıyla yaşam boyu öğrenme programları, mentorluk destekleri, kişisel gelişim eğitimleri, proje çalışmaları ve mesleki sertifikasyon süreçlerini yaygınlaştırmalıdır. Özellikle GIDAMO, eğitim ve seminerlerini güncellemeli, bu konuda çağın gereklerine ayak uydurmalıdır.

Meslek odasının rolünün güçlendirilmesi; GIDAMO, üyelerinin ve meslek mensuplarının mesleki haklarını savunma konusunda daha etkin rol üstlenerek sektörel politikaları belirleyici olmalıdır. Böylece gıda mühendisi, mesleki hayatta yaşadığı sorunlarda GIDAMO'yu bir başvuru merkezi, destekleyici ve savunucu bir mekanizma olarak görecektir ve aidiyet duygusu da artacaktır. Bu aynı zamanda mesleğin kamuoyundaki değerini ve saygınlığını arttıracaktır. GIDAMO, bunları yaparken tüm üyelerine eşit mesafede ve siyasetten uzak olmaya özen göstermelidir.

GIDAMO, düzenlediği çalıştay, panel ve projeler ile gıda sektöründe gündem belirleyici olmalıdır. Böylece sektördeki oda imajını da değiştirerek, üyelerinin gözünde daha saygın ve toplumun önünde daha görünür olabilir. Eğitim ve seminer içerikleri standart ve rutinden uzaklaşmalı, teknolojiyi ve gündemi takip ederek farkındalık yaratmalı ve üyelerinin iş yaşamında mesleki gelişimini desteklemelidir.

Sonuçların önemini akademik ve sektörel yönden değerlendirecek olursak; bu çalışma, gıda mühendislerinin mesleki memnuniyetini etkileyen unsurları detaylı bir şekilde analiz ederek, sektördeki

sorunların çözümüne yönelik bilimsel bir çerçeve sunmaktadır. Araştırmanın bulguları; üniversiteler, sanayi kuruluşları ve meslek odaları için stratejik karar alma süreçlerine ışık tutmakta, gelecekteki çalışmalara rehberlik etmektedir. Bu kapsamlı analiz, gıda mühendisliği mesleğinin sürdürülebilir gelişimi ve mesleki memnuniyetin artırılmasına yönelik bütüncül stratejik adımların atılmasını zorunlu kılmaktadır.

KAYNAKLAR

- Anonim. (2025a). *Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü*. <http://food.eng.ankara.edu.tr/> (Erişim: 16 Nisan 2025)
- Anonim. (2025b). *Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Gıda Mühendisliği*. <http://ziraat-gm.web.nku.edu.tr/> (Erişim: 30 Nisan 2023)
- Anonim. (2025c). *Ege Üniversitesi Gıda Mühendisliği*. <https://food.ege.edu.tr/> (Erişim: 30 Nisan 2023)
- Anonim. (2025d). *Çukurova Üniversitesi Gıda Mühendisliği*. <https://gida.cu.edu.tr/> (Erişim: 30 Nisan 2023)
- Anonim. (2025e). *Uludağ Üniversitesi Gıda Mühendisliği*. <https://uludag.edu.tr/gida> (Erişim: 30 Nisan 2023)
- Anonim. (2025f). *TMMOB Gıda Mühendisleri Odası* . www.gidamo.org.tr (Erişim: 16 Nisan 2023)
- Anonim. (2025g). *Yüksek Öğretim Kurulu - YÖK* . <https://yokatlas.yok.gov.tr/lisans-bolum.php?b=10082> (Erişim: 2 Mayıs 2023)
- Anonim. (2025h). *Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği Gıda Mühendisleri Odası Ana Yönetmeliği*. Resmi Gazete, 24 Eylül 2006, Sayı 26299. www.gidamo.org.tr (Erişim: 23 Aralık 2024)
- Anonim. (2025i). *Resmi Gazete*, 24 Haziran 2023, Sayı 32231.
- Anonim. (2025k). *TÜRK-İŞ* [Web sitesi]. <https://www.turkis.org.tr/> (Erişim: 2 Şubat 2024)
- Anonim. (2025l). *TMMOB Gıda Mühendisleri Odası İstanbul Şube 8. Dönem Faaliyetleri, Ocak 2020 – Ocak 2022*.
- Anonim. (2025m). *TMMOB Gıda Mühendisleri Odası Öğrenci Üye ve Öğrenci Temsilcilikleri Yönetmeliği*. Yayına giriş ve son güncelleme: 23 Aralık 2022. www.gidamo.org.tr (Erişim: 23 Aralık 2024)
- Aksoy, A., Zuluğ, A., Maviş, Ç. Y., Taş, D., Olum, E., Pehlivanoğlu, H., & Gökçek, Y. (Yayın yılı yok). *Gıda Mühendisliğine Giriş*. Nobel Akademik Yayıncılık.
- Buzrul, S. (2022). Türkiye’de gıda mühendisliği eğitimi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 10(1), 310-317.
- Daniel, W. W. (1999). *Biostatistics: A foundation for analysis in the health sciences* (7th ed.). John Wiley & Sons.
- Doğan, İ. S. (2019). *Gıda mühendisliği eğitiminde staj uygulamalarının etkinliği* (Yüksek lisans tezi). Boy Yayınları.
- Gökçe, R. (2011). Türkiye’de kalifiye gıda mühendisleri nasıl yetiştirilecek? *Akademik Gıda*, 9(4), 79-80.
- Günaydın, L. (2018). *Toplu yemekçilik ve gıda mühendisi* (Yüksek lisans tezi). Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Sert, S. (2011). Gıda mühendisliği bölümü ve gıda mühendisliği alanındaki gelişmeler. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 31(1-4).
- Sertkaya, E. (2011). Kalite yönetim sistemleri çerçevesinde çalışan gıda mühendislerinin iş tatmini. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Süngü, R. (2021). *Sıcak yemek üretimi yapan gıda işletmelerinde iş sağlığı ve güvenliği yönetiminin sağlanmasında gıda mühendisinin rolü* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Arel Üniversitesi.
- Şen, M. A. (2020). Hazır yemek sektöründe çalışan gıda mühendislerinin sorunları. *Akademik Gıda*, 18(1), 73-78.
- Uzunsoy, İ. (2012). *Etik davranma niyetinin Planlı Davranış Teorisi çerçevesinde değerlendirilmesi: Gıda mühendisleri örneği* (Yüksek lisans tezi). Sosyal Bilimler Enstitüsü
- Yılmaz,E., Oraman,Y., Unakıtan, G., İnan,İ.H., (2015).A Consumer Food Safety Knowledge, Practices and Differences in Behaviors in Thrace Region of Turkey.Tarım Bilimleri Dergisi Journal of Agricultural Sciences 21(2015) 279-287
- Yılmaz,E., Oraman,Y., İnan,İ.H., (2009).Gıda Ürünlerine İlişkin Tüketici Davranışı Dinamiklerinin Belirlenmesi: “Trakya Örneği”. Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi Journal of Tekirdag Agricultural Faculty 2009(6)1-10

Diyatomit Kullanımının Geopolimer Harçların Özellikleri Üzerine Etkisi

Fikriye AKYÜZ¹

Cenk KARAKURT²

- 1- Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü.
fikriyeakyuz@anadolu.edu.tr ORCID No: 0009-0005-3222-9744
- 2- Prof. Dr.; Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü.
cenk.karakurt@bilecik.edu.tr ORCID No: 0000-0002-4204-5341

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, çimento kullanılmadan, atık ve doğal bağlayıcılarla üretilen geopolimer harçlarda, ülkemizde bol miktarda bulunan fakat hafif yapı elemanlarında yeterince değerlendirilmeyen diyatomitin agrega olarak kullanılabilirliğini ortaya koymaktır.

Çalışmada, Afyonkarahisar (AD) bölgesinden temin edilen diyatomit kullanılmıştır. CEN standart kumu, 0-2 mm parçacık boyutu aralığına sahiptir ve kullanılan diyatomit kumla benzer granülometri düzeyine getirilmiştir. CEN standart kumun özgül ağırlığı 2,56'dır. Piknometre deneyi yapılarak, hazırlanan AD agregasının özgül ağırlığı 1,67 olarak ölçülmüştür. Bu değerler, diyatomitin düşük yoğunluğu sayesinde üretilen harçların daha hafif olabileceğini göstermektedir. Yalnızca CEN standart kumun agrega olarak kullanıldığı kontrol serisi üretilmiş, diğer serilerde diyatomitler standart kumun yerine, kuma göre düşük özgül ağırlıklarından dolayı hacimce %10, %20 ve %30 oranlarında ikame edilmiştir. Üretimlerde NaOH ve Na₂SiO₃ çözeltileri ile aktive edilmiş öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (YFC) bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Agrega/bağlayıcı oranı 2 olarak sabit tutulmuştur. Aktivatör çözeltilerin içeriğindeki suyun dışında su eklenmemiştir. Herhangi bir katkı maddesi kullanılmamıştır. Hazırlanan karışımlar, TS EN 12390-1 standardında tanımlanan koşullara uygun şekilde, iki kademeli bir titreşim işlemiyle 40×40×160 mm boyutlarındaki kalıplara yerleştirilmiştir. Taze haldeki geopolimer harçlar, ilk 24 saat boyunca laboratuvar ortamında, 20 ± 2 °C sıcaklıkta kalıplar içinde bekletilmiştir. 1 gün sonra kalıptan çıkarılan numuneler, deney gününe kadar 20 ± 2 °C sıcaklık ve %50 ± 5 bağıl neme sahip ortam koşullarında küre tabi tutulmuştur.

Belirlenen kür sürelerinin sonunda, mekanik dayanım özellikleri TS EN 1015–11/A1 standardı esas alınarak test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar diyatomitin agrega olarak hafif beton üretiminde değerlendirilebileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Geopolimer harç, Diyatomit, Yüksek fırın cürufu, Hafif beton, Mekanik özellikler

GİRİŞ

Geopolimer Harç

Günümüz inşaat sektörünün karşılaştığı en büyük sorunlardan biri, çevresel sürdürülebilirlik ile yapı malzemelerinin performans beklentilerini dengelemektir. Özellikle Portland çimentosu gibi geleneksel bağlayıcıların üretimi sırasında ortaya çıkan yüksek enerji tüketimi ve yoğun CO₂ salımı, alternatif çözümlere olan ihtiyacı artırmaktadır (Turner ve Collins, 2013:126). Dünyada en fazla üretilen malzeme olan betonun yıllık üretim

miktarı yaklaşık 20 milyar tona ulaşmaktadır. Bu üretimin temel bileşeni olan portland çimentosu, yalnızca 2010 yılına ait verilerde inşaat faaliyetleri kaynaklı 7,7 milyar ton CO₂ emisyonunun %36'sına karşılık gelmektedir. (Montes-Hernandez, 2025:1) Ayrıca bu oran, insan faaliyetlerinden kaynaklanan toplam CO₂ emisyonlarının yaklaşık %8'ini temsil etmektedir. (Miller, John, Pacca ve Horvath, 2018:115). Bu nedenlerle sürdürülebilir bir gelecek için yapı malzemelerinin çevresel etkilerini azaltmaya yönelik çalışmalar, küresel ölçekte büyük önem taşımaktadır. Çalışmalar yapı malzemesi üretiminde çimentoya alternatif bağlayıcılar ve doğal puzolanik katkıların kullanımını teşvik etmektedir. Bu doğrultuda, geopolimer harçlar; düşük karbon ayak izi ve yüksek dayanım gibi avantajlarıyla performans odaklı bir seçenek olarak öne çıkmaktadır.

Geopolimer harçlar, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve metakaolin gibi silis ve alümina bakımından zengin atık malzemelerin alkali çözeltiyle aktive edilmesi sonucu elde edilir. Bu yapıların, sülfat ve asit gibi agresif ortamlara karşı dayanıklı olması, onları altyapı sistemleri, endüstriyel yapılar ve zorlu çevresel koşullara maruz kalan alanlarda ideal bir malzeme haline getirmektedir (Davidovits, 2013). Ayrıca, yüksek sıcaklığa karşı gösterdikleri direnç sayesinde yangına maruz kalabilecek yapılar için de güvenli bir alternatiftir.

Alkali-aktif bağlayıcılar inşaat malzeme endüstrisinin geleceğinde potansiyel bir temel bileşen olarak değerlendirilmektedir (Provis ve Van Deventer, 2014:40) Çimentoya alternatif bağlayıcılar ile oluşturulan geopolimer harçların en önemli özelliği, üretimlerinde geri dönüştürülebilir ve endüstriyel atıkların kullanılması yoluyla doğal kaynak tüketimini azaltmalarıdır. Bu sayede hem çevresel etkiler sınırlandırılmakta hem de atık yönetimi desteklenmektedir. Tüm bu yönleriyle geopolimer harçlar, yalnızca teknik performans açısından değil, çevresel sorumluluk bilinciyle şekillenen modern yapı malzemesi anlayışına ve ekonomiye yüksek bir katkı sunmaktadır.

Hafif beton

Hafif beton, geleneksel normal betona kıyasla daha düşük birim hacim ağırlığına sahip olmasına rağmen yeterli mekanik dayanım ve dayanıklılık gösterebilen özel bir beton türüdür. Yoğunluğu genellikle 1800 kg/m³'ün altında olan betonlar hafif beton olarak sınıflandırılmaktadır (ACI 213R, 2014:7). Hafif betonun en belirgin avantajları arasında düşük yoğunluk, ısı ve ses yalıtımında yüksek performans, düşük ısıl iletkenlik katsayısı ve yapıların ölü yükünü azaltma özelliği yer almaktadır. Bu özellikleri sayesinde hafif betonlar; yüksek katlı binalar, köprü tabliyeleri, prefabrik yapı elemanları ve yalıtım amaçlı uygulamalarda önemli bir kullanım alanına sahiptir (Neville, 2011:340).

Hafif beton üretiminde iki temel yöntem kullanılmaktadır. İlk olarak, gözenekli hafif agregaların kullanımı yöntemi yaygındır. Pomza, perlit, tuf, genişletilmiş kil ve diatomit gibi doğal veya yapay kökenli agregalar, yüksek gözeneklilikleri sayesinde betonun yoğunluğunu azaltırken aynı zamanda ısı yalıtım özelliklerini iyileştirmektedir (Karakurt ve Özen, 2017:15). Pomza, perlit, tuf, gibi diatomit de düşük özgül ağırlığa sahip bir mineral olduğundan hafif beton üretiminde tercihen değerlendirilebilir, örneğin öğütülmüş ve işlenmiş diatomitlerde hacim yoğunluğu 250–400 kg/m³ değerine kadar düşebilir (Sezgin, 1998:5).

Yapılan bazı çalışmalar neticesinde hafif agregalar ile üretilen hafif betonların kullanılan agreganın cinsine göre çeşitli amaçlarda değerlendirilmesi uygun bulunmuştur. Volkanik tuf ve pomza agregaları kullanılarak üretilen hafif betonlarda, taşıyıcı yapılarda kullanılabilecek düzeyde basınç dayanımı sağlanırken; genişletilmiş kil ve perlit agregalarıyla elde edilen hafif betonların ise daha çok ısı yalıtımı gibi amaçlara yönelik uygulamalar için uygun olduğu değerlendirilmektedir (Karakurt ve Özen, 2017:15).

İkinci yöntem ise hücreli beton üretimidir. Köpük beton veya gaz beton (AAC) gibi türlerde karışıma gaz oluşturuvcu katkılar veya köpük ajanları ilave edilerek gözenekli bir yapı oluşturulur. Bu sayede düşük yoğunluklu, hafif ve yüksek yalıtım özelliklerine sahip betonlar elde edilmektedir. Özellikle gaz beton, otoklav kürüne tabi tutularak boyutsal kararlılık ve yeterli basınç dayanımı kazanmaktadır (Amran vd., 2015:993).

Sonuç olarak, hafif betonlar yalnızca taşıyıcı elemanlarda ağırlık azaltıcı özellikleriyle avantaj sağlamamakta, aynı zamanda enerji verimliliği ve konfor koşullarını iyileştiren yalıtım özellikleriyle de öne çıkmaktadır. Bu nedenle sürdürülebilir yapı malzemeleri arasında önemli bir alternatif olarak değerlendirilmektedir (Neville, 2011:348).

Diyatomit

Diyatomit, Bacillariophyta olarak bilinen tek hücreli ökaryotik alglerin silis içeren kabuklarının fosilleşmesiyle oluşan organik kökenli bir sedimanter kayadır. Hücrelerini, amorf yapıda silis (SiO₂·nH₂O) içeren sert ve früstül adı verilen kabuklarla çevreleyerek korurlar. Diatomların yaşam süreçleri sona erdiğinde, silisli kabukları çökerek bir araya gelir ve zamanla diatomit yataklarını meydana getirir. Diatomeler (Bacillariophyta), fotosentetik özellikleri sayesinde biyolojik, ekolojik ve ekonomik açıdan kritik bir role sahiptir. Alglar arasında önemli bir grup oluşturan bu protistler hem akuatik ortamlarda hem de nemli kara yüzeylerinde yaşam gösterebilirler. (Çetin ve Taş, 2012:29).

Diyatomit; düşük maliyetli, dünya genelinde yaygın olarak bulunan önemli bir doğal mineraldir. Çok yönlü bir malzeme olup, ısı ve ses yalıtımından içecek filtrasyonuna (bira, şarap, havuz suyu), kimyasal

reaksiyon ortamlarından aşındırıcı ve patlayıcı üretimine kadar birçok alanda değerlendirilmektedir (Werner, 1977:24).

Küresel ölçekte tahmini diyatomit rezervi 1 milyar tonun üzerindedir ve başta Amerika Birleşik Devletleri, Çin, Danimarka, Rusya, Arjantin ve Meksika gibi ülkeler olmak üzere birçok ülkede zengin yataklar mevcuttur. Dünya genelinde yıllık diyatomit üretimi yaklaşık 2 ila 2,5 milyon ton arasında değişmektedir. Türkiye ise jeolojik yapısı sayesinde diyatomit açısından oldukça zengin ülkelerden biridir. Yapılan araştırmalara göre Türkiye'deki toplam görünür ve potansiyel diyatomit rezervi yaklaşık 200 ile 300 milyon ton olarak tahmin edilmektedir. Manisa, Balıkesir, Isparta, Nevşehir, Afyonkarahisar ve Van gibi illerde yoğunlaşan bu rezervler, yüksek silis içeriği (%70-95) ve fiziksel özellikleri sayesinde sanayide geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Türkiye'de yıllık üretim miktarı ise yaklaşık 60.000 ile 100.000 ton arasında değişmekte olup, bu değer ülkenin dünya üretimi içindeki yerini ortaya koymaktadır. Türkiye, dünya diyatomit rezervlerinin yaklaşık %5'ine sahip olmasına rağmen, bu malzemenin inşaat sektöründe kullanım alanı halen yeterli düzeyde değildir.

Diyatomit, yüksek miktarda amorf silika içeriği, yüksek gözenekliliği ve düşük yoğunluğu ile öne çıkan doğal bir puzolandır. Bu özellikleri sayesinde, hem puzolanik reaksiyonlara girerek bağlayıcı matrisin dayanımına katkıda bulunabilir hem de hafif yapı malzemeleri üretiminde avantaj sağlayabilir (Pavliková vd., 2022:2). Gözenekli ve hafif yapısı, malzemenin ısı ve ses yalıtım performansını artırırken, düşük yoğunluğu sayesinde yapı elemanlarının ağırlığını azaltır. Bu özellikler, diyatomiti hem hafif hem de enerji verimliliği yüksek yapı malzemelerinin üretiminde cazip kılar.

Diyatomit, yoğunluğu düşürerek harcın toplam ağırlığını azaltmakta, aynı zamanda yalıtım özelliklerini geliştirmektedir. Ancak, gözenekli yapısı mekanik dayanımda belirli bir azalmaya yol açabilir. Bu nedenle, diyatomit katkılı harçlar genellikle hafif geopolimer harçlar, yalıtım panelleri veya yapısal yük taşımayan elemanlarda tercih edilmektedir. Diyatomit agregalı numuneler üzerinde yapılan mekanik dayanım ve birim hacim ağırlık deneyleri ayrıca ısıl iletkenlik deneyleri diyatomit agregaların, taşıyıcı olmayan, ısı yalıtımı yüksek, hafif yapı malzemesi üretmek için kullanılabileceğini göstermiştir. (Uygunoğlu ve Ünal, 2006:69)

Geopolimerler, yüksek dayanım, düşük karbon ayak izi ve çevre dostu üretim süreçleriyle sürdürülebilir inşaat uygulamaları için önemli bir alternatiftir. Diyatomit kullanımı, geopolimer harçların hem izolasyon hem de dayanıklılık özelliklerini iyileştirerek enerji verimliliği yüksek ve çevre dostu yapı projelerine katkı sağlar. Bu bağlamda, diyatomit agregası olarak, özellikle uzun ömürlü, hafif malzemelerin geliştirilmesinde uygun bir seçim olarak öne çıkmaktadır.

Günümüze kadar yapılan akademik çalışmalar incelendiğinde diyatomit amorf silika içeriğinden dolayı bazı çalışmalarda sadece katkı

maddesi olarak kullanılmıştır. Diyotomitin çimento esaslı harçlarda bağlayıcı katkı olarak kullanılabilirliğini araştıran bir çalışma diyatomitin uçucu külden daha yüksek, silis dumanından ise daha düşük aktivite gösterdiğini bildirmiştir (Karahisar Gökkonca, 2010:7). Bazı çalışmalarda ise bağlayıcı olarak çimento yerine ve geopolimer harçlarda uçucu kül yerine ikame edildiği görülmüştür.

Kimi akademik çalışmalarda ise bazı bölge diyatomitlerinin hafif yapı elemanı üretilmesi amacıyla agrega olarak kullanıldığı görülmüştür. Ancak, agrega olarak kullanılan çalışmalarda bağlayıcı olarak çimento tercih edilmiştir. Bu çalışmada diyatomit agrega olarak CEN standart kum yerine ikame edilirken, bağlayıcı olarak öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanılarak, hafif aynı zamanda çevre dostu bir geopolimer harç üretimi hedeflenmiştir.

MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada. Ereğli Demir ve Çelik Fabrikası'ndan (Erdemir) temin edilen öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Erdemir yüksek fırın cürufunun özgül ağırlığı yaklaşık 2,9 olarak kabul edilmektedir. Tablo 1 yüksek fırın cürufunun içerdiği mineraller hakkında bilgi verilmektedir.

Tablo 1: Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Kimyasal Yapısı

Bileşen	%
SiO ₂	38-45
CaO	26-38
Al ₂ O ₃	13-19
MgO	5-10
FeO	1.0 max.
S	1.5 max.
K ₂ O	2.0 max.
MnO	2.5 max.

Kaynak: <https://katalog.oyakmadenmetalurji.com.tr/kalite-detay>

Agrega olarak CEN standart kum kullanılmıştır. CEN standart kumu, 2,56 özgül ağırlığa ve %0,63 su emme oranına sahip olup, 0–2 mm tane boyut aralığında yer almaktadır. Bu kum, minimum %98 SiO₂ içeriğine sahip doğal silika kumundan elde edilen yuvarlak tanelerden oluşmaktadır (Şenol, 2025:7). CEN standart kumun granülometrisi Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2: CEN Standart Kumunun Granülometrisi

Elek Göz Açıklığı (mm)	Kümülatif Kalan %
0,08	99 ± 1
0,16	87 ± 5
0,5	67 ± 5
1	33 ± 5
1,6	7 ± 5
2	0

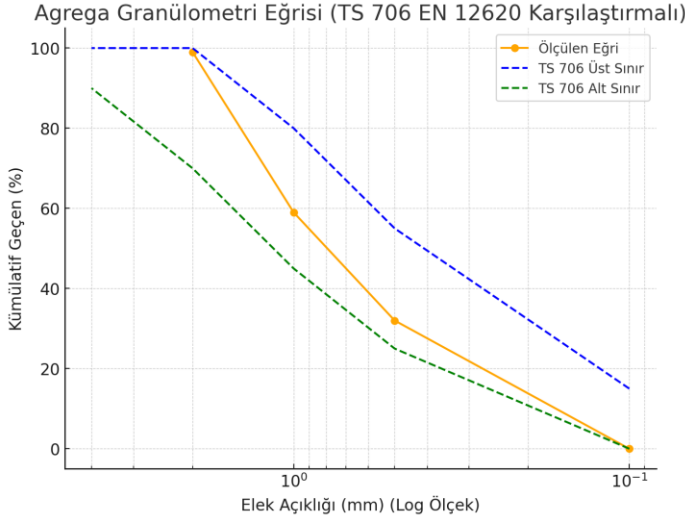
Kaynak: <https://www.hira.com.tr/Tr/Urun/Cen-Standart-Kum>

Kullanılan AD kimyasal bileşimleri X-ışını floresansı (XRF) kullanılarak karakterize edilmiştir. Tablo 3'te sunulan XRF analiz sonuçlarına göre, Afyonkarahisar (AD) örneğinin SiO₂ içeriği %60,73 olarak belirlenmiştir.

Tablo 3: Afyonkarahisar Diyatomit (AD) XRF Analizi

Bileşen	%
SiO ₂	60,73
CaO	4,94
Al ₂ O ₃	11,67
MgO	2,22
Fe ₂ O ₃	2,51
SO ₃	0,07
P ₂ O ₅	1,58
K ₂ O	0,63
Na ₂ O	1,43

İkame agrega olarak Afyonkarahisar (AD) bölgesinden temin edilen diyatomit kullanılmıştır. Yapılan deneyler neticesinde özkütlesi 1,67, su emme kapasitesi 0,99 bulunmuştur. Parçacık boyutu 0,1-2 mm olacak şekilde hazırlanmıştır. Hazırlanan Afyon Diyatomit TS EN 933-1'e göre Elek analizine tabi tutulmuştur. Sonuçlardan oluşturulan grafik Şekil 1'dedir.



Şekil 1: Kullanılan Diyatomitin Granulometri Eğrisi

Çalışmada kullanılan alkali aktivatörler DETSAN Kimya'dan temin edilmiştir. NaOH %98 saflık değerine sahip ve Na_2SiO_3 ise %99 saflık, 1,4 özgül ağırlık ve 3 modül değerlerine sahiptir. Elde edilen bu alkali çözeltiler karışımların hazırlanmasında kullanılmıştır. Na_2SiO_3 çözeltisinin yaklaşık %64'ü su (H_2O) iken, %36'sı katı maddelerden oluşmaktadır.

Geopolimer harç serileri yalnızca CEN standart kumun agregası olarak kullanıldığı kontrol serisi şeklinde ve standart kumun yerine, hazırlanan diyatomit agregası, kuma göre düşük özgül ağırlığından dolayı hacimce %10, %20 ve %30 oranlarında ikame edilerek hazırlanmıştır.

NaOH ve Na_2SiO_3 çözeltileri ile aktive edilmiş öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (YFC) bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Agregası/bağlayıcı oranı 2 olarak sabit tutulmuştur. Harç serilerinde 10 M NaOH çözeltisi kullanılmıştır. $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı 2 olarak sabit tutulmuştur. Aktivatör çözeltilerin içeriğindeki suyun dışında su eklenmemiştir. Su/öncül oran 0,37 olarak belirlenmiştir. Herhangi bir katkı maddesi kullanılmamıştır. Geopolimer harç serilerinin isimlendirilmesinde kullanılan 'K' indeksi standart kum ile üretilmiş kontrol harç serisini ifade etmektedir. 'AD' indeksi ise Afyon Diyatomit agregalı harç serilerini ifade eder. AD' yi belirtirken kullanılan sayısal değerler malzemenin toplam kum hacmi içindeki hacimsel yüzdesini temsil eder. Örneğin, AD10 tanımı, toplam kum hacminin %10'una eşdeğer bir miktarın AD ile değiştirildiği bir geopolimer harç karışımını ifade eder.

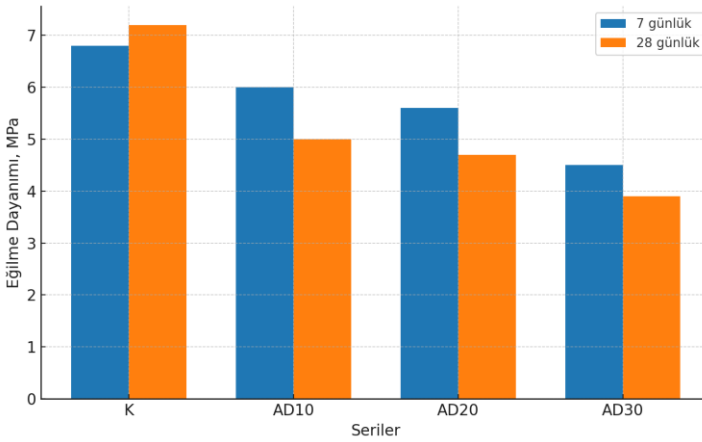
Hazırlanan karışımlar, TS EN 12390-1 standardında tanımlanan koşullara uygun şekilde, iki kademeli bir titreşim işlemiyle 40×40×160 mm boyutlarındaki kalıplara yerleştirilmiştir. Tablo 4' te görüldüğü üzere YFC,

alkali çözelti miktarları ve su/bağlayıcı oranı sabit tutularak kum ve diyatomit miktarları değiştirilerek geopolimer harç serileri oluşturulmuştur.

Tablo 4. Geopolimer Harç Serileri Karışım Tablosu (1 m³)

Numune Adı	NaOH (M)	Na ₂ SiO ₃ (kg)	YFC (kg)	Diyatomit (kg)	Kum (kg)	Su/Bağlayıcı
K	10	150	700	0	1400	0,37
AD10	10	150	700	91	1050	0,37
AD20	10	150	700	183	700	0,37
AD30	10	150	700	274	350	0,37

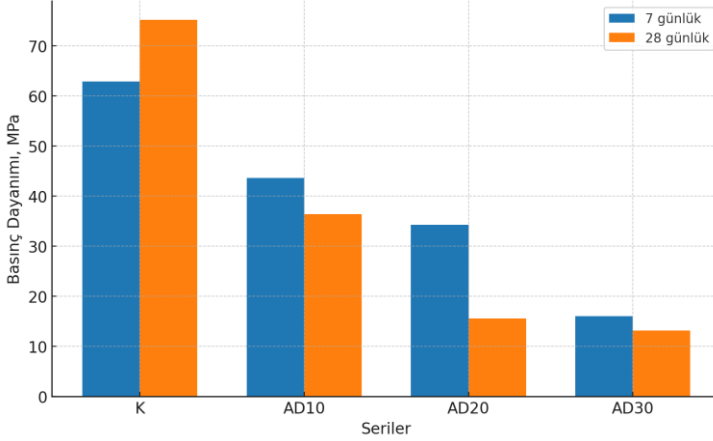
7 günlük ve 28 günlük ortam kürü sonrası harç numuneleri üzerinde üç nokta eğilme ve eksenel basınç dayanımı deneyleri yapılarak geopolimer harçların mekanik özellikleri belirlenmiştir.



Şekil 2: Geopolimer Serilerin 7 ve 28 Günlük Eğilme Dayanımları

Şekil 2' de gösterilen eğilme dayanımı sonuçları incelendiğinde, kontrol serisinin (K) hem 7 günlük hem de 28 günlük eğilme dayanımı açısından en yüksek değerlere ulaştığı, AD ikamesiyle birlikte eğilme dayanımında belirgin bir azalma meydana geldiği görülmektedir. 7 günlük dayanımda K serisi 6,8 MPa değerine ulaşırken, %10, %20 ve %30 oranında AD ikameli seriler sırasıyla 6,0 MPa, 5,6 MPa ve 4,5 MPa değerlerine gerilemiştir. Benzer şekilde, 28 günlük sonuçlarda kontrol serisi 7,2 MPa seviyesine ulaşmış, ancak AD10, AD20 ve AD30 serileri sırasıyla 5,0 MPa, 4,7 MPa ve 3,9 MPa değerleriyle daha düşük performans sergilemiştir. Bu bulgular, ikame oranı arttıkça eğilme dayanımındaki kaybın belirginleştiğini göstermektedir. Dolayısıyla, diyatomit kullanımının malzemeye hafiflik ve

yalıtım özellikleri kazandırabileceği göz önünde bulundurulsa da, mekanik performans üzerinde olumsuz etkiler yarattığı, özellikle yüksek ikame oranlarında bu etkinin daha da arttığı söylenebilir.



Şekil 3: Geopolimer Serilerin 7 ve 28 Günlük Basınç Dayanımları

Şekil 3 eksenel basınç deneyi sonuçlarını göstermekte olup, elde edilen sonuçlar, kontrol serisinin (K) basınç dayanımı bakımından en yüksek performansı gösterdiğini ortaya koymaktadır. K serisinin dayanımı 7 günde 62,9 MPa iken, 28 günde 75,2 MPa seviyesine ulaşarak zamanla beklenen gelişimi sergilemiştir. Bununla birlikte, AD ikameli serilerde dayanım değerleri belirgin şekilde daha düşük çıkmıştır. AD10 serisinde 7 günlük dayanım 43,6 MPa olup 28 günde 36,4 MPa'ya gerilemiştir. AD20 serisi başlangıçta 34,3 MPa değerine sahipken, 28 günlük ölçümde yalnızca 15,6 MPa dayanım göstermiştir. En düşük performans ise AD30 serisinde gözlenmiş; 7 günlük 16 MPa değeri 28 günde 13,2 MPa'ya düşmüştür. Bu bulgular, diyatomit katkısının artmasıyla porozitenin arttığı ve mekanik dayanımda ciddi kayıpların ortaya çıktığını göstermektedir. Özellikle yüksek ikame oranlarında (%20 ve %30) malzemenin uzun dönemli dayanım gelişimi olumsuz yönde etkilenmektedir. Düşük oranlı kullanımın (%10) kısmen uygulanabilir olduğu, ancak daha yüksek oranların basınç dayanımı açısından negatif sonuçlar doğurduğu sonucuna ulaşılabilir.

28 günlük kürlenme süresinden sonra geopolimer serisi için birim hacim ağırlıklar tayin edilmiştir.

Tablo 5: Geopolimer Harç Serileri Birim Hacim Ağırlık Değerleri

Numune Adı	Birim Hacim Ağırlık (g/cm ³)
K	2,23
AD10	2,03
AD20	1,83
AD30	1,70

Tablo 5’te verilen sonuçlar, geopolimer harç serilerinin birim hacim ağırlık değerlerinin diyatomit ikamesiyle birlikte azaldığını açıkça ortaya koymaktadır. Kontrol serisi (K) 2,23 g/cm³ ile en yüksek birim hacim ağırlığa sahipken, %10 diyatomit ikamesi ile bu değer 2,03 g/cm³’e düşmüştür. İkame oranı %20’ye çıkarıldığında 1,83 g/cm³, %30 seviyesinde ise 1,70 g/cm³ değerine kadar gerilemiştir. Bu durum, diyatomitin düşük yoğunluklu ve gözenekli yapısının, harçların birim hacim ağırlığını doğrudan azalttığını göstermektedir.

Sonuçlar, diyatomit ilavesinin geopolimer harçların yoğunluğunu azaltarak hafif yapı malzemelerinin üretimine olanak sağladığını ortaya koymaktadır. Bu durum, özellikle yapıların toplam ölü yükünün azaltılması bakımından önemli bir avantaj sunmaktadır. Bununla birlikte, yoğunluktaki bu azalmanın mekanik dayanım değerlerinde düşüşe neden olduğu da göz önünde bulundurulmalıdır.

SONUÇ

Bu çalışma, diyatomitin agrega olarak standart kum yerine belli oranlarda ikame edilerek, alkali ile aktive edilmiş öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ile oluşturulan harçların işlenebilirliği, mekanik ve fiziksel özellikler üzerindeki etkilerini araştırmaktadır.

Harç serilerinde mekanik dayanım testleri sonuçlarına göre AD ikame oranı arttıkça eğilme ve basınç dayanım kaybı olduğu görülmektedir. İkame oranı arttıkça diyatomitin su emme kapasitesinin standart kuma göre daha yüksek olması nedeniyle ve boşluklu yapısından dolayı serilerde porozitenin artması dayanım kaybına sebep olabilmektedir. Bu nedenlerle Şekil 2 ve Şekil 3’ te sunulan grafiklere dikkat edildiğinde kontrol numunesinde erken dönem basınç dayanımına göre geç dayanımda bir artış söz konusu iken AD agregalı serilerde geç dönem dayanımlarında erken dönem dayanımlarına göre düşüş olduğu gözlenmektedir. Bu sonuçlar diyatomit agregalı harçlarda yüksek dayanım beklentisinin olmaması gerektiğini göstermektedir.

AD ikamesi arttıkça geopolimer harç serilerinin, birim hacim ağırlıklarının düştüğünü göstermektedir. Tüm bu deney sonuçları bir arada değerlendirildiğinde taşıyıcı amaçlı olmayan hafif yapı elemanı üretiminde diyatomitin geopolimer sistemlerde agrega olarak kullanılabilirliğini ortaya koymaktadır.

REFERANSLAR

- Türk Standardları Enstitüsü. (2021). TS EN 12390-1: Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 1: Deney numunesi ve kalıplarının şekil, boyut ve diğer özellikleri. Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.
- Türk Standardları Enstitüsü. (2000). TS EN 772-4: Kagir birimler- Deney metotları- Bölüm 4: Tabii taş kagir birimlerin toplam ve görünen porozitesi ile boşluksuz ve boşluklu birim hacim kütlelerinin tayini. Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.
- Türk Standardları Enstitüsü. (2013). TS EN 1015-11/A1: Kagir harcı – Deney metotları - Bölüm 11: Sertleşmiş harcın basınç ve eğilme dayanımının tayini. Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.
- ACI Komitesi 213. (2014). Yapısal hafif agrega betonu için kılavuz (ACI 213R-14). Amerikan Beton Enstitüsü.
- Amran, Y. H. M., Farzadnia, N., ve Ali, A. A. (2015). Properties and applications of foamed concrete; a review. *Construction and Building Materials*, 101, 990–1005.
- Çetin, M., ve Taş, B. (2012). Biyolojik orijinli tek doğal mineral: Diatomit. *TÜBAV Bilim Dergisi*, 5(2), 28–46.
- Davidovits, J. (2013). Jeopolimer kimyası ve uygulamaları (4. baskı). Jeopolimer Enstitüsü.
- Karahisar Gökkonca, E. (2010). Diatomitin yapı malzemeleri endüstrisinde kullanımı üzerine araştırma (Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği ABD).
- Karakurt, C., ve Özen, U. (2017). Influence of natural lightweight aggregates on the properties of concrete. *Journal of the Turkish Chemical Society, Section B: Chemical Engineering*, 1(sp. is. 2), 9–16.
- Miller, S. A., John, V. M., Pacca, S. A., & Horvath, A. (2018). Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050. *Cement and Concrete Research*, 114, 115–124.
- Montes-Hernandez, G. (2025). Decarbonizing the cement industry is crucial for reducing CO₂ emissions: Myth or reality? *Chemical Engineering Journal*, 518, 164995. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.164995> 18.09. adresinden 18 Ağustos 2025 tarihinde alınmıştır.
- Neville, A. M. (2011). Betonun özellikleri (5. baskı). Pearson Education.
- Pavlíková, M., Rovnaníková, P., Záleská, M., ve Pavlík, Z. (2022). Diatomaceous earth—Lightweight pozzolanic admixtures for repair mortars—Complex chemical and physical assessment. *Materials*, 15(19), 6881.
- Provis, J. L., & van Deventer, J. S. J. (Eds.). (2018). Alkali activated materials: Cement and Concrete Research 114, 40-48
- Sezgin, M. (1998). Diatomitin hafif yapı eldesinde değerlendirilebilirliği (Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta).
- Şenol, A. F. (2025). Kullanılmış kahve telvesini geri dönüştürülmüş bir yapı malzemesi olarak kullanan jeopolimer harcın performansı: Deneysel ve öngörücü bir analiz. *Hibrit İlerlemeler*, 10, 100479.

- Turner, L. K., ve Collins, F. G. (2013). Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. *Construction and Building Materials*, 43, 125–130.
- Uygunoğlu, T., & Ünal, O. (2006). Diyatomitin hafif blok üretiminde kullanılması. *Politeknik Dergisi/Journal of Polytechnic*, 9(1), 65–70.
- Werner, D. (1977). *The biology of diatoms*. University of California Press.

