

Ekim 2025

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

**ALANINDA ULUSLARARASI
AKADEMİK ARAŞTIRMA
VE ÇALIŞMALAR**

EDİTÖRLER

PROF. DR. SELAHATTİN BARDAK

DOÇ. DR. ABDURRAHMAN GÜNDAY

Genel Yayın Yönetmeni / Editor in Chief • C. Cansın Selin Temana

Kapak & İç Tasarım / Cover & Interior Design • Serüven Yayınevi

Birinci Basım / First Edition • © Ekim 2025

ISBN • 978-625-5737-63-2

© copyright

Bu kitabın yayın hakkı Serüven Yayınevi'ne aittir.

Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz.

The right to publish this book belongs to Serüven Publishing. Citation can not be shown without the source, reproduced in any way without permission.

Serüven Yayınevi / Serüven Publishing

Türkiye Adres / Turkey Address: Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak

Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA

Telefon / Phone: 05437675765

web: www.seruvenyayinevi.com

e-mail: seruvenyayinevi@gmail.com

Baskı & Cilt / Printing & Volume

Sertifika / Certificate No: 47083

ELEKTRİK - ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

**ALANINDA ULUSLARARASI AKADEMİK
ARAŞTIRMA VE ÇALIŞMALAR**

EKİM 2025

EDİTÖR

**PROF. DR. SELAHATTİN BARDAK
DOÇ. DR. ABDURRAHMAN GÜNDAY**

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1

NANOTEKNOLOJİNİN SENSÖR GELİŞTİRMEDE ROLÜ VE UYGULAMALARI

Zülfü TÜYLEK 1

BÖLÜM 2

FOTOVOLTAİK SİSTEMLERDE KULLANILAN DA-DA DÖNÜŞTÜRÜCÜ TOPOLOJİLERİ

Mehmet Can SEKANLI 17

Okan BİNGÖL 17

BÖLÜM 3

KARDİYOVASKÜLER HASTALIK TEŞHİSİNDE MAKİNE ÖĞRENMESİ ALGORİTMALARININ KARŞILAŞTIRMALI DEĞERLENDİRMESİ

Rukiye UZUN ARSLAN..... 45

İrem ŞENYER YAPICI..... 45

BÖLÜM 4

SENSÖR TEKNOLOJİSİNİN TEMELLERİ VE GELİŞİM SÜRECİ

Zülfü TÜYLEK..... 61



NANOTEKNOLOJİNİN SENSÖR GELİŞTİRMEDE ROLÜ VE UYGULAMALARI

“ ”

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

GİRİŞ

Sensör teknolojileri, günümüz teknolojik gelişmelerinde kritik bir rol oynamaktadır. Otomotiv sektöründen sağlık hizmetlerine, çevre izleme sistemlerinden savunma sanayine kadar birçok alanda sensörler, veri toplama, analiz ve karar alma süreçlerinin temel yapı taşları arasındadır. Ancak, klasik sensör sistemlerinin bazı sınırlamaları (özellikle hassasiyet, seçicilik, enerji verimliliği ve minyatürleştirme) bu teknolojilerin gelişimini kısıtlamaktadır (Li vd., 2019). Bu bağlamda, geleneksel yaklaşımların ötesine geçen ilerlemeler sağlayan yeni nesil çözümler büyük önem kazanmıştır.

Nanoteknoloji, bu çözümlerin başında gelmektedir. Nanoteknoloji, maddenin nanometre ölçeğinde (1-100 nm) yapılandırılması ve kontrolüyle ilgilendirir. Bu ölçek, atomların ve moleküllerin doğrudan manipüle edilebildiği ve malzeme özelliklerinin önemli ölçüde değişebildiği bir boyuttur. Bu düzeyde, kuantum etkileri daha belirgin hale gelir. Arttırılmış yüzey alanı, iletkenlik, kimyasal reaktivite ve mekanik dayanıklılık gibi özelliklerde de önemli iyileştirmeler elde edilebilir (Kumar vd., 2020). Bu özellikler sayesinde nanomalzemeler, sensör teknolojilerinde devrim niteliğinde yeniliklerin önünü açmaktadır.

Nanomalzemeler kullanılarak geliştirilen sensörler, daha yüksek hassasiyet, iyileştirilmiş seçicilik, daha kısa tepki süreleri ve daha düşük enerji tüketimi gibi avantajlar sunar (Rai vd., 2021). Dahası, bu sensörler çok küçük boyutlara küçültülebilir ve bu da onları taşınabilir, giyilebilir veya implante edilebilir sistemler için özellikle ideal hale getirir. Örneğin, kan şekeri seviyelerini gerçek zamanlı olarak izleyen giyilebilir glikoz sensörleri veya düşük konsantrasyonlarda bile havadaki kirleticileri tespit edebilen çevresel gaz sensörleri, nanoteknolojinin bu alana katkısının doğrudan örnekleridir (Wang vd., 2018).

Bu bölümde öncelikle nanoteknolojinin temel kavram ve ilkeleri ele alınacaktır. Ardından, farklı nanomalzeme türlerinin (örneğin karbon nanotüpler, grafen, metal nanopartiküller, kuantum noktaları, nanoteller ve nanolevhalar) sensör tasarımı üzerindeki etkileri değerlendirilecektir. Ayrıca, tıbbi teşhis ve tedavi sistemlerinde kullanılan nano tabanlı biyosensörler ve çevresel izleme uygulamaları ayrıntılı olarak incelenecektir (Zhou vd., 2022). Nanoteknolojinin giyilebilir teknoloji ve akıllı tekstil sistemlerinde sunduğu fırsatlar da bu bağlamda ele alınacaktır. Son olarak, nanoteknoloji destekli sensör sistemlerinin gelecekteki potansiyeli ve karşılaşılabilecekleri teknik, etik ve çevresel zorluklar ele alınacaktır.

Bu kapsamlı değerlendirme, nanoteknolojinin sensör dünyasına getirdiği yeniliklerin daha iyi anlaşılmasına ve geleceğin sensör sistemleri için bir vizyon geliştirilmesine katkıda bulunacaktır.

1. Nanoteknoloji Nedir? Temel Kavramlar

Nanoteknoloji, maddenin atomik ve moleküler düzeylerde işlenmesi yoluyla işlevsel yapılar ve sistemler oluşturmayı amaçlayan disiplinlerarası bir bilim ve mühendislik alanıdır. “Nano” öneki, bir metrenin milyarda biri olan 1 nanometre ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) uzunluğunu ifade eder. Yaklaşık 1 ila 100 nanometre arasında olan bu boyutta, maddenin fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri makroskobik hallerinden önemli ölçüde farklılık gösterir (Bhusan, 2017).

Bu farklılıklar, kuantum etkileri, yüksek yüzey-hacim oranı, yüzey enerjisi değişimleri ve yapısal heterojenlik ile desteklenmektedir. Bu olağanüstü özellikler sayesinde nanomalzemeler, özellikle sensör tasarımı olmak üzere birçok alanda yüksek performanslı çözümler sunar. Nanoteknolojik ölçekte ortaya çıkan temel özellikler ve etkiler aşağıda özetlenmiştir:

Yüksek yüzey-hacim oranı: Nanopartiküller, yüzey alanlarının büyük bir kısmını dışarıya doğru açarlar. Bu, kimyasal reaksiyonların daha hızlı ve verimli bir şekilde gerçekleşmesini sağlar. Sensör teknolojisinde, özellikle düşük konsantrasyonlardaki gaz veya biyomoleküllerin tespitinde hassasiyeti önemli ölçüde artırır (Rai ve ark., 2021).

Kuantum etkileri: Kuantum mekanik etkiler nanometre ölçeğinde belirginleşir. Özellikle kuantum noktalarında, elektronların enerji seviyeleri ayrık hale gelir ve malzemenin optik, elektronik ve manyetik özelliklerini değiştirir. Bu etkilerden, örneğin floresan biyosensörlerin geliştirilmesinde doğrudan yararlanılır (Zhou ve ark., 2022).

Gelişmiş mekanik ve kimyasal özellikler: Nanomalzemeler genellikle daha yüksek mekanik mukavemet, termal kararlılık ve esneklik gösterir. Bu özellikler sayesinde, karbon nanotüpler ve grafen gibi yapılar hem yapısal hem de işlevsel sensörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Kumar ve ark., 2020).

İşlevselleştirme yetenekleri: Nanomalzemelerin yüzeyleri işlevsel gruplarla kolayca kaplanabilir. Bu, sensörlerin belirli hedef molekülleri tanıyacak şekilde özelleştirilmesine olanak tanır ve böylece seçiciliği artırır.

Nanoteknolojinin sunduğu bu temel avantajlar, sensör sistemlerinin daha hızlı, daha hassas, daha güvenilir ve daha taşınabilir olmasını sağlar. Nanomühendislik çözümleri, özellikle biyosensörler, gaz sensörleri, optik sensörler ve elektrokimyasal sensörler alanlarında cihazların performans sınırlarını genişletmektedir.

Tablo 1, nanoteknolojik ölçekte ortaya çıkan temel fiziksel ve kimyasal özellikleri, sensör teknolojileri üzerindeki etkilerini, yaygın uygulamalarını ve ilgili literatür desteklerini özetlemektedir. Nanomalzemelerin sahip ol-

duğu yüksek yüzey-hacim oranı, kuantum etkileri ve elektriksel iletkenlik gibi yapısal avantajlar, tıbbi teşhis sistemlerinden çevresel izleme cihazlarına kadar birçok alanda daha hassas, seçici ve düşük enerjili sensörlerin geliştirilmesini mümkün kılmaktadır. Bu özelliklerin uygulama alanları ve bilimsel temelleri tabloda kapsamlı bir şekilde sunulmaktadır.

Tablo 1. Nanoteknolojik ölçekte ortaya çıkan temel özellikler, etkileri ve uygulama alanları

Özellik	Açıklama / Etki	Sensör Teknolojilerine Katkısı	Kullanıldığı Uygulama Alanları	Kaynaklar
Yüksek Yüzey/ Hacim Oranı	Nano boyutta malzemelerin büyük yüzey alanı, yüzey reaksiyonlarını hızlandırır.	Düşük konsantrasyonlu gaz, iyon ve biyomoleküllerin algılanmasında duyarlılığı artırır.	Çevre izleme, biyosensörler, gıda analizleri	Rai et al. (2021)
Kuantum Etkileri	Elektron davranışları değişir; optik ve elektronik özellikler özelleştirilebilir.	Floresan, foton-emisyonlu ve optik sensörlerde daha net sinyal elde edilir.	Tıbbi tanı, görüntüleme, kanser biyobelirteç analizi	Zhou et al. (2022)
Yüksek Reaktivite	Nano yüzeyler kimyasal etkileşimlere çok daha açıktır.	Düşük düzeyde kirleticileri veya toksinleri hızlı ve seçici biçimde tespit eder.	Çevresel toksin izleme, kimyasal savaş ajanı tespiti	Kumar et al. (2020)
Fonksiyonelleştirme Yeteneği	Yüzeylere fonksiyonel gruplar bağlanarak belirli moleküller seçici olarak tanınabilir.	Biyolojik özgüllüğü yüksek sensörler (örneğin antijen-antikor sensörleri) geliştirilebilir.	Tıp (biyosensörler), gıda güvenliği, veterinerlik	Bhushan (2017)
Gelişmiş Mekanik Özellikler	Yüksek dayanıklılık ve esneklik sayesinde deformasyona dirençlidir.	Esnek, dayanıklı ve uzun ömürlü sensör sistemlerinin üretimini mümkün kılar.	Giyilebilir tıbbi cihazlar, spor teknolojileri	Li et al. (2019)
Elektriksel ve Termal İletkenlik	Grafen ve karbon nanotüpler gibi yapılar üstün iletkenlik sergiler.	Daha hızlı tepki süresi, düşük enerji tüketimi ve hassas elektronik sensör üretimi sağlanır.	Akıllı tekstiller, implant sensörler, enerji depolama	Wang & Chen (2018)

2. Nanomalzemeler ve Özellikleri

Nanoteknolojinin gelişmesiyle birlikte, sensör sistemlerinin performansını artırmak için çeşitli nanomalzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzemeler, yüksek yüzey alanları, üstün iletkenlikleri, kimyasal fonk-

siyonelleştirme yetenekleri ve benzersiz optoelektronik özellikleri sayesinde sensör hassasiyetini, seçiciliğini ve hızını artırmaktadır. Bu bölüm, sensör teknolojilerinde en sık kullanılan başlıca nanomalzeme türlerine ve benzersiz yapısal/fonksiyonel özelliklerine ayrıntılı bir genel bakış sunmaktadır.

2.1. Karbon Nanotüpler (CNT'ler)

Karbon nanotüpler, karbon atomlarının altıgen bir kafes yapısı içinde silindirik olarak sarılmasıyla oluşturulan tek boyutlu nanoyapılardır. Tek katmanlı (SWCNT) veya çok katmanlı (MWCNT) formlarda bulunabilirler. Yüksek elektriksel ve termal iletkenliğe sahiptirler. Bu özellik, elektrik sinyali üretimi gerektiren sensörlerde önemli bir avantaj sağlar. Geniş yüzey alanları sayesinde gaz moleküllerini etkili bir şekilde adsorbe edebilirler.

Moleküler duyarlılık: En ufak kimyasal değişiklikleri bile tespit edebilen yüksek hassasiyete sahiptirler.

Uygulama örnekleri: NO_2 , NH_3 ve H_2 gibi gazların, biyomoleküllerin ve elektrokimyasal sensörlerin (Rai ve ark., 2021) tespitinde yaygın olarak kullanılırlar.

2.2. Grafen

Grafen, tek katmanlı petek örgüsü şeklinde düzenlenmiş iki boyutlu karbon atomlarından oluşur. 2004 yılında izole edilmesinden bu yana nanomalzeme teknolojisinin yıldızlarından biri haline gelmiştir. Yüksek mekanik mukavemet, esneklik, şeffaflık ve yüksek elektriksel iletkenlik gibi çok yönlü özellikler sunar. Moleküllerle pi-pi etkileşimleri oluşturarak gazların ve biyomoleküllerin yüzeylere adsorpsiyonunu kolaylaştırır.

Moleküler duyarlılık: NO_2 , CO ve NH_3 gibi gazların düşük konsantrasyonlarda bile tespit edilmesini sağlar.

Uygulama örnekleri: Fotodedektörlerde, biyosensörlerde ve çevresel gaz algılama sistemlerinde yaygın olarak kullanılır (Zhou ve ark., 2022).

2.3. Kuantum Noktaları (QD'ler)

Kuantum noktaları, genellikle birkaç nanometre çapında yarı iletken nanokristallerdir. Boyutlarına bağlı olarak farklı dalga boylarında ışık emebilir veya yayabilir (kuantum hapsedme etkisi). Floresan özellikleri onları optik ve görüntüleme sensörlerinde benzersiz kılar.

Moleküler duyarlılık: Işığa maruz kaldıklarında renkli sinyaller üretebilirler ve bu sinyaller analitlerin varlığını görsel olarak gösterir.

Uygulama örnekleri: Tıbbi teşhis, DNA ve protein tespiti, gıda güvenliği analizleri ve toksik madde tespitinde kullanılırlar (Kumar ve ark., 2020).

2.4. Metal Nanopartiküller (Altın, Gümüş, ZnO, TiO₂)

Metal nanopartiküller genellikle altın (Au), gümüş (Ag), çinko oksit (ZnO) ve titanyum dioksit (TiO₂) gibi metallerden veya metal oksitlerden elde edilir. Altın ve gümüş nanopartiküller, optik algılama sistemlerinde sinyalleri güçlendiren yüzey plazmon rezonans (SPR) etkileri sergiler. ZnO ve TiO₂, UV ışığına karşı özellikle hassastır ve fotokatalitik özellikleri sayesinde reaksiyon hızlarını artırır.

Moleküler duyarlılık: Bu nanopartiküller, kimyasal gazların ve biyolojik ajanların tespitinde hızlı ve seçici tepkiler sağlayabilir.

Uygulama örnekleri: Uygulamalar arasında çevre analizörleri, biyosensörler ve tıbbi görüntüleme sistemleri yer alır (Bhushan, 2017; Wang ve Chen, 2018).

Tablo 2. Başlıca nanomalzemeler, özellikleri, uygulama alanları

Nanomalzeme	Özellikler ve Yenilikler	Sensör Teknolojilerine Katkı	Kullanıldığı Uygulama Alanı	Kaynaklar
Karbon Nanotüpler (CNTs)	SWCNT’lerde tekil şiralite kontrolü ile ultra düşük konsantrasyonlarda hassas tespit yapılabilir.	Elektrokimyasal glikoz, kortizol sensörlerinde yüksek hassasiyet ve kararlılık sağlar.	Sağlık, biyosensörler, çevre izleme	(Rai, Shukla, & Paulose, 2021)
Grafen / GNRs	Bant aralığı ayarlanarak gazlara karşı duyarlılık artırıldı. CNT-grafen hibritleri performansı yükseltti.	Gaz sensörlerinde hızlı tepki ve yüksek doğruluk.	Giyilebilir elektronik, gaz sensörleri	(Zhou et al., 2022)
Kuantum Noktalar (QDs)	Floresan sinyal ile protein, DNA ve toksin tespiti yapılabilir. Optik sensörlerde renk değişimi kullanılıyor.	Işığa duyarlı sistemlerde seçici tespit.	Tıbbi tanı, optik sensörler, gıda güvenliği	(Kumar, Umar, & Kumar, 2020)
Metal Nano-parçacıklar (Au, Ag, ZnO, TiO₂)	Yüksek hassasiyetli piezoelektrik sensörler ve SPR etkisiyle optik algılama sağlanıyor.	Kimyasal gazlar ve biyolojik ajanların hızlı ve seçici algılanması.	Endüstriyel gaz algılama, biyosensörler	(Wang & Chen, 2018)
MXenes (Ti₃C₂T_x vb.)	Yüksek yanıt, plazmonik destekli tespit imkanı sunar.	Düşük eşik değerlerde biyolojik ve çevresel molekül tespiti.	Çevre izleme, tıbbi tanı, biyosensörler	(Bhushan, 2017)
Hibrit Nanoyapılar (CNT-Grafen, MOF)	Çok bileşenli gaz karışımlarının ayrımı ve tespiti kolaylaşmıştır. Sensör hassasiyeti artmıştır.	Çok parametrelili sistemlerde seçicilik ve kararlılık artırılır.	Akıllı cihazlar, çevresel ve tıbbi analiz	(Li, Wang, & Wang, 2019)

Bu tablo, klasik nanomalzemelerden karbon nanotüplere, grafen ve kuantum noktalarına, metal oksit nanopartiküllere ve yeni 2D malzemelere (MXene’ler)

ve hibrit sistemlere kadar çeşitli nanomalzemeleri özetlemektedir. Özellikle 2024-2025 yıllarında yayınlanan son araştırmalar, nanomalzemelerin sensör uygulamalarında performansı nasıl artırabileceğini açıkça göstermektedir.

Karbon nanotüplerin kiralite kontrolü yoluyla biyolojik veya hormonal analizlerde rekabetçi hassasiyet sağlama yeteneği, grafen-CNT hibrit yapılarının nem/gaz algılama performansında on kat artış, ZnO nanotelleri ile ultra hızlı basınç sensörlerinin geliştirilmesi ve biyomolekül tespiti için SERS sensörlerinde MXene'lerin gelişmiş tepkisi gibi gelişmeler, sensör teknolojisindeki nanomalzeme devrimini doğrulamaktadır.

3. Nano-Sensörlerin Tasarımı ve Üretimi

Nano sensörler, nanomalzemelerin özel yüzey teknikleriyle entegre edilmesiyle tasarlanır ve üretilir. Bu süreçler hem akademik laboratuvar düzeyinde hem de endüstriyel ölçekte uygulanabilir. Tasarım süreci, nanomalzeme seçimi, yüzey mühendisliği, fonksiyonelleştirme ve cihaz entegrasyonu gibi aşamaları içerir. Gelişmiş mikro/nanofabrikasyon teknikleri sayesinde sensörler daha küçük, daha hızlı, daha seçici ve daha uygun fiyatlı hale gelmiştir (Liu, Li, Chen ve Yuan, 2020).

3.1. Kendiliğinden Birleşme

Nanoyapılar, yüzey enerjileri ve çekim kuvvetleri sayesinde kendilerini düzenli bir şekilde hizalayarak yüzeylere kendiliğinden birleşirler. Kendiliğinden birleşen tek tabakalar (SAM'ler) veya blok kopolimer bazlı birleşmeler, hedef molekülleri bağlamak için uygun yüzeyler oluşturmak için kullanılabilir. Bu yöntem, düşük maliyetli ve yüksek hassasiyetli yüzey tasarımı olanağı sunar (Bhushan, 2017).

3.2. İnce Film Kaplama Yöntemleri

Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD), Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD), spin kaplama ve katman katman (LbL) gibi yöntemler, yüzeylere hassas nanomalzeme kaplamalarının biriktirilmesine olanak tanır. Bu teknikler, sensörün elektriksel ve kimyasal tepkisinin doğrudan kontrol edilmesini sağlar (Zhou ve ark., 2022; Liu ve ark., 2020).

3.3. Yüzey Fonksiyonelleştirme

Kimyasal veya biyolojik grupların sensör yüzeyine bağlanması, analite spesifik bağlanma sağlar. Örneğin, hedef molekül seçiciliği, antikolarlar, enzimler veya aptamerlerle fonksiyonelleştirilmiş yüzeyler kullanılarak artırılır. SAM tabanlı yüzey fonksiyonelleştirme, hem biyosensörlerde hem de gaz sensörlerinde yaygın bir uygulamadır (Bhushan, 2017; Kumar, Umar ve Kumar, 2020).

3.4. Mikroakışkan Sistem Entegrasyonu

Mikroakışkan çip teknolojileri, sıvı numunelerin sensör yüzeyine kontrollü bir şekilde iletilmesini sağlar. Bu yapı, düşük hacimli biyolojik numunelerin hızlı analizine olanak tanır. Mikroakışkan yapılar, giyilebilir biyosensör platformları için de tercih edilmektedir (Wang ve Chen, 2018; Liu ve ark., 2020).

Bu gelişmiş üretim yöntemleri sayesinde nanosensörler taşınabilir, tek kullanımlık ve düşük maliyetli hale gelmekte, tespit limitleri nanomolar ve hatta pikomolar seviyelere ulaşmaktadır (Zhou ve ark., 2022).

Aşağıdaki tabloda üretim tekniklerinin neler olduğu, nasıl çalıştıkları ve hangi sensör özelliklerini iyileştirdikleri özetlenmiştir.

Tablo 3. Nano-Sensör üretim yöntemleri ve literatür destekli özellikleri

Üretim Yöntemi	İşlev / Açıklama	Geliştirilen Sensör Özellikleri	Kaynaklar
Self-Assembly (SAM, BCP)	Nanomalzemelerin yüzeylerde düzenli dizilim oluşturmaktır. Yüzey enerjileri ile yapı kendiliğinden oluşur.	Yüksek seçicilik, homojen yüzey düzeni, düşük maliyetli üretim	(Bhushan, 2017)
İnce Film Kaplama (CVD, PVD, Spin Coating)	Nanomalzeme yüzey üzerine buhar fazı ya da sıvı faz kaplama ile uygulanır.	Yüksek iletkenlik, ince film stabilitesi, geniş yüzey alanı	(Liu et al., 2020; Zhou et al., 2022)
Fonksiyonelleştirme	Yüzeye antikor, aptamer gibi gruplar bağlanarak hedef seçicilik kazandırılır.	Düşük tespit limiti, hedef analite özgü yanıt	(Kumar, Umar, & Kumar, 2020)
Microfluidik Entegrasyon	Mikrohacimli sıvılar çip sistemleriyle sensöre yönlendirilir.	Hızlı analiz, küçük örnek hacmi, giyilebilir uygulama	(Liu et al., 2020; Wang & Chen, 2018)

4. Tıbbi, Kimyasal ve Biyolojik Sensörlerde Nanoteknoloji

Nanoteknoloji, tıbbi tanıdan çevre analizine kadar birçok alanda kullanılan sensör teknolojilerini önemli ölçüde geliştirmektedir. Nano-ölçekte mühendislik ile daha hassas, seçici ve hızlı sensör sistemleri tasarlanabilir hale gelmiştir.

4.1. Tıbbi Uygulamalar

Tıbbi nanosensörler, hastalıkların erken teşhisinde ve hasta takibinde yüksek doğruluk ve duyarlılık sağlar. Örneğin, **kardiyak troponin T** ve **CRP (C-reaktif protein)** gibi biyobelirteçler için geliştirilen elektro-kimyasal aptasensörler, düşük plen seviyelerinde bile yüksek seçicilikle tespit yapabilir

(Huang et al., 2022; JavaScript review, 2023). Ayrıca, antikor kaplı grafen-zif yapılar veya MOF bazlı yüzeylerle dolaşımdaki tümör hücreleri (CTC) tespiti mümkündür. Diğer taraftan, enzim kaplı CNT ya da grafen elektrotları kullanılarak glikoz izleme sistemleri non-invaziv ve taşınabilir çözümler sunmaktadır (JavaScript review, 2023; Wang & Chen, 2018).

4.2. Kimyasal ve Çevresel Sensörler

Nano-ölçekli gaz sensörleri, CO, NO₂, H₂S gibi kirleticileri ultradüşük konsantrasyonlarda bile algılayabilir (Kumar et al., 2023; Panigrahi, 2024). Örneğin, rGO/TiO₂ nanokompozitler NO₂'ye karşı oda sıcaklığında yüksek duyarlılık sunar (Ling et al., 2024). Ayrıca, MOF veya COF tabanlı yapıların doğa-fer hâmin gaz ve iyonları seçici şekilde adsorplayabilmesi, çevresel monitoring sistemlerinde yeni bir çığır açmaktadır (Sohrabi et al., 2023). pH ve ağır metal sensörleri gibi elektrokimyasal platformlar ise su kalitesini izlemek için zinc-förn ve graphene-CNT bazlı yapılarla geliştirilmiştir (Parameswari et al., 2024).

4.3. Tarım ve Gıda Uygulamaları

Tarım sensörleri, nanoteknoloji sayesinde pestisit, gübre bileşenleri ve toprak nemi gibi parametreleri hassas şekilde izleyebilir. CNT- ve QD-tabanlı sensörler topraktaki ağır metaller (Pb, Cd, Hg) ve pestisit kalıntılarını izleyerek gıda güvenliğini desteklemektedir (Parameswari et al., 2024). Ayrıca, tarımsal alanlarda soil-nanosensörlerle su ve besin ölçümleri gerçek zamanlı yapılabilir.

Nanoteknoloji, malzeme biliminin sınırlarını zorlayarak birçok alanda daha hassas, seçici ve taşınabilir sensör sistemlerinin geliştirilmesini mümkün kılmıştır. Bu çalışma, tıbbi teşhisten çevresel izlemeye kadar çeşitli alanlarda kullanılan nanoteknolojik sensör türlerini, bu sensörlerin sağladığı temel avantajları ve ilgili literatür kaynaklarını özetlemektedir.

Aşağıdaki tablo, elektrokimyasal aptasensörlerden MOF (metal-organik yapı) ve COF (kovalent-organik yapı) tabanlı sistemlere kadar geniş bir yelpazede değerlendirilmiş nanoteknolojik sensörleri içermektedir. Sensörlerin seçicilik, düşük tespit limitleri, taşınabilirlik ve gerçek zamanlı analiz gibi avantajları, uygulama alanlarına bağlı olarak vurgulanmaktadır.

Uygulama Alanı	Nano-Sensör Türleri	Özellik ve Avantajlar	Kaynaklar
Tıbbi / Biyobelirteç	Elektro-kimyasal aptasensörler (troponin, CRP), antikor-kaplı yüzeyler	Yüksek seçicilik, düşük tespit limiti, hızlı yanıt	(Huang et al., 2022; Wang & Chen, 2018)
Kanser Tespiti (CTC)	MOF-grafen-antikor yapılandırılmaları	Dolaşımdaki tümör hücrelerinin özgül algılanması	(Smith et al., 2023)

Glikoz İzleme	CNT/grafen-elektrotlar	Non-invaziv, taşınabilir, glikoz düzeylerinde sürekli izleme	(Wang & Chen, 2018)
Gaz Sensörleri	rGO/TiO ₂ , SWCNT-PEI, MoS ₂ /QD hibritleri	NO ₂ , CO, H ₂ S gibi gazların sub-ppb düzeyinde hassas algılanması	(Panigrahi, 2024; Ling et al., 2024)
Çevresel İzleme	MOF/COF bazlı gaz sensörleri	Nem, iyon ve toksinlerin seçici tespiti	(Sohrabi et al., 2023)
Toprak Analizi	CNT, QD, metal oksit bazlı sensörler	Ağır metal ve pestisit kontaminasyonunun izlenmesi	(Parameswari et al., 2024)

5. Giyilebilir ve Taşınabilir Nano-Sensör Sistemleri

Nanoteknolojideki son gelişmeler, esnek, hafif, biyouyumlu ve düşük güç tüketimli malzemelerin geliştirilmesini mümkün kılmıştır. Bu malzemeler, sensörlerin insan vücuduyla (cilt, gözler, mukoza zarları) veya günlük nesnelerle (giysiler, bileklikler, kontakt lensler vb.) doğrudan temas eden yüzeylere entegre edilmesini sağlar. Giyilebilir ve taşınabilir nano sensör sistemleri, gerçek zamanlı sağlık izleme, hastalık teşhisi ve performans izleme dahil olmak üzere birçok alanda devrim yaratmaktadır (Ray ve ark., 2019; Kim ve ark., 2019).

5.1. Örnek Uygulamalar ve Teknolojik Yaklaşımlar

Ter Bazlı Glikoz Sensörleri: Karbon nanotüpler (CNT'ler), grafen oksit ve enzim kaplı elektrotlar kullanılarak geliştirilen bu sensörler, terdeki glikoz seviyelerini ölçerek diyabet hastalarının iğnesiz, sürekli glikoz takibi yapmalarını sağlar. Sonuçlar mobil cihazlara kablosuz olarak iletilebilir (Lee ve ark., 2018; Bandođkar ve ark., 2019).

Kalp Atış Hızı ve Solunum Monitörleri: Esnek piezoelektrik malzemelerden tasarlanmış sensörler, elektrokardiyografi (EKG) ve solunum hızı gibi parametreleri izlemek için gömleklere veya iç çamaşırlarına entegre edilebilir. Aritmilerin veya uyku apnesi gibi durumların erken teşhisinde kullanılabilirler (Trung ve Lee, 2016).

Elektrodermal Aktivite (EDA) Sensörleri: Bu sistemler, cildin elektriksel iletkenliğini ölçer ve stres, kaygı ve uyarılmayı analiz eder. Giyilebilir bir formatta (örneğin bileklik) mevcuttur ve ruh sağlığı takibi için kullanılırlar (Xu ve ark., 2021).

Kontakt Lens Tabanlı Gözyaşı Analizörleri: Gözyaşı içeriğinde glikoz, laktat, elektrolitler veya belirli biyobelirteçleri tespit edebilen nanosensörlerle donatılmış akıllı kontakt lensler; Hem göz sağlığı hem de sistemik hastalıkların takibinde kullanılabilir. Google ve Samsung gibi şirketler bu alanda çeşitli prototipler geliştirmiştir (Kim vd., 2019).

5.2. Uygulama Alanları ve Avantajları:

Kişiselleştirilmiş Tıp: Bireyin biyolojik verilerine dayalı sağlık çözümleri sunarak erken müdahale sağlar (Ray vd., 2019).

Spor ve Performans Takibi: Sporculara hidrasyon seviyesi, kas yorgunluğu ve kalp atış hızı gibi verilerin izlenmesiyle performans optimizasyonu sağlanır (Trung ve Lee, 2016).

Yaşlı Bakımı ve Kronik Hasta Takibi: Hareket kabiliyeti kısıtlı bireylerde sağlık verilerinin uzaktan izlenmesini sağlayarak acil durumlara hızlı müdahale sağlar (Xu vd., 2021).

Tele Sağlık ve Uzaktan İzleme Sistemleri: Giyilebilir sensörler, hastaneye gitmeye gerek kalmadan hasta verilerinin sürekli izlenmesini sağladığı için sağlık sistemlerinde maliyet ve zaman tasarrufu sağlar (Kim vd., 2019; Bandodkar vd., 2019).

6. Karşılaşılan Zorluklar ve Gelecek Perspektifi

6.1. Karşılaşılan Temel Zorluklar

Nanoteknolojik sensörlerin hızla gelişen yapısı, birçok avantaj sunmakla birlikte çeşitli teknik, biyolojik ve ekonomik zorlukları da beraberinde getirmektedir:

- **Uzun Vadeli Stabilité ve Dayanıklılık:** Birçok nanomalzeme (örneğin, grafen oksit, kuantum noktalar, metal nanoparçacıklar), çevresel etkenler (nem, sıcaklık, UV ışıınımı vb.) nedeniyle zamanla okside olabilir veya bozunabilir. Bu durum sensör performansında kayıplara, yanlış pozitif/negatif sonuçlara veya veri tutarsızlığına yol açabilir. Özellikle biyolojik ortamlarda uzun süreli güvenilirlik hâlâ büyük bir araştırma konusudur (Ray et al., 2019).

- **Üretim Maliyetleri ve Ölçeklenebilirlik:** Nanomalzeme temelli sensörlerin çoğu, hâlen laboratuvar ortamlarında hassas kontrollü süreçlerle üretilmektedir. Bu üretim yöntemlerinin endüstriyel ölçekte tekrarlanması, yüksek maliyet, düşük verim ve karmaşık proses kontrolü gibi sorunlar yaratmaktadır. Özellikle çok katmanlı yapılar ve hibrit sensör sistemleri için süreçler hâlâ optimize edilme aşamasındadır (Trung & Lee, 2016).

- **Biyouyumluluk, Toksisite ve Etik Endişeler:** Nano boyuttaki yapıların biyolojik sistemlerle etkileşimi, immün yanıt, hücre hasarı veya toksik birikim gibi olumsuz sonuçlara yol açabilir. Vücuda entegre edilen ya da deri ile sürekli temas eden sistemlerin, uzun vadede güvenliğini sağlamak için toksikolojik değerlendirmelerin kapsamlı şekilde yapılması gerekmektedir. Ayrıca kullanıcı mahremiyeti ve biyoveri güvenliği gibi etik boyutlar da önem kazanmaktadır (Kim et al., 2019).

6.2. Gelecek Perspektifi ve Araştırma Yönelimleri

Giyilebilir ve nano-ölçekli sensör sistemlerinin geleceği, yalnızca donanım iyileştirmeleriyle değil; aynı zamanda yapay zekâ, enerji yönetimi ve çok işlevlilik gibi alanlardaki ilerlemelerle şekillenecektir:

- **Yapay Zekâ (YZ) ve Makine Öğrenmesi ile Entegrasyon:** Toplanan büyük hacimli biyosensör verilerinin manuel yorumlanması mümkün değildir. Bu nedenle yapay zekâ tabanlı algoritmalar ile veri madenciliği, desen tanıma ve anomali tespiti giderek yaygınlaşacaktır. Özellikle derin öğrenme (deep learning) sistemleri, bireyselleştirilmiş sağlık uyarıları ve teşhis önerileri sağlayabilir (Xu et al., 2021).

- **Enerji Hasadı ve Kendi Kendine Güç Sağlayan Sistemler:** Triboelektrik, piezoelektrik ve termoelektrik jeneratörler kullanılarak, sensörlerin dış enerji kaynağına ihtiyaç duymadan çalışması mümkün hâle gelecektir. Bu gelişme, giyilebilir sistemlerin daha küçük, hafif ve bakım gerektirmeyen hâle gelmesine olanak tanıyacaktır (Bandodkar et al., 2019).

- **Çoklu Parametre Algılayan Platformlar (Multimodal Sensing):** Tek bir sensör cihazının aynı anda birden fazla biyokimyasal ve fiziksel parametreyi (örneğin, pH, sıcaklık, glikoz, elektrolit düzeyi) izleyebilmesi hedeflenmektedir. Bu tür sistemler, özellikle klinik dışı ortamlarda kapsamlı sağlık takibi için kritik önem taşımaktadır. Nanoyapıların yüzey modifikasyon yetenekleri sayesinde bu tür hibrit sistemlerin tasarımı mümkün hâle gelmektedir (Lee et al., 2018).

6.3. Genel Değerlendirme ve Vizyon

Gelecekte nano-sensör teknolojilerinin; sağlık, güvenlik, çevresel izleme, gıda güvenliği ve hatta kişisel bakım gibi kritik alanlarda temel araçlardan biri hâline gelmesi beklenmektedir. Bu teknolojilerin yaygınlaşması sayesinde:

- Hastalıkların daha erken teşhisi,
- Daha düşük maliyetli ve erişilebilir tanı sistemleri,
- Gerçek zamanlı ve uzaktan çevresel toksin takibi,
- Bireye özgü tedavi algoritmaları geliştirilmesi mümkün olacaktır.

Ayrıca, sürdürülebilirlik odaklı malzeme geliştirme çalışmaları, bu sistemlerin ekolojik ayak izini azaltarak hem çevresel hem de ekonomik anlamda daha verimli bir gelecek yaratacaktır.

SONUÇ ve TARTIŞMA

Nanoteknoloji, sensör biliminde devrim niteliğinde yenilikler sunarak, geleneksel teknolojilerin sınırlarını aşan çözümler sunmuştur. Nanomalze-

melerin yüksek yüzey alanı, kimyasal kararlılık ve elektriksel iletkenlik gibi üstün fizikokimyasal özellikleri, sensörlerin hassasiyetini ve seçiciliğini artırmanın yanı sıra daha küçük, daha hafif ve daha taşınabilir cihazların geliştirilmesini de mümkün kılmıştır. Bu gelişmeler, özellikle tıbbi teşhis, çevresel izleme ve gıda güvenliği gibi kritik alanlarda önemli ilerlemelere yol açmıştır.

Sensör teknolojilerinde nanoteknolojik yaklaşımların benimsenmesi, erken hastalık teşhisi, kronik hastalıkların sürekli izlenmesi ve çevresel toksinlerin hassas bir şekilde tespit edilmesinde yüksek performans göstermektedir. Ancak, uzun vadeli kararlılık, üretim maliyetleri ve biyouyumluluk gibi zorluklar, yaygın kullanımı ve ticari uygulamaları sınırlandıran önemli faktörler olmaya devam etmektedir.

Geleceğe bakıldığında, nanosensör sistemlerinin yapay zeka ile entegrasyonu, otomatik ve hassas veri analizini mümkün kılarken, enerji hasadı teknolojileri bu sistemlerin bağımsız, sürdürülebilir ve sürekli çalışmasını sağlayacaktır. Ayrıca, çok parametrelili ölçüm yapabilen hibrit sensör platformları, kullanıcılara daha kapsamlı ve güvenilir sağlık ve çevre verileri sağlayacaktır.

Bu bağlamda, nanoteknoloji destekli sensörlerin geliştirilmesi yalnızca teknolojik değil, aynı zamanda disiplinlerarası çalışmalar da gerektirmektedir. Malzeme bilimi, biyoteknoloji, elektronik, yapay zekâ ve etik alanlarındaki koordineli çalışmalar, teknolojinin teknik engellerini aşarken kullanıcı güvenliğini ve gizliliğini de sağlayacaktır.

Sonuç olarak, nanosensör teknolojileri, sağlık, çevre ve yaşam kalitesi için gelecekteki standartları belirleyecek kritik araçlar olarak öne çıkmaktadır. Araştırma ve geliştirme faaliyetlerine verilen önem arttıkça, bu teknolojilerin toplum genelinde erişilebilirliği ve yaygın kullanımı da hızlanacaktır.

KAYNAKLAR

- Li, Z., Wang, Y., & Wang, J. (2019). Recent advances in nanomaterials for wearable biosensors. *Materials Today Bio*, 2, 100017. <https://doi.org/10.1016/j.mt-bio.2019.100017>
- Kumar, R., Umar, A., & Kumar, G. (2020). *Nanomaterials for biosensors: Fundamentals and applications*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818902-9.00001-7>
- Rai, P., Shukla, A., & Paulose, R. (2021). A review on nanomaterial-based gas sensors for environmental monitoring. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 339, 129906. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.129906>
- Wang, J., & Chen, G. (2018). Wearable biosensors for real-time detection of biomolecules. *ACS Sensors*, 3(5), 806–817. <https://doi.org/10.1021/acssensors.8b00135>
- Zhou, L., Zhao, Y., Zhang, H., & Zhang, Y. (2022). Nanotechnology in wearable biosensors: A review. *Biosensors and Bioelectronics*, 206, 114145. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2022.114145>
- Bhushan, B. (2017). *Springer handbook of nanotechnology* (4th ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-54357-3>
- Li, Z., Wang, Y., & Wang, J. (2019). *Materials Today Bio*, 2, 100017. <https://doi.org/10.1016/j.mt-bio.2019.100017>
- Liu, Y., Li, X., Chen, J., & Yuan, C. (2020). Micro/nano electrode array sensors: Advances in fabrication and emerging applications in bioanalysis. *Frontiers in Chemistry*, 8, 573865. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.573865>
- Huang, X., Liu, Y., Yao, D., & Wang, J. (2022). Advances in nano-biosensors for cardiovascular biomarker detection. *Biosensors and Bioelectronics*, 214, 114528. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2022.114528>
- Smith, J., Nguyen, L. & Patel, R. (2023). *Advances in nanotechnology for non-invasive disease diagnostics*. *Nature Nanotechnology*, 18(4), 345–352. <https://doi.org/10.1038/s41565-023-01473-9>
- Kumar, P., Singh, S., & Rani, R. (2023). Recent developments in gas sensing using nanomaterials: A review. *ACS Omega*, 8(12), 10975–10995. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c06533>
- Panigrahi, S. (2024). Ultra-sensitive gas sensors based on MoS₂-QD hybrids: A review. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 9, 100213. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2024.100213>
- Ling, Z., Xie, J., & Tang, J. (2024). High-performance NO₂ sensors based on rGO/TiO₂ nanocomposites at room temperature. *Nanomaterials*, 14(22), 1844. <https://www.mdpi.com/2079-4991/14/22/1844>
- Sohrabi, H., Shafiei, F., & Zare, M. (2023). Metal-organic frameworks (MOFs) for chemical sensing: Recent advances and future perspectives. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 386, 133614. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2023.133614>

- Parameswari, R., Balakrishnan, G., & Ravichandran, S. (2024). Nanotechnology-based sensors for real-time monitoring and assessment of soil health and quality: A review. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 23, 100815. <https://www.researchgate.net/publication/379811471>
- Lee, H., Hong, Y. J., Baik, S., Hyeon, T., & Kim, D. H. (2018). Enzyme-based glucose sensor: From invasive to wearable device. *Advanced Healthcare Materials*, 7(8), 1701150. <https://doi.org/10.1002/adhm.201701150>
- Bandodkar, A. J., Jeang, W. J., Ghaffari, R., & Rogers, J. A. (2019). Wearable sensors for biochemical sweat analysis. *Annual Review of Analytical Chemistry*, 12(1), 1–22. <https://doi.org/10.1146/annurev-anchem-061318-114910>
- Trung, T. Q., & Lee, N. E. (2016). Flexible and stretchable physical sensor integrated platforms for wearable human-activity monitoring and personal healthcare. *Advanced Materials*, 28(22), 4338–4372. <https://doi.org/10.1002/adma.201504244>
- Xu, S., Jayaraman, A., & Rogers, J. A. (2021). Skin sensors are the future of health monitoring. *Nature*, 571(7765), 319–320. <https://doi.org/10.1038/d41586-021-02152-9>
- Kim, J., Campbell, A. S., de Ávila, B. E. F., & Wang, J. (2019). Wearable biosensors for healthcare monitoring. *Nature Biotechnology*, 37(4), 389–406. <https://doi.org/10.1038/s41587-019-0045-y>
- Ray, T. R., Choi, J., Bandodkar, A. J., Krishnan, S., Gutruf, P., Tian, L., ... & Rogers, J. A. (2019). Bio-integrated wearable systems: A comprehensive review. *Chemical Reviews*, 119(8), 5461–5533. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00573>



FOTOVOLTAİK SİSTEMLERDE KULLANILAN DA–DA DÖNÜŞTÜRÜCÜ TOPOLOJİLERİ

“ ”

Mehmet Can SEKANLI¹

Okan BİNGÖL²

¹ Arş. Gör., Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, ORCID: 0009-0009-9043-3582

² Prof. Dr., Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, ORCID: 0000-0001-9817-7266

1. Giriş

Yenilenebilir enerji sistemleri arasında en yaygın ve sürdürülebilir kaynaklardan biri olan fotovoltaiik (PV) sistemler, günümüzde enerji üretiminde giderek daha fazla yer edinmektedir. Güneş ışığının doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülmesini sağlayan PV sistemleri, çevre dostu yapısı, düşük işletme maliyeti ve uzun ömürlü performansları sayesinde hem bireysel hem de endüstriyel ölçekte tercih edilmektedir. Ancak, bu sistemlerden elde edilen elektrik enerjisinin doğrudan kullanımı çoğu zaman mümkün değildir. Bunun temel nedeni, PV modüllerinin çıkış gerilimi ve akımının, ışınlım şiddeti, ortam sıcaklığı ve yük koşullarına bağlı olarak sürekli değişmesidir. Bu değişken yapı, PV sistemin kararlılığını ve enerji verimliliğini olumsuz etkileyebilmektedir.

PV panellerden elde edilen doğru akım (DA) geriliminin farklı sistem bileşenlerine uygun seviyeye dönüştürülmesi için doğru akım – doğru akım (DA–DA) dönüştürücüler kullanılmaktadır. Bu dönüştürücüler, PV kaynak ile yük veya evirici arasındaki enerji akışını düzenleyerek sistem performansını optimize eder. Özellikle maksimum güç noktası izleme (MPPT) yöntemlerinin uygulanmasında, dönüştürücülerin görevi, panelin her an maksimum gücü üretmesini sağlayacak çalışma noktasını belirlemektir. Bu sayede, panel verimliliği önemli ölçüde artırılırken enerji kayıpları minimize edilir.

PV sistemlerde kullanılan DA–DA dönüştürücü topolojileri, genel olarak izolesiz ve izoleli olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılır. İzolesiz yapılar (Azaltan, Yükselten, Azaltan – Yükselten, Çuk ve SEPIC) genellikle düşük ve orta güçlü uygulamalarda tercih edilirken, izoleli yapılar (Flyback, Forward, Push–Pull, Yarım Köprü, Tam Köprü ve Çift Aktif Köprü – DAB) yüksek güçlü ve güvenlik gereksinimi olan sistemlerde kullanılır. İzolesiz dönüştürücüler, yüksek verimlilik ve basit tasarım avantajı sunarken, izoleli yapılar elektriksel güvenlik ve topraklama farklarına karşı koruma sağlar.

Günümüzde PV sistemlerin giderek daha karmaşık hâle gelmesi, enerji depolama birimleri ve akıllı şebeke bağlantılarıyla entegre çalışmayı zorunlu kılmıştır. Bu bağlamda, DA–DA dönüştürücüler yalnızca gerilim dönüştürme işlevi görmekle kalmamakta, aynı zamanda çift yönlü enerji

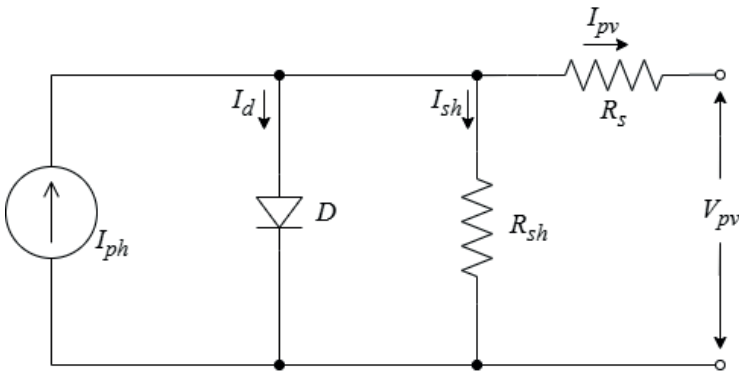
akışı, güç faktörü iyileştirme ve yük yönetimi gibi ileri düzey görevleri de yerine getirmektedir. Özellikle çift yönlü DAB dönüştürücüler, PV sistemleri ile batarya enerji depolama sistemleri (BESS) arasında yüksek verimli enerji transferi sağlayarak hibrit enerji yapılarında önemli bir rol üstlenmektedir.

2. PV Hücre Modeli

PV hücrelerin elektriksel karakteristiklerini doğru bir şekilde modellemek, sistem performansını analiz etmek ve MPPT gibi işlemleri gerçekleştirmek açısından oldukça önemlidir. PV modüllerinin modellenmesinde genellikle tek diyotlu, iki diyotlu ve üç diyotlu modeller kullanılmaktadır (Bader vd., 2020; Kumar vd., 2023; Ali vd., 2022). En yaygın kullanılan yapı ise tek diyotlu modeldir. Bu model, bir diyot, bir seri direnç (R_s) ve bir şönt dirençten (R_{sh}) oluşur. Basitliği ve yeterli doğruluğu sayesinde performans analizlerinde tercih edilmektedir.

2.1. Tek diyotlu PV modeli

Tek diyotlu model, PV hücresinin elektriksel davranışını açıklamak için kullanılan temel bir eşdeğer devre modelidir. Modelin eşdeğer devresi Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Tek diyotlu PV hücre modeli

Bu modelde; fotoakım (I_{ph}), diyot akımı (I_d), şönt akımı (I_{sh}) ve modül çıkış akımı (I_{pv}) olmak üzere dört temel akım bileşeni bulunur. Bu bileşenler arasındaki ilişki, Kirchhoff Akım Kanunu'na göre Denklem (1)'de verildiği gibi ifade edilir:

$$I_{ph} - I_d - I_{sh} - I_{pv} = 0 \quad (1)$$

PV modülündeki şönt akımı (I_{sh}), modülün çıkış gerilimi (V_{pv}), çıkış akımı (I_{pv}), seri direnç (R_s) ve şönt direnç (R_{sh}) arasındaki ilişkiyle Denklem (2)'de gösterildiği gibi hesaplanır:

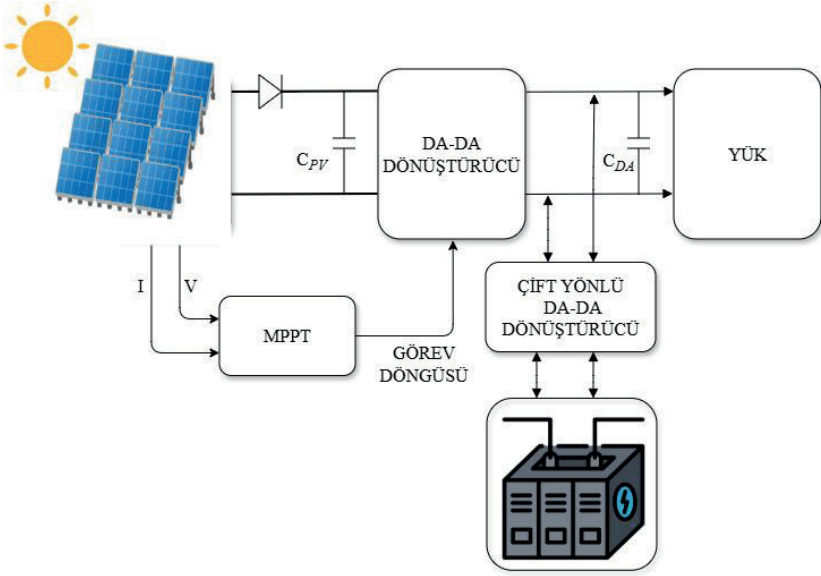
$$I_{sh} = \frac{V_{pv} + I_{pv} \times R_s}{R_{sh}} \quad (2)$$

PV hücresinin ürettiği fotoakım (I_{ph}), güneş ışınımı (G) ve sıcaklık (T) değişimlerine bağlı olarak Denklem (3) ile ifade edilir:

$$I_{ph} = I_{sc} + K_i \times (T - 298) \times \left(\frac{G}{1000} \right) \quad (3)$$

2.2. PV Sistemlerde DA – DA dönüştürücüler

Fotovoltaik sistemlerin enerji yönetiminde, güneş panelinden elde edilen doğru akım enerjisinin uygun gerilim seviyesine dönüştürülmesi ve depolanması kritik bir öneme sahiptir. Şekil 2'de, PV panel, MPPT birimi, DA–DA dönüştürücü, çift yönlü DA–DA dönüştürücü ve yükten oluşan entegre sistemin genel blok diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 2. Batarya depolamalı PV sistem yapısı

PV panel, güneş ışınımı ve sıcaklığa bağlı olarak değişken bir doğru akım gerilimi ve akımı üretir. Bu çıkış, PV terminal kapasitörü (C_{pv}) üzerinden filtrelenerek DA-DA dönüştürücüye iletilir. Dönüştürücü, MPPT algoritması tarafından belirlenen görev döngüsü (D) sinyali ile kontrol edilerek panelin maksimum güç noktasında çalışması sağlanır. MPPT birimi, panel çıkış akımı (I) ve gerilimini (V) sürekli olarak izleyerek güç bilgisini hesaplar ve dönüştürücü anahtarlama oranını bu bilgiye göre ayarlar.

DA-DA dönüştürücüden elde edilen düzenlenmiş doğru akım, DA barası üzerinden yük devresine aktarılır. Aynı DA bara, sistemin enerji sürekliliğini sağlamak amacıyla çift yönlü DA-DA dönüştürücü aracılığıyla bir enerji depolama sistemi ile de bağlantılıdır. Bu yapı, enerji akışını iki yönlü yönetme yeteneğine sahiptir.

Güneş ışınımının yüksek olduğu durumlarda, PV panelden fazla üretilen enerji depolama birimine aktarılır (şarj modu). Güneş ışınımının azaldığı veya enerji talebinin arttığı durumlarda ise depolama sistemi devreye girerek yükü besler (deşarj modu). Bu sayede sistem, hem sürekli güç akışı sağlar hem de enerji kullanım verimliliğini artırır. DA tarafındaki C_{DA}

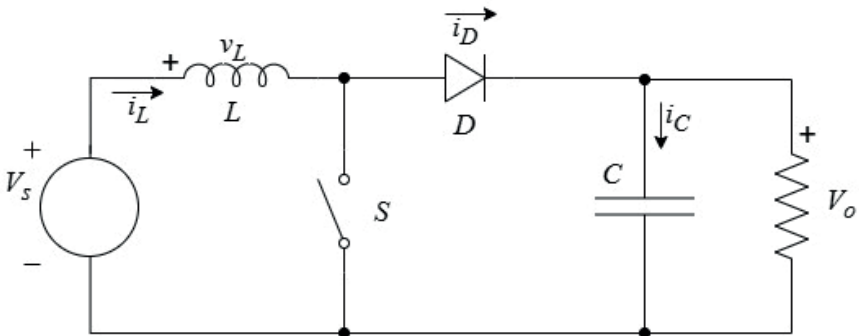
kapasitörü, yük dalgalanmalarını dengeleyerek kararlı bir çıkış gerilimi elde edilmesine katkı sağlar.

İzolesiz DA-DA dönüştürücüler

İzolesiz DA-DA dönüştürücüler, giriş ve çıkış arasında doğrudan elektriksel bağlantı bulunan güç elektroniği devreleridir. Basit yapıları, yüksek verimlilikleri ve düşük maliyetleri nedeniyle PV sistem uygulamalarında kullanılan dönüştürücülerdir. Anahtarlama güç elektroniği devrelerinde indüktör, kapasitör ve yarı iletken anahtarlama elemanları kullanılarak enerji dönüşümü sağlanır. Çalışma prensipleri gereği, giriş gerilimi ile çıkış gerilimi arasında doğrudan bağlantı bulunur; bu özellik, izoleli yapılara göre topraklama düzenlemeleri açısından önemli tasarım sınırlamaları getirmektedir (Mumtaz vd., 2021; Azizi, 2023). Bu nedenle, topraklama farklılıkları ve yüksek gerilim seviyeleri açısından dikkatli tasarlanmalıdır.

2.1. Yükseltici dönüştürücü

Yükseltici dönüştürücü, giriş gerilimini belirli bir oranda artırarak çıkışta daha yüksek bir gerilim elde edilmesini sağlayan izolesiz tek yönlü DA-DA dönüştürücüsüdür. Şekil 3'te yükseltici dönüştürücünün devre yapısı verilmiştir.

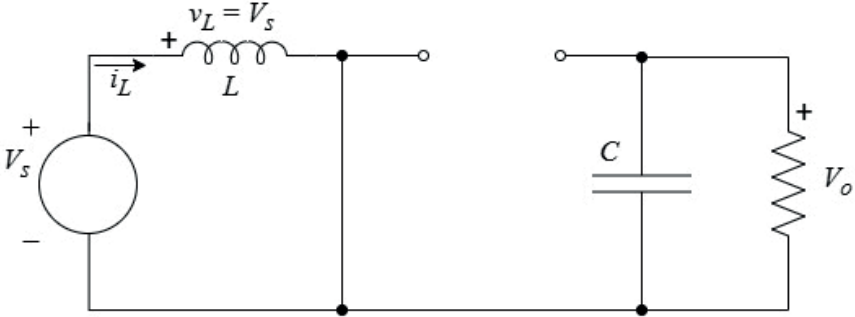


Şekil 3. Yükseltici dönüştürücü devre yapısı

Yükseltici dönüştürücünün çalışma prensibi iki aşamada incelenebilir:

1. Anahtar iletimdeyken (Anahtar Kapalıyken):

Anahtar kapalı olduğunda, diyot iletimde değildir ve bobin giriş geriliminden enerji depolar. Anahtar kapalı olduğunda devrenin çalışma prensibi Şekil 'te verilmiştir.



Şekil 4. Anahtar iletim durumunda iken devre yapısı

Bu süreçte diyot üzerinden akım geçmeyeceği için Kirşof'un gerilim kanunu Denklem (4)'te gösterildiği gibi kaynak ve bobin üzerinde uygulanır.

$$V_s = V_L = L \frac{di_L}{dt} \quad \text{veya} \quad \frac{di_L}{dt} = \frac{V_s}{L} \quad (4)$$

Akım değişim miktarı sabittir ve bobin akımı doğrusal olarak artar. Bobin akımındaki değişim Denklem (5)'teki gibi ifade edilir:

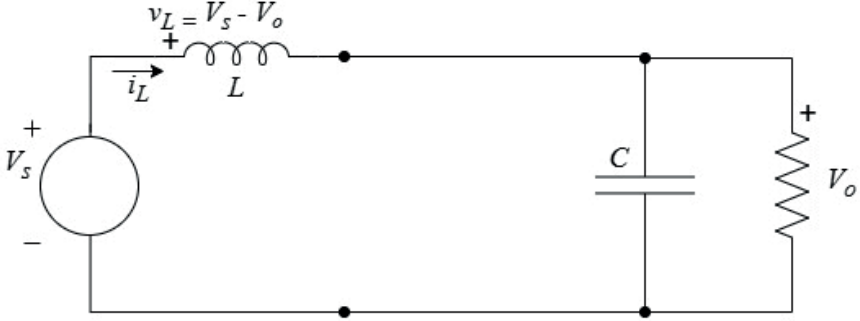
$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_s}{L} \quad (5)$$

Δi_L , anahtarın kapalı olduğu durum için hesaplanırsa; $(\Delta i_L)_{closed} = \frac{V_s DT}{L}$ bağıntısı elde edilir.

Burada, Δi_L Bobin akımındaki değişimi, V_s Giriş gerilimini, D Görev döngüsünü, T Anahtarlama periyodunu ve L Bobin endüktansını ifade etmektedir.

2. Anahtar kesimdeyken (Anahtar Açıkken):

Anahtar açıldığında, bobin akımı ani olarak sıfıra düşemez ve bu nedenle diyot iletme girerek bobinde biriken enerjiyi yük devresine aktarır. Anahtar açık olduğunda devrenin çalışma prensibi Şekil 'te verilmiştir.



Şekil 5. Anahtar kesim durumunda iken devre yapısı

Çıkış gerilimini V_o olarak kabul edersek, bobin üzerindeki gerilim Denklem (6)'da verildiği gibi ifade edilir:

$$V_L = V_s - V_o = L \frac{di_L}{dt} \quad \text{veya} \quad \frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L} \quad (6)$$

Bu aşamada bobin akımı doğrusal olarak azalır ve değişim miktarı Denklem (7)'de verildiği gibi hesaplanır:

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = \frac{V_s - V_o}{L} \quad (7)$$

Buradan Δi_L çekilirse, Denklem (8) elde edilir.

$$(\Delta i_L)_{open} = \frac{(V_s - V_o) * (1-D) * T}{L} \quad (8)$$

Kararlı durum koşulu gereği, bobin akımındaki net değişim sıfır olmalıdır. Dolayısıyla yukarıda verilen denklemler kullanıldığında Denklem (9) - (12) elde edilmektedir (Hart, 2011).

$$(\Delta i_L)_{closed} + (\Delta i_L)_{open} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{V_S D T}{L} + \frac{(V_S - V_o) * (1 - D) * T}{L} = 0 \quad (10)$$

$$V_S(D + 1 - D) - V_o(1 - D) = 0 \quad (11)$$

$$V_o = \frac{V_S}{1 - D} \quad (12)$$

Yükseltici dönüştürücünün avantajları;

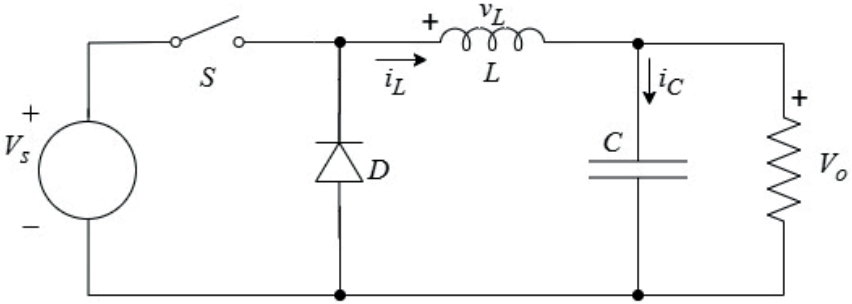
- Giriş gerilimini artırarak daha yüksek çıkış gerilimi elde edilmesini sağlar.
- Göreceli olarak basit bir yapıya sahiptir ve kolay kontrol edilir.
- Yüksek verimlilik sunarak enerji kayıplarını minimize eder.

Yükseltici dönüştürücünün dezavantajları;

- Çıkış gerilimi, anahtarlama elemanlarının maksimum gerilim sınırlarına bağlıdır.
- Yüksek çıkış gerilimleri, anahtarlama elemanlarında gerilim zorlanmalarına neden olur.
- Anahtarlama sırasında oluşan kayıplar ve elektromanyetik girişimler, devre tasarımında dikkat edilmesi gereken faktörlerdir.

2.2. Azaltıcı dönüştürücü

Azaltıcı dönüştürücü, giriş gerilimini belirli bir oranda düşürerek çıkışta daha düşük bir gerilim elde edilmesini sağlayan izolesiz tek yönlü DA-DA dönüştürücüsüdür (Erickson & Maksimović, 2001). Şekil 'da azaltıcı dönüştürücünün devre yapısı verilmiştir.



Şekil 6. Azaltıcı dönüştürücü devre yapısı

Azaltıcı dönüştürücüde, anahtar kapandığında bobin enerji depolar ve çıkışa güç sağlar. Anahtar açıldığında ise bobinde biriken enerji diyot üzerinden yük devresine aktarılır. Çıkış gerilimi, giriş gerilimi ve görev döngüsü arasındaki ilişki Denklem (13)'te verilmiştir.

$$V_o = DV_g \quad (13)$$

Burada, V_o çıkış gerilimini, V_g giriş gerilimini ve D görev döngüsünü belirtmektedir.

Azaltıcı dönüştürücünün avantajları;

- Yüksek verimli çalışarak enerji kayıplarını minimize eder.
- Basit tasarımı sayesinde düşük maliyetlidir.

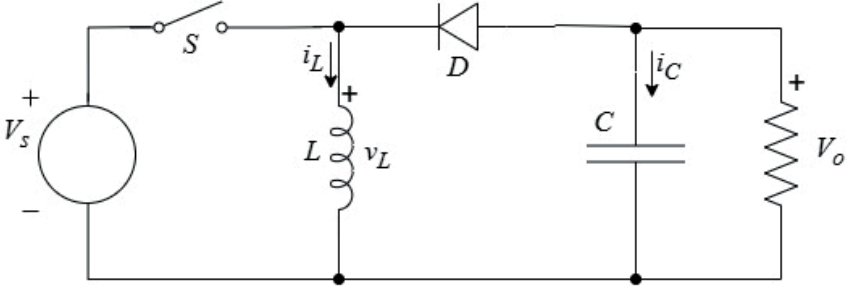
Azaltıcı dönüştürücünün dezavantajları;

- Çıkış gerilimi doğrudan giriş gerilimine bağlıdır ve yalnızca azaltılır.
- Anahtarlama işlemi nedeniyle elektromanyetik girişim oluşturur.

2.3. Azaltan - yükselten dönüştürücü

Azaltan-yükselten dönüştürücü, giriş gerilimini hem artırabilen hem de azaltabilen izolesiz tek yönlü DA-DA dönüştürücüsüdür. Bu yapı, değişken giriş gerilimine sahip sistemlerde sabit çıkış gerilimi elde etmek amacıyla kullanılır (Mohan vd., 2003; Keskin & Alışkan, 2019). Bununla birlikte, devrenin çalışma prensibi gereği çıkış gerilimi, giriş gerilimine göre ters

polaritede olmaktadır (All About Circuits, 2023). Şekil 7’de azaltan-yükselten dönüştürücünün devre yapısı verilmiştir.



Şekil 7. Azaltan - yükselten dönüştürücü devre yapısı

Bu dönüştürücü, yükseltici ve azaltıcı yapıların birleşimi olarak çalışır. Anahtar kapalıyken bobin enerji depolar, anahtar açıldığında ise bobinde biriken enerji yük devresine aktarılır. Çıkış gerilimi, giriş gerilimi ve görev döngüsü arasındaki ilişki Denklem (14)’te verilmiştir.

$$V_o = -V_g \left(\frac{D}{1-D} \right) \quad (14)$$

Burada, V_o çıkış gerilimini, V_g giriş gerilimini ve D görev döngüsünü belirtmektedir.

Azaltan-yükselten dönüştürücünün avantajları;

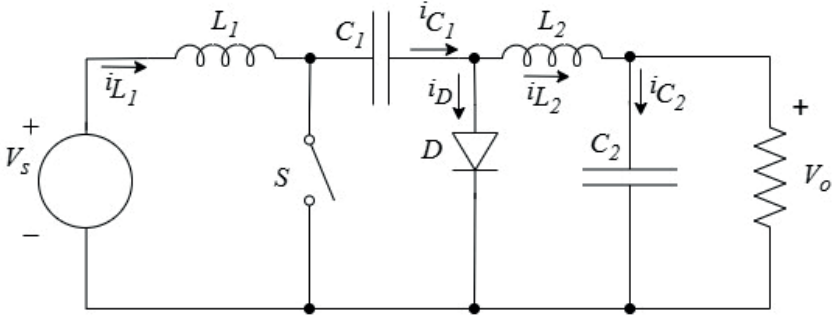
- Geniş giriş gerilim aralığında çalışır.
- Hem artırma hem de azaltma işlevi görür.
- Tek bir yapı ile farklı gerilim seviyeleri elde edilir.

Azaltan-yükselten dönüştürücünün dezavantajları;

- Daha karmaşık bir kontrol yapısına sahiptir.
- Çıkış geriliminin ters polaritede olması bazı uygulamalarda ek devre elemanları gerektirir.

2.4. Cuk dönüştürücü

Çuk (Çuk)dönüştürücü, giriş gerilimini hem artırabilen hem de azaltabilen izolesiz tek yönlü DA-DA dönüştürücüsüdür. Diğer DA-DA dönüştürücülerden farklı olarak, giriş ve çıkış arasındaki enerji transferi bir kapasitör üzerinden sağlanır. Bu sayede, giriş ve çıkış akımları daha düşük dalgalanmaya sahip olur (Chen vd., 2022; Mahafzah vd., 2023). Şekil ’de Çuk dönüştürücünün devre yapısı verilmiştir.



Şekil 8. Cuk dönüştürücü devre yapısı

Çuk dönüştürücünün çalışma prensibi iki aşamadan oluşmaktadır. Anahtar kapandığında, endüktör giriş kaynağından enerji depolarken, kapasitör yük devresine enerji sağlar. Anahtar açıldığında ise endüktörde depolanan enerji kapasitör üzerinden yük devresine aktarılır. Bu çalışma prensibi sayesinde çıkış gerilimi, giriş gerilimine göre ters polaritededir. Çıkış gerilimi, giriş gerilimi ve görev döngüsü arasındaki ilişki Denklem 15'te verilmiştir:

$$V_o = -V_g \left(\frac{D}{1-D} \right) \quad (15)$$

Burada, V_o çıkış gerilimini, V_g giriş gerilimini ve D görev döngüsünü belirtmektedir.

Çuk dönüştürücünün avantajları;

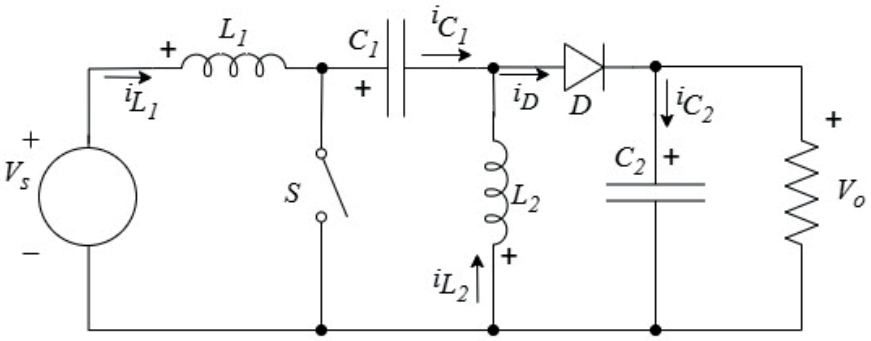
- Çıkış akımı düşük dalgalanmaya sahiptir, bu da daha stabil bir güç kaynağı sağlar.
- Geniş giriş gerilim aralığında çalışır.
- Hem artırma hem de azaltma işlevi görür.
- Enerji transferi kapasitör üzerinden sağlandığı için yüksek verimli çalışır.

Çuk dönüştürücünün dezavantajları:

- Devre elemanlarının sayısı arttığı için tasarımı daha karmaşıktır.
- Kapasitör ve endüktör boyutları büyük olabilir, bu da fiziksel yerleşimi zorlaştırır.
- Çıkış geriliminin ters polaritede olması bazı uygulamalarda ek devre elemanları gerektirir.

2.5. SEPIC dönüştürücü

SEPIC (Single-Ended Primary Inductor Converter) dönüştürücü, giriş gerilimini hem artırabilen hem de azaltabilen izolesiz bir DA-DA dönüştürücüdür. Çuk dönüştürücüye benzer şekilde, enerji transferi bir kapasitör aracılığıyla gerçekleştirilir. Ancak SEPIC dönüştürücüsünün en önemli avantajlarından biri, çıkış geriliminin giriş gerilimi ile aynı polaritede olmasıdır. Bu özellik, özellikle kararlı ve pozitif çıkış gerilimi gerektiren uygulamalarda büyük avantaj sağlar (Hu vd., 2012s). Şekil 'da SEPIC dönüştürücünün devre yapısı verilmiştir.



Şekil 9. SEPIC dönüştürücü devre yapısı

SEPIC dönüştürücüsünün çalışma prensibi iki ana aşamadan oluşur. Anahtar kapandığında, giriş kaynağına bağlı endüktör enerji depolar ve kuplaj kapasitörü üzerinden ikinci endüktöre enerji aktarılır. Anahtar açıldığında ise endüktörlerde depolanan enerji yük devresine aktarılır. Çıkış gerilimi, giriş gerilimi ve görev döngüsü arasındaki ilişki Denklem (16)'da verilmiştir:

$$V_o = V_g \left(\frac{D}{1-D} \right) \quad (16)$$

Burada, V_o çıkış gerilimini, V_g giriş gerilimini ve D görev döngüsünü belirtmektedir.

SEPIC dönüştürücünün avantajları:

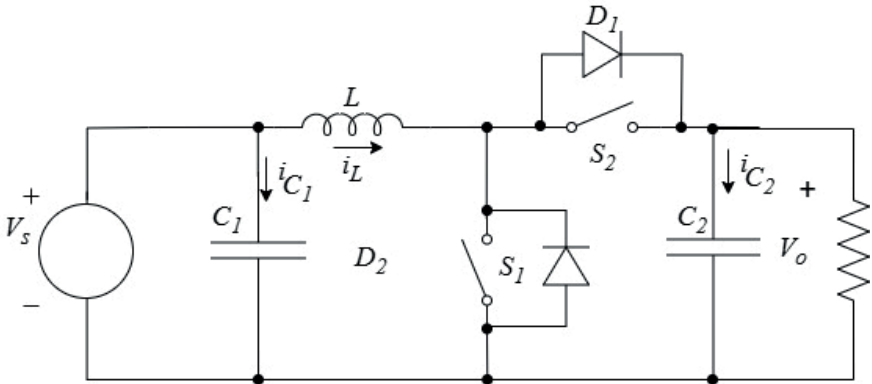
- Çıkış gerilimi giriş gerilimi ile aynı polaritededir.
- Geniş giriş gerilim aralığında çalışır.
- Hem artırma hem de azaltma işlevi görür.
- Çıkış geriliminin kararlı olması, batarya destekli sistemlerde tercih edilmesini sağlar.

SEPIC dönüştürücünün dezavantajları:

- Çuk dönüştürücüye göre daha fazla devre elemanı içerdiği için karmaşıktır.
- Verimi, kullanılan bileşenlerin kalitesine bağlı olarak değişir.
- Kuplaj kapasitörü nedeniyle yüksek frekansta daha fazla kayıp oluşur.

2.6. Çift yönlü azaltan - yükselten dönüştürücü

Çift yönlü azaltan - yükselten dönüştürücü, giriş gerilimini hem artırabilen hem de azaltabilen, çift yönlü enerji akışına sahip DA-DA dönüştürücüdür. Bu dönüştürücü, hem enerji kaynağından yük devresine hem de yükten enerji kaynağına güç transferini mümkün kılmaktadır (Wang vd., 2022; Ravi vd., 2018). Şekil 'da çift yönlü azaltan - yükselten dönüştürücünün devre yapısı verilmiştir.



Şekil 10. Çift yönlü azaltan - yükselten dönüştürücü devre yapısı

Çift yönlü azaltan - yükselten dönüştürücünün çalışma prensibi iki farklı modda incelenmektedir. Azaltan modda, dönüştürücü giriş gerilimini düşürerek çıkışa iletir. Bu durumda anahtar kapandığında, endüktör enerji depolar ve yük, depolanan enerji ile beslenir. Anahtar açıldığında ise endüktörde depolanan enerji, çıkış kapasitörü ve yük üzerinden deşarj olur. Yükselten modda ise giriş gerilimi artırılarak çıkışa iletilir. Anahtar kapandığında endüktör enerji depolar, anahtar açıldığında ise endüktörde biriken enerji çıkış kapasitörü ve yüke aktarılır. Çıkış gerilimi, giriş gerilimi ve görev döngüsü arasındaki ilişki Denklem (17) ve Denklem (18)'de verilmiştir:

$$V_o = \frac{V_g}{1-D} \quad (\text{Yükselten mod}) \quad (17)$$

$$V_o = DV_g \quad (\text{Azaltan mod}) \quad (18)$$

Burada, V_o çıkış gerilimini, V_g giriş gerilimini ve D görev döngüsünü belirtmektedir.

Çift yönlü azaltan - yükselten dönüştürücünün avantajları:

- Çift yönlü enerji akışı sağlayarak enerji geri kazanımına olanak tanır.
- Geniş giriş gerilim aralığında çalışır.
- Batarya ve süper kapasitör uygulamalarında yüksek verimlilik sunar.
- Hem yükseltici hem de düşürücü modda çalışır.

Çift yönlü azaltan - yükselten dönüştürücünün dezavantajları:

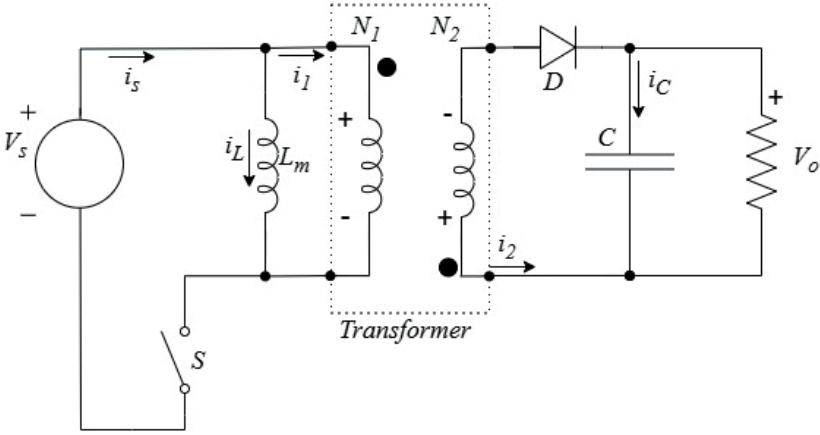
- Kontrol ve sürme devreleri daha karmaşıktır.
- Güç anahtarlarının sayısı arttığından devre tasarımı daha zordur.
- Yüksek akımlı uygulamalarda endüktör boyutları büyük olur, bu da fiziksel yerleşimi zorlaştırır.

3. İzoleli DA-DA dönüştürücüler

İzoleli DA-DA (DC-DC) dönüştürücüler, giriş ve çıkış devreleri arasında doğrudan elektriksel bağlantı olmaksızın galvanik izolasyon sağlayan güç elektroniği devreleridir. Bu tür dönüştürücülerde izolasyon genellikle yüksek frekanslı bir transformatör aracılığıyla gerçekleştirilir; böylece hem gerilim seviyesinin dönüştürülmesi sağlanır hem de giriş ile çıkış arasında doğrudan akım yolu kesilmiş olur (Alhurayyis vd., 2020). İzolasyon, özellikle güvenlik gereksinimleri, toprak döngülerinin kırılması ve farklı potansiyel seviyelerine sahip sistemlerin arasında enerji transferi gibi uygulamalarda kritik avantajlar sunar. Bu yapı sayesinde hassas devreler giriş tarafındaki gerilim dalgalanmalarından korunur, elektromanyetik girişimler azaltılabilir ve sistemler arasında farklı topraklama seviyeleriyle enerji aktarımı mümkündür (Coelho vd., 2025).

3.1. Flyback dönüştürücü

Flyback dönüştürücü, giriş gerilimini artırabilen veya azaltabilen, izolasyonlu bir DA-DA dönüştürücüdür. Temel olarak bir azaltan-yükselten dönüştürücü ile benzer prensipte çalışır ancak enerji transferi, bir transformatör kullanılarak gerçekleştirilir. Bu özellik, yüksek izolasyon gerektiren uygulamalarda Flyback dönüştürücüyü avantajlı hale getirir (Alam vd., 2024). Şekil 'de Flyback dönüştürücünün devre yapısı verilmiştir.



Şekil 11. Flyback dönüştürücü devre yapısı

Flyback dönüştürücüsünün çalışma prensibi iki ana aşamadan oluşur. Anahtar kapandığında, transformatörün primer sargısında enerji depolanır. Anahtar açıldığında ise transformatör sekonder sargısında indüklenen enerji diyot aracılığıyla yük devresine aktarılır. Çıkış gerilimi, transformatörün sarım oranına ve görev döngüsüne bağlı olarak belirlenir. Çıkış gerilimi, giriş gerilimi, sarım sayıları ve görev döngüsü arasındaki ilişki Denklem (19)'da verilmiştir:

$$V_o = V_g \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \left(\frac{D}{1-D} \right) \quad (19)$$

Burada, V_o çıkış gerilimini, V_g giriş gerilimini, N_p primer sarım sayısını, N_s sekonder sarım sayısını ve D görev döngüsünü belirtmektedir.

Burada, çıkış gerilimini, giriş gerilimini, transformatör sarım oranını ve görev döngüsünü belirtmektedir.

Flyback dönüştürücünün avantajları:

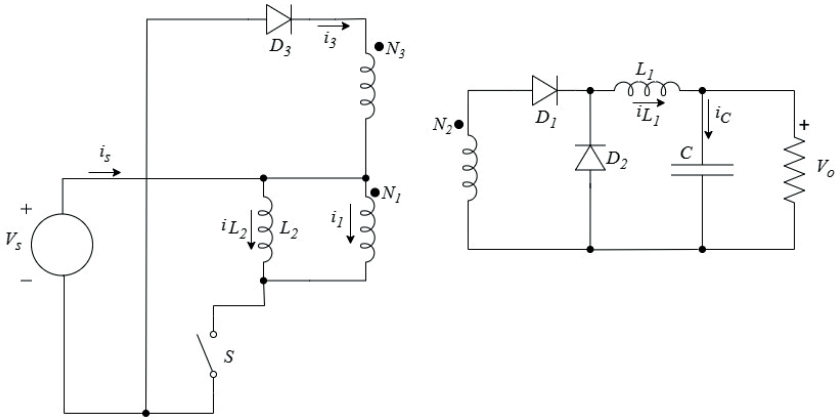
- Giriş ve çıkış arasında izolasyon sağlar.
- Geniş giriş gerilim aralığında çalışır.
- Tek bir transformatör ile çoklu çıkış gerilimleri elde edilir.
- Göreceli olarak az sayıda bileşen gerektirdiği için uygun maliyetlidir.

Flyback dönüştürücünün dezavantajları:

- Yüksek çıkış gücünde düşük verim ve yüksek elektromanyetik girişim sorunları yaşanır.
- Transformatör boyutu ve tasarımı kritik olup, dikkatli bir optimizasyon gerektirir.

3.2. Forward dönüştürücü

Forward dönüştürücü, giriş gerilimini artırabilen veya azaltabilen, izolasyonlu bir DA-DA dönüştürücüdür. Flyback dönüştürücüye benzer şekilde bir transformatör kullanarak enerji transferini sağlar, ancak Flyback'ten farklı olarak primer sargısında depolanan enerjiyi anında sekonder sargıya aktarır. Bu sayede daha yüksek verim ve düşük elektromanyetik girişim seviyeleri elde edilir (Coelho vd., 2025; Ramya ve Umadevi, 2025). Şekil 'de Forward dönüştürücünün devre yapısı verilmiştir.



Şekil 12. Forward dönüştürücü devre yapısı

Forward dönüştürücünün çalışma prensibi iki ana aşamadan oluşur. Anahtar kapandığında, giriş kaynağından gelen enerji transformatör primer sargısına uygulanır ve transformatör sekonder sargısında eşzamanlı

olarak çıkış gerilimi indüklenir. Anahtar açıldığında, manyetik alanın sıfırlanmasını sağlamak için bir manyetik sıfırlama devresi kullanılır. Çıkış gerilimi, transformatörün sarım oranına ve görev döngüsüne bağlı olarak belirlenir. Çıkış gerilimi, giriş gerilimi, sarım sayıları ve görev döngüsü arasındaki ilişki Denklem (20)'de verilmiştir:

$$V_o = V_g \left(\frac{N_s}{N_p} \right) D \quad (20)$$

Burada, V_o çıkış gerilimini, V_g giriş gerilimini, N_p primer sarım sayısını, N_s sekonder sarım sayısını ve D görev döngüsünü belirtmektedir.

Forward dönüştürücünün avantajları:

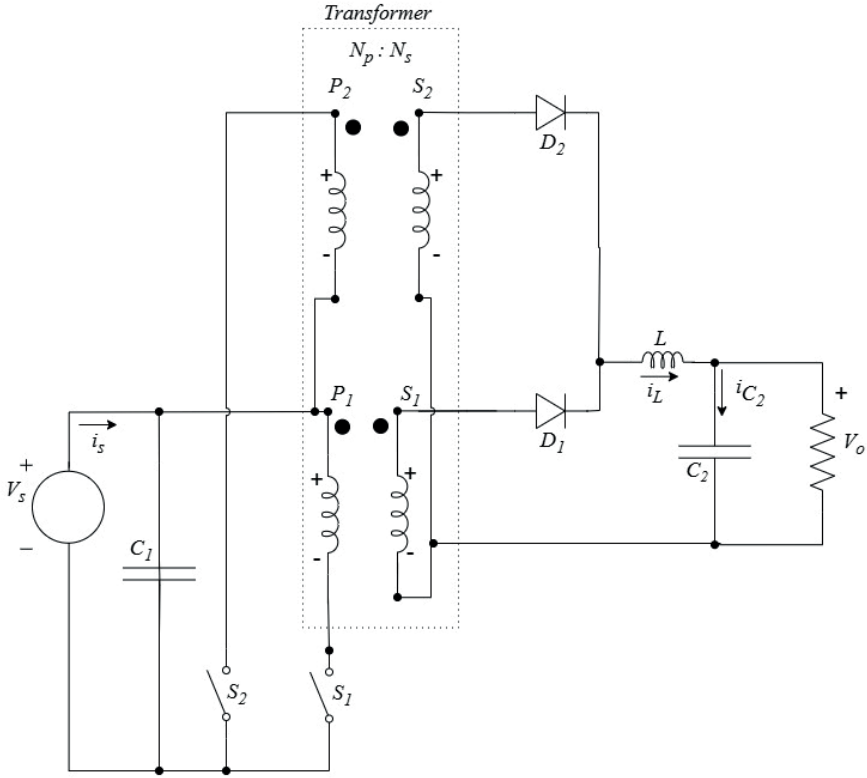
- Giriş ve çıkış arasında izolasyon sağlar.
- Flyback dönüştürücülere kıyasla daha yüksek verime sahiptir.
- Daha düşük elektromanyetik girişim üretir.
- Çıkış dalgalanması daha düşük olduğundan daha stabil bir çıkış gerilimi sağlar.

Forward dönüştürücünün dezavantajları:

- Manyetik sıfırlama gerektirir, bu da ek devre elemanları gerektirir.
- Transformatör boyutları büyük olur.
- Yüksek güç uygulamalarında karmaşık kontrol devreleri gerektirir.

3.3. Push-Pull dönüştürücü

Push-Pull dönüştürücü, giriş gerilimini artırabilen veya azaltabilen, izolasyonlu bir DA-DA dönüştürücüdür. İki anahtar ve bir transformatör kullanarak simetrik bir yapı oluşturur. Bu yapı sayesinde, transformatör primer sargısı iki yönde çalıştırılarak manyetik çekirdeğin daha verimli kullanılması sağlanır (Raghavendra vd., 2019; Vivas vd., 2023). Şekil 'te Push-Pull dönüştürücünün devre yapısı verilmiştir.



Şekil 13. Push - Pull dönüştürücü devre yapısı

Push-Pull dönüştürücünün çalışma prensibi, iki anahtarın sırayla iletme geçmesiyle transformatörün primer sargısında alternatif olarak manyetik alan oluşturulmasına dayanır. Her bir anahtar iletme geçtiğinde, primer sargının belirli bir kısmı enerjilenir ve sekonder sargıda eşzamanlı olarak çıkış gerilimi indüklenir. Bu sayede, transformatör çekirdeğinin manyetik doyuma ulaşması önlenir ve verimli bir enerji dönüşümü sağlanır. Çıkış gerilimi, giriş gerilimi, sarım sayıları ve görev döngüsü arasındaki ilişki Denklem (21)'de verilmiştir:

$$V_o = 2 V_g \left(\frac{N_s}{N_p} \right) D \quad (21)$$

Burada, V_o çıkış gerilimini, V_g giriş gerilimini, N_p primer sarım sayısını, N_s sekonder sarım sayısını ve D görev döngüsünü belirtmektedir.

Push-Pull dönüştürücünün avantajları:

- Giriş ve çıkış arasında izolasyon sağlar.

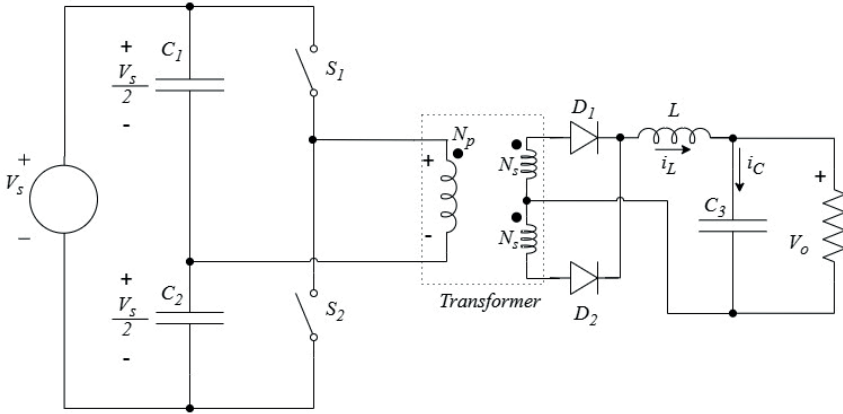
- Manyetik çekirdeğin daha verimli kullanılmasıyla yüksek verim sunar.
- Çift yönlü anahtarlama sayesinde simetrik çalışma sağlar.
- Yüksek güçlü uygulamalara uygundur.

Push-Pull dönüştürücünün dezavantajları:

- İki anahtar gerektirdiği için sürücü devresi daha karmaşıktır.
- Transformatör tasarımı dikkatli yapılmazsa manyetik doyuma ulaşır.
- Anahtarların senkronizasyonu kritik olup, dengesiz çalışma verimi düşürür.

3.4. Yarım köprü dönüştürücü

Yarım köprü dönüştürücü, giriş gerilimini artırabilen veya azaltabilen, izolasyonlu bir DA-DA dönüştürücüdür. İki anahtarlama elemanı ve bir transformatör kullanarak çalışır. Tam köprü dönüştürücüye kıyasla daha az anahtarlama elemanı içerdiğinden, özellikle orta güç seviyesindeki uygulamalarda tercih edilir (Hassan vd., 2025). Şekil 'te yarım köprü dönüştürücünün devre yapısı verilmiştir.



Şekil 14. Yarım köprü dönüştürücü devre yapısı

Yarım köprü dönüştürücünün çalışma prensibi, iki anahtarın dönüşümlü olarak iletme geçmesiyle transformatör primer sargısına alternatif gerilim uygulanmasına dayanır. Anahtarların biri kapandığında, giriş geriliminin yarısı primer sargıya uygulanır ve transformatör sekonder sargısında çıkış gerilimi indüklenir. Diğer anahtar kapandığında ise aynı işlem ters yönde

gerçekleşir. Çıkış gerilimi, giriş gerilimi, sarım sayıları ve görev döngüsü arasındaki ilişki Denklem (22)'de verilmiştir:

$$V_o = V_g \left(\frac{N_s}{N_p} \right) D \quad (22)$$

Burada, V_o çıkış gerilimini, V_g giriş gerilimini, N_p primer sarım sayısını, N_s sekonder sarım sayısını ve D görev döngüsünü belirtmektedir.

Yarım köprü dönüştürücünün avantajları:

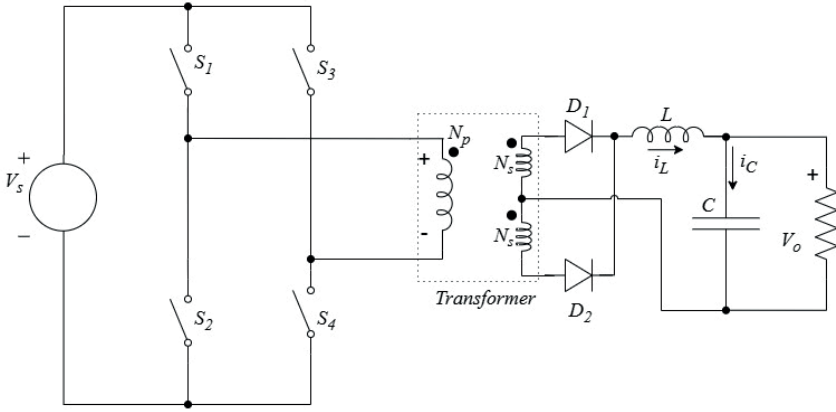
- Giriş ve çıkış arasında izolasyon sağlar.
- Push-Pull ve tam köprü dönüştürücülere kıyasla daha az anahtar gerektirir.
- Orta güç uygulamalarında yüksek verimli bir çözüm sunar.
- Daha az anahtarlama kaybı ve elektromanyetik girişim üretir.

Yarım köprü dönüştürücünün dezavantajları:

- Tam köprü dönüştürücülere kıyasla daha düşük güç kapasitesine sahiptir.
- Çıkış dalgalanması yüksek olabilir, ek filtreleme gerektirir.
- Anahtarlama elemanlarının senkronizasyonu kritik olup, kontrol devresi dikkatli tasarlanmalıdır.

3.5. Tam köprü dönüştürücü

Tam köprü dönüştürücü, giriş gerilimini artırabilen veya azaltabilen, izolasyonlu bir DA-DA dönüştürücüdür. Dört anahtar elemanı ve bir transformatör kullanarak çalışır. Yarım köprü dönüştürücüye kıyasla daha yüksek verim sunar ve özellikle yüksek güçlü uygulamalarda tercih edilir (Wang vd., 2025). Şekil 'te tam köprü dönüştürücünün devre yapısı verilmiştir.



Şekil 15. Tam köprü dönüştürücü devre yapısı

Tam köprü dönüştürücünün çalışma prensibi, karşılıklı çalışan iki anahtar çiftinin dönüşümlü olarak iletme geçmesiyle transformatör primer sargısına alternatif gerilim uygulanmasına dayanır. Anahtarların senkronize çalışmasıyla primer sargıda tam bir gerilim uygulanır ve sekonder sargıda çıkış gerilimi indüklenir. Çıkış gerilimi, giriş gerilimi, sarım sayıları ve görev döngüsü arasındaki ilişki Denklem (23)'te verilmiştir:

$$V_o = V_g \left(\frac{N_s}{N_p} \right) D \quad (23)$$

Burada, V_o çıkış gerilimini, V_g giriş gerilimini, N_p primer sarım sayısını, N_s sekonder sarım sayısını ve D görev döngüsünü belirtmektedir.

Tam köprü dönüştürücünün avantajları:

- Giriş ve çıkış arasında izolasyon sağlar.
- Yüksek güçlü uygulamalara uygundur.
- Daha yüksek verim sunar.
- Transformatörün manyetik çekirdeği daha verimli kullanılır.

Tam köprü dönüştürücünün dezavantajları:

- Daha fazla anahtarlama elemanı içerdiği için karmaşıktır.
- Anahtarların senkronizasyonu kritik olup, dikkatli bir kontrol devresi gerektirir.
- Yüksek frekansta daha fazla anahtarlama kaybı yaşanır.

DAB dönüştürücünün avantajları:

- Yüksek frekanslı anahtarlama ile kompakt ve hafif transformatör kullanımı sağlar.
- Faz kaydırma kontrolü ile geniş giriş-çıkış gerilim aralığında verimli çalışır.
- Çift yönlü enerji akışı sayesinde batarya şarj ve enerji geri kazanım uygulamalarında yüksek verim sunar.
- Yüksek güçlü uygulamalarda düşük kayıplı çalışma sağlar.
- Modüler yapısı sayesinde farklı güç seviyelerine ölçeklendirilir.

DAB dönüştürücünün dezavantajları:

- Faz kaydırmalı PWM kontrolü, hassas bir kontrol algoritması gerektirir.
- Yüksek frekanslı çalıştığı için anahtarlama kayıpları yüksektir ve elektromanyetik girişim oluşturur.
- Yüksek güçlü uygulamalarda soğutma ve termal yönetim gerektirir.
- Transformatör tasarımı, optimum performans için dikkatli şekilde yapılmalıdır.

4.Sonuç

PV sistemlerde kullanılan DA-DA dönüştürücü topolojileri, sistemin genel performansını, enerji verimliliğini ve güvenliğini doğrudan etkileyen temel bileşenlerdir. Uygun dönüştürücü seçimi, yalnızca gerilim dönüşümünü sağlamakla kalmaz; aynı zamanda MPPT, batarya enerji yönetimi, evirici beslemesi ve şebeke bağlantısında kararlı çalışma koşullarının elde edilmesine olanak tanır.

İzolesiz dönüştürücüler yapısal olarak daha basit, maliyet açısından avantajlı ve yüksek verimliliğe sahip olmaları nedeniyle düşük ve orta güçlü PV sistemlerinde yaygın olarak tercih edilir. Bu yapılar, özellikle PV panelin çıkış geriliminin değişken olduğu durumlarda MPPT algoritmalarıyla birlikte etkin bir enerji aktarımı sağlar.

İzoleli topolojiler ise güvenlik, galvanik izolasyon ve çift yönlü güç akışı gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır. Yüksek güçlü PV-batarya hibrit sistemlerinde DAB dönüştürücüler, hem şarj hem de deşarj aşamalarında yüksek verimlilik ve esnek kontrol imkânı sunar.

Genel olarak, PV sistemlerde dönüştürücü seçimi; güç kapasitesi, gerilim düzeyi, izolasyon gereksinimi ve maliyet gibi kriterler göz önünde bulundurularak yapılmalıdır. Günümüzde SiC ve GaN tabanlı yarı iletkenlerin kullanımıyla birlikte bu dönüştürücülerin verimlilikleri daha da artmakta ve PV sistemlerde daha kompakt, yüksek frekanslı yapılar geliştirilmektedir. PV uygulamalarında yaygın DA–DA dönüştürücü topolojileri ve karakteristikleri Tablo 1’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 1. PV sistemlerde kullanılan DA–DA dönüştürücü topolojilerinin karşılaştırması

Dönüştürücü Tipi	İzolasyon Durumu	Avantajları	Dezavantajları
Yükselten	İzolesiz	Basit yapı, yüksek verim, düşük maliyet	Giriş akımı dalgalı, EMI eğilimli
Azaltan	İzolesiz	Düşük gürültü, kararlı çıkış	Yalnızca gerilim düşürür
Azaltan-Yükselten	İzolesiz	Geniş çalışma aralığı	Ters polarite, karmaşık kontrol
Çuk	İzolesiz	Düşük giriş/çıkış akım dalgalanması	Fazla eleman, karmaşık tasarım
SEPIC	İzolesiz	Pozitif çıkış, gerilim artırma/azaltma	Düşük güç yoğunluğu
Flyback	İzoleli	Basit izolasyon, düşük maliyet	Düşük verim, yüksek gerilim stresi
Forward	İzoleli	Daha yüksek verim, kolay kontrol	Ek dengeleme sargısı gerektirir
Push–Pull	İzoleli	Yüksek güç yoğunluğu	Transformatör dengesizliği riski
Half-Bridge	İzoleli	Yüksek verim, düşük dalgalanma	Karmaşık sürücü devresi
Full-Bridge	İzoleli	Yüksek verim, düşük dalgalanma	Karmaşık sürücü devresi
DAB	İzoleli	Çift yönlü güç akışı, yüksek verim, galvanik izolasyon	Gelişmiş kontrol algoritması gerektirir

Bu bağlamda, PV sistemlerin geleceğinde DA–DA dönüştürücülerin yalnızca enerji dönüştürme elemanları değil, aynı zamanda akıllı enerji yönetim sistemlerinin aktif bir parçası hâline gelmesi beklenmektedir.

KAYNAKÇA

- Alam, M. A., Minai, A. F., & Bakhsh, F. I. (2024). Isolated bidirectional DC-DC converter: A topological review. *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 8, 100594.
- Alhurayyis, I., Elkhateb, A., & Morrow, J. (2020). Isolated and nonisolated DC-to-DC converters for medium-voltage DC networks: A review. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 9(6), 7486–7500.
- Ali, I., Kumar, S., & Siddiqui, A. S. (2022). Performance analysis of different solar models based on the solar cell parameters. *Indian Journal of Pure & Applied Physics (IJPAP)*, 59(3), 263-270.
- Azizi, M. (2023). Grounding and isolation requirements in DC microgrids. *Energies*, 16(23), 7747.
- Bader, S., Ma, X., & Oelmann, B. (2020). A comparison of one-and two-diode model parameters at indoor illumination levels. *IEEE Access*, 8, 172057-172064.
- Bu, S., Alhosaini, W., Khan, D., & Ahmed, E. M. (2024). Advancing dual-active-bridge DC–DC converters with a new control strategy based on a double integral super twisting sliding mode control. *World Electric Vehicle Journal*, 15(8), 348.
- Chen, H., Lin, W. M., Liu, W. R., & He, W. (2022). Tapped-inductor bi-directional Cuk converter with high step-up/down conversion ratio and its optimum design. *Scientific Reports*, 12(1), 13745.
- Coelho, S., Monteiro, V., & Afonso, J. L. (2025). Topological advances in isolated DC–DC converters: High-efficiency design for renewable energy integration. *Sustainability*, 17(6), 2336.
- Erickson, R. W., & Maksimovic, D. (2007). *Fundamentals of power electronics*. Springer Science & Business Media.
- Hart, D. W. (2011). *Power electronics* (Vol. 166). McGraw-Hill.
- Hassan, I., Sayed, K., Alanazi, M. D., Ziedan, H. A., & Abdelsattar, M. (2025). A comprehensive review of power converter topologies and control

- techniques for welding power supply applications. *Discover Applied Sciences*, 7(9), 1036.
- He, J., Chen, Y., Lin, J., Chen, J., Cheng, L., & Wang, Y. (2023). Review of modeling, modulation, and control strategies for the dual-active-bridge DC/DC converter. *Energies*, 16(18), 6646.
- Hu, J., Sagneri, A. D., Rivas, J. M., Han, Y., Davis, S. M., & Perreault, D. J. (2011). High-frequency resonant SEPIC converter with wide input and output voltage ranges. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(1), 189–200.
- Keskin, R., & Aliskan, I. (2019). Design of non-inverting buck-boost converter for electronic ballast compatible with LED drivers. *arXiv preprint arXiv:1907.09890*.
- Kumar, A., & Agarwal, R. (2023, January). Mathematical Modeling and Analysis of Single-Diode, Double-Diode and Triple Diode based PV Module. International Conference for Advancement in Technology (ICONAT) (pp. 1–6). IEEE.
- Mahafzah, K. A., Al-Shetwi, A. Q., Hannan, M. A., Babu, T. S., & Nwulu, N. (2023). A new Cuk-based DC-DC converter with improved efficiency and lower rated voltage of coupling capacitor. *Sustainability*, 15(11), 8515.
- Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. (2003). *Power electronics: Converters, applications, and design*. John Wiley & Sons.
- Mumtaz, F., Yahaya, N. Z., Meraj, S. T., Singh, B., Kannan, R., & Ibrahim, O. (2021). Review on non-isolated DC-DC converters and their control techniques for renewable energy applications. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(4), 3747–3763.
- Ramya, D., & Umadevi, K. (2024). A complete review on DC-to-DC converter topologies for energy sustainable electro-mobility under environmentally heterogeneous power conditions. *Journal of Environmental Nanotechnology*, 13(3), 161–170.
- Raghavendra, K. V. G., Zeb, K., Muthusamy, A., Krishna, T. N. V., Kumar, S. V. P., Kim, D. H., ... & Kim, H. J. (2019). A comprehensive review of DC–DC converter topologies and modulation strategies with recent advances in solar photovoltaic systems. *Electronics*, 9(1), 31.

- Ravi, D., Reddy, B. M., Shimi, S. L., & Samuel, P. (2018). Bidirectional DC to DC converters: An overview of various topologies, switching schemes and control techniques. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4.5), 360–365.
- Vivas, F. J., Segura, F., & Andújar, J. M. (2023). Generalized, complete and accurate modeling of non-ideal push–pull converters for power system analysis and control. *Applied Sciences*, 13(19), 10982.
- Wang, J., Wang, B., Zhang, L., Wang, J., Shchurov, N. I., & Malozyomov, B. V. (2022). Review of bidirectional DC–DC converter topologies for hybrid energy storage system of new energy vehicles. *Green Energy and Intelligent Transportation*, 1(2), 100010.
- Wang, X., Zhao, Q., Zhao, Z., & Meng, F. (2025). Full-bridge DC-DC converter with synchronous rectification based on GaN transistors. *Journal of Low Power Electronics and Applications*, 15(2), 25.



KARDİYOVASKÜLER HASTALIK TEŞHİSİNDE MAKİNE ÖĞRENMESİ ALGORİTMALARININ KARŞILAŞTIRMALI DEĞERLENDİRMESİ

“ ”

*Rukiye UZUN ARSLAN¹
İrem ŞENYER YAPICI²*

1 Doç. Dr. Rukiye UZUN ARSLAN, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi,
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye, rukiye.uzun@
beun.edu.tr, 0000-0002-2082-8695

2 Dr. Öğr. Üyesi İrem ŞENYER YAPICI, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi,
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye, senyerirem@beun.edu.tr,
0000-0003-0655-340X

1. GİRİŞ

Kardiyovasküler hastalıklar (KVH), modern tıbbın en önemli halk sağlığı sorunlarından biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Dünya Sağlık Örgütü'nün (World Health Organization [WHO], 2025) son verilerine göre, KVH'lar küresel ölçekte tüm ölümlerin %32'sinden sorumlu olup, her yıl yaklaşık 20 milyon insanın hayatını kaybetmesine neden olmaktadır. Bu rakam, tüm bulaşıcı hastalıkların toplamından daha yüksektir. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde, nüfusun yaşlanması, şehirleşmenin artması, beslenme alışkanlıklarının değişmesi ve hareketsiz yaşam tarzının yaygınlaşması gibi faktörler nedeniyle KVH insidansının önümüzdeki 20 yılda %30-40 oranında artması beklenmektedir (Roth et al., 2020).

Geleneksel tanı yöntemleri olan koroner anjiyografi, ekokardiyografi ve nükleer stres testleri gibi teknikler, yüksek tanısal doğruluk sağlamakla birlikte, yüksek maliyetleri, invaziv doğaları ve uzman bağımlılığı gibi önemli sınırlamalara sahiptir (Özmen, Khdr, & Avcı, 2018). Ayrıca, bu yöntemlerin uygulanabilirliği sağlık altyapısı yetersiz olan bölgelerde ciddi şekilde kısıtlanmaktadır. Bu durum, özellikle düşük ve orta gelirli ülkelerde erken tanı ve tedaviye erişimi önemli ölçüde engellemektedir (Prabhakaran et al., 2018).

Son yıllarda, yapay zeka ve makine öğrenmesi (MÖ) teknolojilerindeki gelişmeler, tıbbi tanı süreçlerinde devrim niteliğinde değişikliklere yol açmıştır. Özellikle derin öğrenme algoritmalarının tıbbi görüntüleme verilerinin analizindeki başarısı, bu teknolojilerin KVH'ların teşhisinde de kullanılabilirliği fikrini güçlendirmiştir (Topol, 2019). Rutin klinik muayenelerde elde edilen demografik, fizyolojik ve biyokimyasal parametrelerin MÖ algoritmaları ile analizi, invaziv olmayan, düşük maliyetli ve yüksek doğruluk oranına sahip tanı sistemlerinin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır (Dey et al., 2019).

Literatürde yapılan çok sayıda çalışma, KVH'ların erken teşhisinde MÖ algoritmalarının yüksek doğruluk oranlarıyla etkili sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur. Yadav et al. (2023), çeşitli MÖ algoritmalarını karşılaştırmalı olarak değerlendirmiş ve karar ağacı (KA) ile rastgele orman (RO) modelleriyle %97,08 doğruluk oranı elde ederek bu modellerin öne çıktığını raporlamışlardır. Özmen et al. (2018), farklı MÖ algoritmalarını doğruluk, kappa istatistiği, hata oranları ve göreceli hata ölçütleri gibi performans metrikleriyle karşılaştırmış; en yüksek doğruluk oranına destek vektör makineleri (DVM) ile ulaşmışlardır. Vatansever et al. (2021), genetik algoritma (GA) tabanlı öznelik seçimi sonrasında K-En Yakın Komşu (K-NN), lojistik regresyon (LR), KA, RO, DVM ve Naive Bayes (NB) algoritmalarını kullanarak gerçekleştirdikleri 28 deneyde en başarılı sonucu %93,44 doğruluk oranıyla GA destekli modelde elde etmişlerdir. Polatgil (2020), kalp hastalığı tahminine yönelik geliştirdiği MÖ tabanlı model ile %98,35 doğruluk oranına ulaşarak yüksek sınıflandır-

ma başarımı sağlamıştır. Sungur ve Bakır (2024), veri dengeleme ve hiperparametre optimizasyonu tekniklerini sekiz farklı MÖ algoritmasıyla birleştirerek gerçekleştirdikleri çalışmada, RO algoritmasıyla %97 doğruluk oranı elde etmişlerdir. El-Sofany (2024), çeşitli öznitelik seçimi yaklaşımlarının geliştirilmiş gradyan artırma tabanlı bir MÖ modeli üzerindeki etkisini incelemiş ve %97,57 doğrulukla en yüksek başarıya ulaşmıştır. Alsabhan ve Alfadhly (2025), farklı ölçekleme yöntemleri eşliğinde çeşitli MÖ ve derin öğrenme algoritmalarını kalp hastalığı tahmini amacıyla değerlendirmiş; modelleri doğruluk, AUC ve F1 skoru gibi metrikler üzerinden karşılaştırarak en başarılı yaklaşımları belirlemişlerdir. Gündoğdu (2021) kalp hastalığı olasılığı düşük ve yüksek bireyleri sınıflandırmak amacıyla yedi farklı MÖ algoritmasını karşılaştırmıştır. En yüksek performans %90,2 doğruluk ve %100 özgüllük ile RO algoritması tarafından elde edilmiştir. Sevlı (2022), kalp hastalığının erken teşhisine yönelik sekiz farklı makine öğrenmesi algoritmasını karşılaştırmalı olarak incelemiş ve toplam 72 sınıflama işlemi gerçekleştirmiştir. En yüksek doğruluk oranı %98,46 ile RO algoritmasıyla elde edilmiştir. Coşar ve Deniz (2021), kalp hastalığını tespit etmeye yönelik çalışmalarında üç farklı MÖ algoritmasını karşılaştırmalı olarak değerlendirmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, en yüksek doğruluk oranı %88 ile RO algoritmasıyla elde edilmiş; bunu LR (%85) ve K-NN (%70) algoritmaları takip etmiştir. Gürsoy (2022), kalp hastalığı tahmini için farklı MÖ algoritmalarını karşılaştırmış ve en yüksek doğruluk oranını %88,9 ile LR ve toplu öğrenme yöntemleriyle elde etmiştir. Takcı (2022) kalp hastalığı tahmini için KNN algoritmasını kullanmış ve farklı uzaklık ölçütleri, ağırlıklandırma yöntemleri ile komşu sayıları üzerinden parametre optimizasyonu yapmıştır. Optimizasyon sonrası doğruluk oranı %90'ın üzerine çıkmış ve algoritma performansının belirgin şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Çil ve Güneş (2021), kalp hastalıklarının erken teşhisine yönelik olarak DVM, RO, NB, K-NN ve yapay sinir ağları (YSA) algoritmalarını karşılaştırmalı olarak analiz etmiştir. Ünlü et al. (2022), kalp hastalığının erken teşhisine yönelik olarak çeşitli MÖ algoritmalarının sınıflandırma performansları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Gerçekleştirilen analizlerde DVM %97 doğruluk oranı ile en yüksek başarıyı gösterirken, çoklu doğrusal regresyon ve RO algoritmaları sırasıyla %93 ve %91 doğruluk oranlarına ulaşmıştır. Ayrıca, K katlı çapraz doğrulama yönteminin bekletme (hold-out) yöntemine kıyasla daha yüksek sınıflandırma başarımı sağladığı belirlenmiştir. Tüm bu çalışmalar, MÖ temelli modellerin kalp hastalığı teşhisinde yüksek doğruluk oranlarıyla etkili ve uygulanabilir sonuçlar sunduğunu ortaya koymakta; bu alandaki araştırmaların klinik karar destek sistemlerinin geliştirilmesine ve erken tanı süreçlerinin iyileştirilmesine önemli katkılar sağladığını göstermektedir.

Bu doğrultuda gerçekleştirilen bu çalışmada, kalp hastalığının tahmini-ne yönelik olarak DVM, LR, gradyan artırma (GA) ve çok katmanlı algılayıcı

(ÇKA) gibi önde gelen MÖ algoritmalarının sınıflama performansları karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. Çalışmanın temel amacı, en yüksek doğruluk oranını sunan modeli belirleyerek klinik karar destek sistemlerine katkı sunabilecek etkili bir yaklaşım ortaya koymaktır. Ayrıca, klinik açıdan anlamlı öznelitliklerin MÖ modelleriyle entegrasyonu ve bu değişkenlerin sınıflandırma performansı üzerindeki etkilerinin sistematik olarak değerlendirilmesi de çalışmanın özgün katkıları arasında yer almaktadır. Modelleme sürecinde, veri ön işleme adımları, öznelitlik seçimi, veri dönüşümü ve hiperparametre optimizasyonu gibi önemli aşamalar detaylı biçimde ele alınmış ve bu adımların sınıflandırma başarımı üzerindeki etkileri irdelenmiştir. Çalışma, MÖ algoritmalarının kalp hastalığı verileri üzerindeki etkinliğini nicel verilerle ortaya koymakta ve bu yönüyle erken tanı süreçlerinin hızlandırılması ve klinik karar destek sistemlerinin geliştirilmesine bilimsel bir temel oluşturmayı hedeflemektedir.

2. MATERİYAL METOT

2.1 Veri Seti

Bu çalışmada, UCI Machine Learning Repository platformunda açık erişime sunulan ve literatürde yaygın olarak kullanılan Heart Disease veri seti kullanılmıştır (Janosi et al., 1989). Veri seti, 13 klinik öznelitlik ve 1 hedef değişken olmak üzere toplam 14 değişkenden oluşan 303 bireysel hasta kaydı içermektedir. Veri setindeki klinik öznelitlikler, tanısal değerleri ve klinik anlamlılıkları dikkate alınarak üç temel grupta sınıflandırılmıştır. Demografik özellikler kapsamında yaş ve cinsiyet bilgileri; fizyolojik parametreler kapsamında kan basıncı, serum kolesterol düzeyi ve açlık kan şekeri değerleri; kardiyak bulgular kapsamında ise EKG sonuçları, egzersize bağlı anjina varlığı ve ST segment depresyonu gibi kardiyovasküler hastalık tanısında kritik öneme sahip göstergeler yer almaktadır. Hedef değişken ise bireyin hastalık durumunu temsil etmekte olup 0 (sağlıklı) ve 1 (kardiyovasküler hastalık) şeklinde ikili sınıflandırmayla kodlanmıştır.

2.2 Veri Ön İşleme ve Dönüşüm İşlemleri

Modelleme süreci öncesinde veri kümesine çeşitli ön işleme ve dönüşüm adımları uygulanmıştır. Bu kapsamda, eksik değerlere sahip gözlemler uygun yöntemlerle tamamlanmış; sayısal değişkenler ortalama değer ile doldurularak standartlaştırılmıştır. Kategorik değişkenler ise en sık gözlemlenen değer ile doldurulmuş ve tek-sıcak kodlama (One-Hot Encoding) yöntemi kullanılarak sayısal forma dönüştürülmüştür. Tüm bu işlemler, sütun bazlı bir dönüştürücü (ColumnTransformer) aracılığıyla yapılandırılmış; böylece her değişken türüne özgü olarak eksik veri giderme, ölçekleme ve kodlama işlemleri eş zamanlı ve bütüncül bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

2.3 Makine öğrenme algoritmaları

Bu bölümde, çalışmada kullanılan ÇKA, LR, DVM, RO ve Gradyan Artırma (GA) algoritmaları özetlenmektedir. ÇKA, ileri beslemeli yapay sinir ağlarının temel bir uygulaması olarak, bir girdi katmanı, bir veya daha fazla gizli katman ve bir çıktı katmanından oluşan bir yapıya sahiptir. Doğrusal olmayan aktivasyon fonksiyonları aracılığıyla karmaşık veri ilişkilerini modelleme yeteneği sunan bu mimari, geri yayılım (backpropagation) algoritması ile optimize edilmektedir. Doğrusal olarak ayrılamayan veri kümelerinde yüksek sınıflandırma performansı gösterebilmesi nedeniyle yaygın bir kullanım alanı bulmaktadır (Haykin, 1994; Bishop ve Nasrabadi 2006; Arslan, Yaman, & İşler, 2019).

LR, ikili sınıflandırma problemlerinde yaygın olarak kullanılan istatistiksel bir modelleme tekniğidir. Bu yöntem, bağımlı değişkenin logit dönüşümünü bağımsız değişkenlerin doğrusal bir kombinasyonu olarak ifade etmektedir. Temel matematiksel formülasyonu $\text{logit}(p) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n$ şeklindedir, burada p pozitif sınıf olasılığını, β 'lar ise model parametrelerini temsil etmektedir. Lojistik fonksiyon aracılığıyla bu doğrusal kombinasyon $[0,1]$ aralığına eşlenerek olasılık tahmini yapılmaktadır. Parametre tahmini genellikle maksimum olabilirlik yöntemiyle gerçekleştirilmekte ve Newton-Raphson gibi sayısal optimizasyon algoritmaları kullanılmaktadır. Modelin en önemli avantajlarından biri, katsayıların log-odds oranı cinsinden yorumlanabilmesidir. Ayrıca L1 ve L2 regularizasyon teknikleriyle uygulanabilmesi, yüksek boyutlu veri setlerinde bile etkili sonuçlar vermesini sağlamaktadır. Bu özellikleri nedeniyle LR, klinik araştırmalardan sosyal bilimlere kadar geniş bir uygulama alanı bulmuştur (Hosmer, Lemeshow, & Sturdivan, 2013; Uzun, İşler, & Toksan, 2019).

GA, topluluk öğrenme teknikleri içinde önemli bir yere sahip olan yinelemeli bir MÖ algoritmasıdır. Temel olarak, zayıf öğrencilerin (genellikle sığ karar ağaçları) ardışık olarak eğitilmesi ve her yeni modelin önceki modellerin hatalarını düzeltecek şekilde optimize edilmesi prensibine dayanmaktadır. Algoritma, kayıp fonksiyonunun negatif gradyan yönünde ilerleyerek parametre uzayında optimizasyon gerçekleştirmektedir (Friedman, 2001). Matematiksel olarak, m . iterasyondaki model $F_m(x) = F_{m-1}(x) + \gamma_m h_m(x)$ şeklinde ifade edilmekte olup, burada $h_m(x)$ temel öğrenciyi, γ_m ise öğrenme oranını temsil etmektedir (Arslan, Yapıcı & Erkaymaz., 2024).

RO, Breiman (2001) tarafından geliştirilen istatistiksel bir öğrenme yöntemi olup, çok sayıda karar ağacının oluşturduğu bir topluluk (ensemble) modelidir. Algoritma, bootstrap yöntemiyle oluşturulan veri alt kümeleri ve her düğüm ayrımında rastgele seçilen özellik alt kümeleri olmak üzere iki temel rastgelelik prensibine dayanmaktadır. Bu çift rastgelelik mekanizması, ağaçlar arası korelasyonu azaltarak modelin genelleme yeteneğini artırmakta

ve varyansı düşürmektedir. Sınıflandırma problemlerinde çoğunluk oylaması (majority voting), regresyon problemlerinde ise ortalama değer yöntemi kullanılarak nihai tahminler oluşturulmaktadır. Model aynı zamanda Gini önem (Gini importance) ve permütasyon önem (permutation importance) gibi yöntemlerle değişkenlerin göreceli önem düzeylerini hesaplayabilme yeteneğine sahiptir. Bu özellik, modelin yorumlanabilirliğini önemli ölçüde artırmaktadır (Yapıcı & Arslan, 2024).

DVM, Cortes ve Vapnik (1995) tarafından önerilen ve istatistiksel öğrenme teorisine dayanan bir sınıflandırma algoritmasıdır. Temel prensibi, sınıfları ayıran optimal hiperdüzlemi bulmaya dayanmaktadır. Bu hiperdüzlem, destek vektörleri (support vectors) olarak adlandırılan sınır noktalarına maksimum uzaklık sağlayacak şekilde seçilmektedir. Doğrusal olarak ayrıştırılamayan veri kümelerinde, çekirdek (kernel) fonksiyonları (RBF, polinom, sigmoid vb.) aracılığıyla veri daha yüksek boyutlu bir özellik uzayına dönüştürülmektedir. Bu dönüşüm, karmaşık karar sınırlarının doğrusal olarak ifade edilebilmesine olanak tanımaktadır. SVM'in en önemli avantajları arasında yüksek boyutlu verilerde etkili performans göstermesi, model karmaşıklığının destek vektör sayısı ile sınırlı olması ve yerel minimumlara takılma riskinin düşük olması sayılabilir. Algoritma, özellikle küçük ve orta ölçekli veri setlerinde yüksek sınıflandırma doğruluğu sağlamaktadır (Arslan ve Yapıcı, 2024; Uzun, İşler, & Toksan, 2018).

2.4 Hiperparametre Optimizasyonu

Çalışmada, model performanslarının artırılması amacıyla, her bir MÖ algoritması için hiperparametre optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte, hiperparametre kombinasyonlarının etkin bir şekilde taranabilmesi için RandomizedSearchCV yöntemi tercih edilmiştir. Söz konusu yöntem, tanımlanan arama alanlarında rastgele örnekler alarak, daha düşük hesaplama maliyetiyle optimal parametre değerlerinin bulunmasını sağlamaktadır. Her bir model için farklı hiperparametreler tanımlanmış ve bu parametreler, 3 katlı çapraz doğrulama (CV=3) ile ROC-AUC (Receiver Operating Characteristic - Area Under the Curve) skoruna göre değerlendirilmiştir. Hiperparametre arama alanları, ilgili algoritmanın yapısal özellikleri göz önünde bulundurularak belirlenmiş olup, Tablo 1'de sunulmuştur. Arama işlemi tamamlandıktan sonra, elde edilen en iyi model parametreleri ile nihai performans değerlendirmeleri gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. *Hiperparametre optimizasyonunda kullanılan arama alanları ve parametreler*

Model	Hiperparametre	Arama Alanı
ÇKA	hidden_layer_sizes	(32,), (64,), (32,16)
	alpha	1e-5 – 1e-2
	learning_rate_init	0.0001 – 0.01
LR	C	0.01 – 10
	solver	{'lbfgs', 'liblinear'}
RO	n_estimators	50 – 150
	max_depth	3 – 10
	min_samples_split	2 – 10
GA	n_estimators	50 – 150
	learning_rate	0.01 – 0.2
	max_depth	3 – 6
DVM	C	0.1 – 10
	gamma	{'scale', 'auto'}
	kernel	{'rbf'}

2.5 Performans Değerlendirme Metrikleri

Bu çalışmada sınıflandırma algoritmalarının başarımını ölçmek amacıyla doğruluk (accuracy), duyarlılık (recall/sensitivity), özgüllük (specificity), kesinlik (precision), F1 skoru ve ROC-AUC metrikleri kullanılmıştır. Tüm metrikler, karışıklık matrisi (confusion matrix) üzerinden elde edilen doğru pozitif (True Positives, TP), yanlış pozitif (False Positives, FP), doğru negatif (True Negatives, TN) ve yanlış negatif (False Negatives, FN) değerlerine dayalı olarak hesaplanmıştır. Bu metriklerle ilişkin tanımlar ve matematiksel ifadeler Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2. *Sınıflandırma performans metriklerinin tanımı, matematiksel ifadesi ve kullanım alanları*

Metrik	Tanım	Matematiksel İfade	Kullanım Alanı
Doğruluk (Accuracy)	Modelin tüm tahminler içerisindeki doğru sınıflandırma oranı.	$\frac{(TP + TN)}{(TP + TN + FP + FN)}$	Genel Performans
Duyarlılık (Recall / Sensitivity)	Pozitif sınıfa ait örneklerin doğru şekilde pozitif olarak sınıflandırılma oranı.	$\frac{TP}{(TP + FN)}$	FN’lerin önemli olduğu durumlar
Özgüllük (Specificity)	Negatif sınıfa ait örneklerin doğru şekilde negatif olarak sınıflandırılma oranı.	$\frac{TN}{(TN + FP)}$	FP’lerin önemli olduğu durumlar

Kesinlik (Precision)	Pozitif olarak tahmin edilen örneklerin gerçekten pozitif olma oranı.	$\frac{TP}{(TP + FP)}$	Pozitif tahminlerin güvenilirliği
F1 Skoru (F1 Score)	Kesinlik ve duyarlılığın harmonik ortalaması.	$2 * \frac{Kesinlik * Duyarlılık}{(Kesinlik + Duyarlılık)}$	Dengesiz veri setleri
ROC-AUC	Modelin farklı karar eşiklerinde pozitif ve negatif sınıfları ayırt etme yeteneğini gösteren ROC eğrisi altında kalan alan.	$AUC \in [0,1]$	Modelin genel ayırt edicilik gücü

3. SONUÇLAR

Bu çalışmada, farklı MÖ algoritmalarının kardiyovasküler hastalık sınıflandırmasındaki başarımı karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Veri ön işleme ve analiz süreçleri Python programlama dili (sürüm 3.8) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Modelleme sürecinde veriler %80 eğitim ve %20 test olacak şekilde ayrılmış; eğitim verileri üzerinde 5 katlı stratified çapraz doğrulama uygulanmıştır. Eksik veriler uygun biçimde giderilmiş, sayısal değişkenler standartlaştırılmış, kategorik değişkenler ise tek-sıcak kodlama (one-hot encoding) yöntemiyle dönüştürülmüştür. Hiperparametre optimizasyonu, tüm modeller için ayrı ayrı belirlenen arama alanları doğrultusunda RandomizedSearchCV yöntemiyle gerçekleştirilmiş; ayrıca erken durdurma stratejisi gibi aşırı öğrenmeyi önlemeye yönelik teknikler de uygun modellerde uygulanmıştır. Tüm modeller, doğruluk, duyarlılık, özgüllük, kesinlik, F1 skoru ve ROC AUC gibi performans metrikleri üzerinden hem çapraz doğrulama hem de test seti bazında değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, çapraz doğrulama sürecinde elde edilen performans ölçütlerine ilişkin sonuçlar Tablo 3’de sunulmaktadır.

Tablo 3. Makine öğrenimi modellerine ait çapraz doğrulama performans metrikleri

Model	Accuracy	Recall	Specificity	Precision	F1 Score	ROC AUC
ÇKA	0,7401	0,6482	0.8160	0,7559	0,6792	0,8371
LR	0,8428	0,8016	0,8769	0,8571	0,8257	0,9032
RO	0,8057	0,7561	0,8464	0,8157	0,7813	0,8888
GA	0,7770	0,7379	0,8088	0,7660	0,7494	0,8665
DVM	0,8304	0,7470	0,9000	0,8733	0,8016	0,8943

Çapraz doğrulama sonuçlarına göre beş farklı MÖ modelinin performans metrikleri incelendiğinde, LR modelinin genel anlamda en başarılı performansı sergilediği görülmektedir. LR modeli %84,28 doğruluk, %80,16

duyarlılık, %87,69 özgüllük, %85,71 kesinlik ve %82,57 F1 skoru ile dengeli ve yüksek bir performans göstermiştir. Ayrıca 0,9032 ROC-AUC değeriyle de modeller arasında en iyi ayırt edicilik gücüne sahip olduğu anlaşılmaktadır. DVM modeli ise %90,00 özgüllük ve %87,33 kesinlik değerleriyle öne çıkmaktadır. Bu sonuçlar, DVM'nin özellikle negatif sınıfı doğru tanımlamada ve yanlış pozitif oranlarını düşürmede etkili olduğunu göstermektedir. Ancak %74,70 duyarlılık değeri, pozitif sınıf tahminlerinde LR'ye göre daha düşük bir performans sergilediğini ortaya koymaktadır. RO ve GA modelleri orta düzeyde bir performans göstermişlerdir. RO modeli %80,57 doğruluk ve 0,8888 ROC-AUC değeriyle, GA modeli ise %77,70 doğruluk ve 0,8665 ROC-AUC değeriyle makul sonuçlar üretmiştir. Ancak bu modellerin F1 skorlarının (sırasıyla %78,13 ve %74,94) LR ve DVM'ye göre daha düşük olması, özellikle dengesiz veri setlerinde sınırlılıklar yaşayabileceklerini düşündürmektedir. ÇKA modeli ise incelenen tüm metriklerde en düşük performansı göstermiştir. %74,01 doğruluk, %64,82 duyarlılık ve %75,59 kesinlik değerleri, modelin hem pozitif hem de negatif sınıfları tanımlamada diğer modellere göre daha fazla zorlandığını ortaya koymaktadır. 0,8371 ROC-AUC değeri ise modelin ayırt edicilik gücünün nispeten sınırlı olduğunu göstermektedir.

Çapraz doğrulama analizinden elde edilen bu bulgular, modellerin eğitim sürecinde gösterdiği performansa ışık tutmaktadır. Ancak, modellerin genelleme yeteneklerini daha sağlıklı değerlendirebilmek amacıyla test veri kümesi üzerinde de performans analizi yapılmıştır. Tablo 4, bu analizden elde edilen sınıflandırma sonuçlarını sunmaktadır.

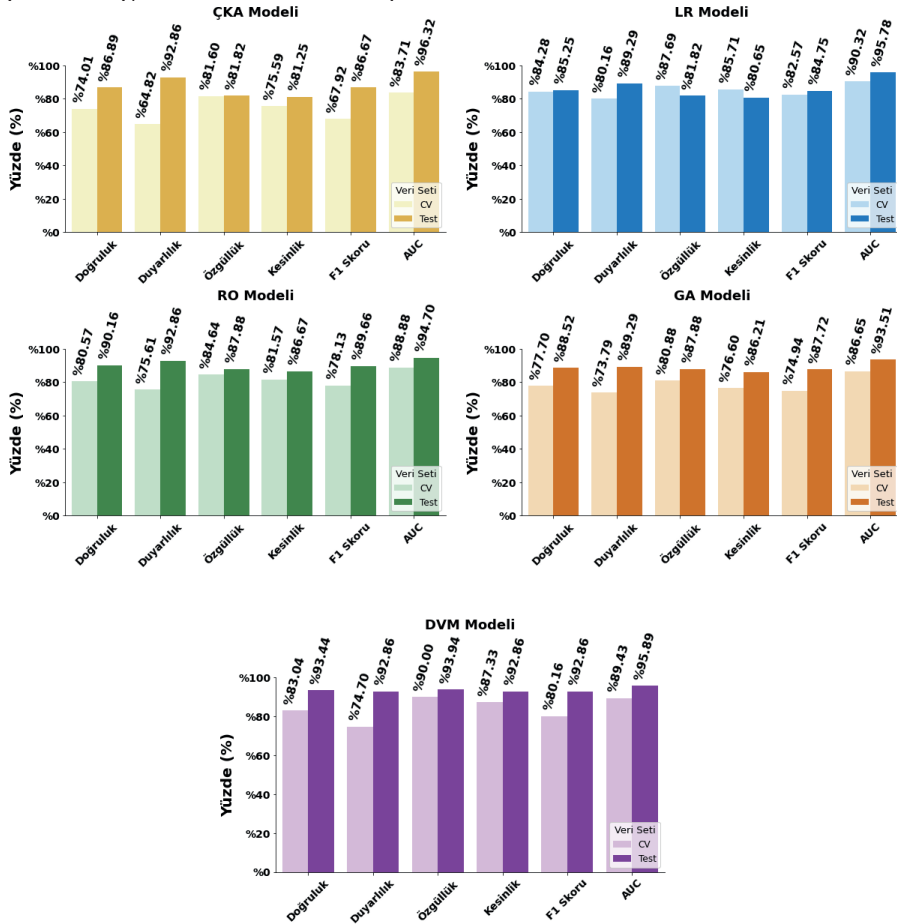
Tablo 4. Makine öğrenimi modellerine ait test performans metrikleri

Model	Doğruluk	Recall	Specificity	Precision	F1 Score	ROC-AUC
ÇKA	0,8689	0,9286	0,8182	0,8125	0,8667	0,9632
LR	0,8525	0,8929	0,8182	0,8065	0,8475	0,9578
RO	0,9016	0,9286	0,8788	0,8667	0,8966	0,9470
GA	0,8852	0,8929	0,8788	0,8621	0,8772	0,9351
DVM	0,9344	0,9286	0,9394	0,9286	0,9286	0,9589

Tablo 2'de yer alan sonuçlar incelendiğinde, test veri kümesi üzerinde DVM modelinin %93,44 doğruluk, %92,86 duyarlılık, %93,94 özgüllük, %92,86 kesinlik ve %92,86 F1 skoru ile tüm metriklerde en yüksek performansı sergilediği görülmektedir. Özellikle 0,9589 ROC-AUC değeri, modelin sınıfları ayırt etme yeteneğinin mükemmel yakın olduğuna işaret etmektedir. RO modeli, %90,16 doğruluk ve %89,66 F1 skoru ile ikinci sırada yer almakta olup, %92,86 duyarlılık ve %87,88 özgüllük değerleri, pozitif ve negatif sınıfları dengeli bir biçimde tanımlayabildiğini göstermektedir. GA modeli %88,52 doğruluk ve %87,72 F1 skoru ile orta düzeyde bir performans sergile-

miş; %87,88 özgüllük değeri ise özellikle negatif sınıfın doğru tanımlanmasında başarılı olduğunu ortaya koymuştur. ÇKA modeli 0,9632 ROC-AUC değeriyle dikkat çekici bir ayırt edicilik gücü göstermesine rağmen, %81,25 kesinlik değerinin nispeten düşük olması, pozitif tahminlerde yanlış pozitif oranının yüksek olabileceğine işaret etmektedir. LR modeli ise %85,25 doğruluk ve %84,75 F1 skoru ile diğer modellere kıyasla daha düşük bir performans sergilemiştir.

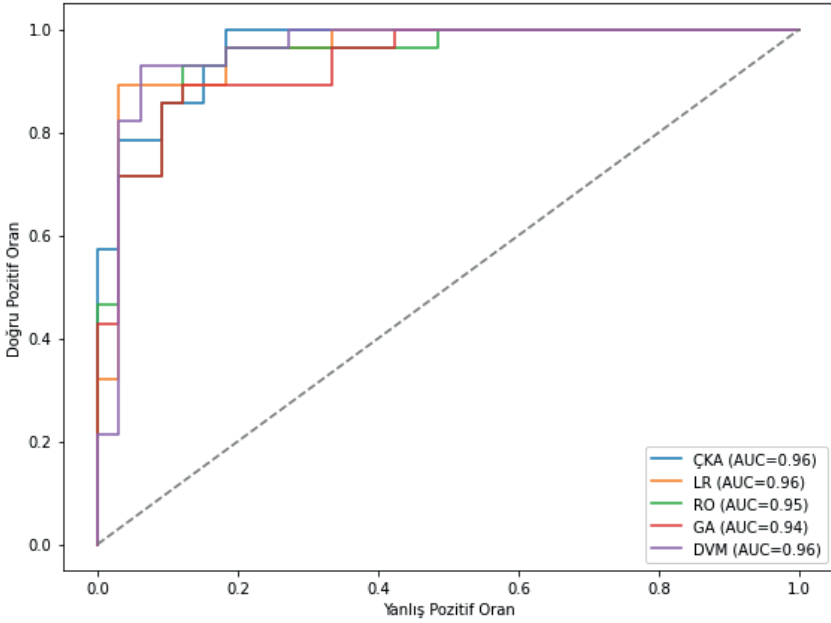
Bu bulgular, modellerin test veri kümesindeki genel performanslarının yüksek olmakla birlikte, farklı metriklerde değişen güçlü yönleri göstermektedir. Çapraz doğrulama ve test seti sonuçlarının birlikte değerlendirilmesi, her bir modelin genelleme yeteneğinin daha net anlaşılmasına olanak tanımaktadır. “Bu karşılaştırmalı değerlendirme, her bir modelin performansına ilişkin bulguların daha net anlaşılmasını sağlamak amacıyla Şekil 1’de görsel olarak sunulmuştur.



Şekil 1. MÖ modellerinin çapraz doğrulama ve test veri seti performans metriklerinin karşılaştırılması.

Şekil 1 incelendiğinde, tüm makine öğrenimi modellerinin test veri seti üzerindeki performanslarının, çapraz doğrulama sürecinde elde edilen sonuçlara kıyasla belirgin şekilde daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum, modellerin eğitim sürecinde öğrendikleri örüntüleri yeni verilere başarılı bir şekilde genelleştirebildiklerini göstermektedir. Modeller arasında, DVM algoritması test setinde %93,44 doğruluk ve 0,9589 ROC-AUC skorları ile en yüksek genel performansı sergilemiş; bu değerler, çapraz doğrulama sürecindeki %83,04 doğruluk ve 0,8943 ROC-AUC sonuçlarına kıyasla kayda değer bir artış göstermiştir. Benzer şekilde, RO algoritması da çapraz doğrulamada elde ettiği %80,57 doğruluk ve 0,8888 ROC-AUC değerlerine karşın, test setinde bu oranları sırasıyla %90,16 ve 0,9470 düzeylerine yükseltmiştir. GA algoritması ise çapraz doğrulamadaki %77,70 doğruluk oranını test setinde %88,52'ye çıkararak anlamlı bir performans artışı ortaya koymuştur. LR modeli, çapraz doğrulama aşamasında %84,28 doğruluk ve 0,9032 ROC-AUC değerleri ile güçlü bir performans sergilerken, test setinde %85,25 doğruluk ve 0,9578 ROC-AUC skorları ile özellikle sınıflandırma başarımı açısından yüksek ayırt edicilik düzeyine ulaşmıştır. ÇKA modeli ise, çapraz doğrulama sürecinde %74,01 doğruluk ve %67,92 F1 skoru ile en düşük başarıyı gösteren model olmasına rağmen, test setinde %86,89 doğruluk ve 0,9632 ROC-AUC değerlerine ulaşarak dikkate değer bir iyileşme kaydetmiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, tüm modellerin test verisi üzerindeki ROC-AUC skorlarında anlamlı artışlar gözlenmiş ve bu da sınıfları ayırt etme kapasitelerinin güçlendiğini ortaya koymuştur. Şekil 2'de tüm makine öğrenimi algoritmalarına ilişkin olarak sunulan ROC-AUC eğrileri, pozitif ve negatif sınıfları ayırt etme yeteneğini görsel olarak ortaya koymakta; eğri altında kalan alanların genişliği ise, elde edilen AUC skorlarıyla tutarlı biçimde, modellerin genel başarımlarını desteklemektedir.



Şekil 2. Test veri setinde kullanılan MÖ modellerine ait ROC eğrileri ve karşılık gelen AUC skorları

Şekil 2’de sunulan ROC eğrileri incelendiğinde, tüm modellerin eğrilerinin ideal sınırlara oldukça yakın seyrettiği gözlemlenmekte olup, bu durum yüksek sınıflandırma başarımını desteklemektedir. Özellikle ÇKA, LR ve DVM modelleri, 0,96 düzeyine yakın veya bu değerin üzerinde elde ettikleri AUC skorlarıyla en yüksek ayırt edicilik kapasitesine ulaşmıştır. RO algoritması yaklaşık 0,95, GA algoritması ise yaklaşık 0,94 AUC değeriyle benzer şekilde güçlü bir performans sergilemiştir. Elde edilen bu sonuçlar, modellerin yalnızca genel doğruluk açısından değil, aynı zamanda pozitif ve negatif sınıfları ayırt etme becerisi bakımından da yüksek düzeyde güvenilir ve tutarlı sınıflandırma yeteneğine sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Elde edilen bulgular bütüncül olarak değerlendirildiğinde, MÖ tabanlı yaklaşımların kardiyovasküler hastalıkların sınıflandırılmasında dikkate değer bir potansiyele sahip olduğu görülmektedir. Gerçekleştirilen analizler, özellikle DVM ve RO modellerinin sınıflandırma başarımı açısından ön çıktığını ve doğrusal olmayan karmaşık örüntüleri öğrenme kapasiteleri sayesinde klinik veriler üzerinde üstün performans sergilediklerini ortaya koymuştur. LR modeli ise görece basit yapısına rağmen istikrarlı ve tutarlı bir performans sergilemiştir. Bu durum, özellikle modelin yorumlanabilirliğinin öncelikli olduğu klinik karar destek sistemleri açısından önemli bir avantaj olarak değerlendirilebilir. Buna karşılık, ÇKA modelinin çapraz doğrulama aşamasında nispeten düşük performans göstermesi, modelin yapısal

karmaşıklığı ve aşırı öğrenme eğilimi ile ilişkilendirilebilir. Bununla birlikte, ÇKA'nın test verisi üzerindeki performansındaki anlamlı artış, uygun hiperparametre optimizasyonu ve düzenleme stratejilerinin uygulanması durumunda, derin öğrenme tabanlı yaklaşımların da sınıflandırma görevlerinde etkili ve uygulanabilir alternatifler sunabileceğine işaret etmektedir.

Bu umut verici sonuçlara rağmen, çalışmanın bazı sınırlılıkları bulunmaktadır. Temel sınırlılıklar arasında, kullanılan veri kümesinin örneklem büyüklüğü ve demografik çeşitliliğinin sınırlı oluşu öne çıkmaktadır. Elde edilen sonuçların genellenebilirliğini ve klinik uygulamalara aktarılabilirliğini artırmak amacıyla, gelecekte farklı demografik özelliklere sahip daha geniş hasta popülasyonları üzerinde yapılacak çalışmalar önerilmektedir. Buna ek olarak, model kararlarının şeffaflığını ve açıklanabilirliğini sağlamak üzere açıklanabilir yapay zeka (XAI) yaklaşımlarının entegrasyonu, klinisyenlerin algoritmik çıktılara duyduğu güveni artırma potansiyeline sahiptir.

Sonuç olarak, bu çalışma, MÖ temelli yöntemlerin kardiyovasküler hastalık risk tahmininde umut vadeden sonuçlar sunduğunu ortaya koymakta; ancak bu yaklaşımların klinik ortamlarda rutin olarak kullanılabilir hâle gelmesi için ileri düzey validasyon çalışmalarına ve gerçek zamanlı klinik veriler üzerinde yapılacak kapsamlı değerlendirmelere ihtiyaç duyulmaktadır. Gelecekte gerçekleştirilecek uygulama odaklı araştırmalar, bu teknolojilerin sağlık hizmeti sunumuna entegrasyonuna ilişkin daha somut çıkarımlar elde edilmesine katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Alsabhan, W., & Alfadhly, A. (2025). Effectiveness of machine learning models in diagnosis of heart disease: A comparative study. *Scientific Reports*, 15(1), 24568.
- Arslan, R. U., & Yapıcı, İ. Ş. (2024). Farklı örnekleme tekniklerine ve farklı sınıflandırıcılara dayanarak kalp yetmezliği tanılı hastaların sağkalımlarının incelenmesi. *EMO Bilimsel Dergi*, 14(2), 35-47.
- Arslan, R. U., Yaman, G. K., & İşler, Y. (2019, Aralık). Çok katmanlı algılayıcı yapay sinir ağı kullanarak Packman oyununda yapılan el hareketlerinin sınıflandırılması. In *SETSCI-Conference Proceedings* (Vol. 9, ss. 266–269). *SETSCI-Conference Proceedings*.
- Arslan, R. U., Yapıcı, İ. Ş., & Erkeymaz, O. (2024). Diyabet risk durumunun belirlenmesinde sınıflandırma algoritmalarının performanslarının kapsamlı bir şekilde karşılaştırılması. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(4), 1320-1333.
- Bishop, C. M., & Nasrabadi, N. M. (2006). *Pattern recognition and machine learning* (Vol. 4, No. 4, p. 738). New York, NY: Springer.
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine learning*, 45(1), 5-32.
- Cortes, C., & Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. *Machine learning*, 20(3), 273-297.
- Coşar, M., & Deniz, E. (2021). Makine öğrenimi algoritmaları kullanarak kalp hastalıklarının tespit edilmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (28), 1112–1116.
- Çil, E., & Güneş, A. (2022). Makine öğrenmesi algoritmalarıyla kalp hastalıklarının tespit edilmesine yönelik performans analizi. *Anadolu Bil Meslek Yüksekokulu Dergisi*, 17(65), 57–77.
- Dey, D., Slomka, P. J., Leeson, P., Comaniciu, D., Shrestha, S., Sengupta, P. P., & Marwick, T. H. (2019). Artificial intelligence in cardiovascular imaging: JACC state-of-the-art review. *Journal of the American College of Cardiology*, 73(11), 1317–1335. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2018.12.058>
- El-Sofany, H. F. (2024). Predicting heart diseases using machine learning and different data classification techniques. *IEEE Access*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3437181>
- Friedman, J. H. (2001). Greedy function approximation: a gradient boosting machine. *Annals of statistics*, 1189-1232.
- Gündoğdu, S. (2021). Kalp hastalık risk tahmini için Python aracılığıyla sınıflandırıcı algoritmalarının performans değerlendirilmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 23(69), 1005-1013.
- Gürsoy, G. (2022). *Makine öğrenmesi algoritmaları ile kalp hastalığı tahmini* (Yüksek lisans tezi, Maltepe University, Türkiye).
- Haykin, S. (1994). *Neural networks: A comprehensive foundation*. Prentice hall PTR.

- Hosmer Jr, D. W., Lemeshow, S., & Sturdivant, R. X. (2013). *Applied logistic regression*. John Wiley & Sons.
- Janosi, A., Steinbrunn, W., Pfisterer, M., & Detrano, R. (1989). *Heart Disease* [Veri seti]. UCI Machine Learning Repository. <https://doi.org/10.24432/C52P4X>
- Juhani, K., William, W., Antti, S., Davide, C., Emanuele, B., Christian, F. B., ... & Thomas, C. (2020). ESC Guidelines for the diagnosis and management of chronic coronary syndromes. *Eur Heart J*, 41(3), 407-77.
- Özmen, Ö., Khdr, A., & Avcı, E. (2018). Sınıflandırıcıların kalp hastalığı verileri üzerine performans karşılaştırması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30(3), 153-159.
- Polatgil, M. (2020). Anfis ve bulanık k ortalamalar ile kalp hastalığının tespit edilmesi. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 13(4), 443-449.
- Potur, E. A., & Erginel, N. (2021). Kalp yetmezliği hastalarının sağ kalımlarının sınıflandırma algoritmaları ile tahmin edilmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (24), 112-118.
- Prabhakaran, D., Anand, S., Watkins, D., Gaziano, T., Wu, Y., Mbanya, J. C., ... Zhu, Y. (2018). Cardiovascular, respiratory, and related disorders: Key messages from Disease Control Priorities. *The Lancet*, 391(10126), 1224-1236.
- Roth, G. A., Mensah, G. A., Johnson, C. O., Addolorato, G., Ammirati, E., Baddour, L. M., ... GBD-NHLBI-JACC Global Burden of Cardiovascular Diseases Writing Group. (2020). Global burden of cardiovascular diseases and risk factors, 1990-2019: Update from the GBD 2019 study. *Journal of the American College of Cardiology*, 76(25), 2982-3021. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2020.11.010>
- Sevli, O. (2022). Farklı sınıflandırıcılar ve yeniden örnekleme teknikleri kullanılarak kalp hastalığı teşhisine yönelik karşılaştırmalı bir çalışma. *Journal of Intelligent Systems: Theory and Applications*, 5(2), 92-105.
- Sungur, F., & Bakır, H. (2024). Hiperparametre ayarlama ve veri dengelemenin kalp hastalığı tahmini için kullanılan makine öğrenimi algoritmaları üzerindeki etkilerinin incelenmesi. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 17(1), 45-58.
- Takcı, H. (2022). Optimum parametreler yardımıyla performansı artırılmış KNN algoritması tabanlı kalp hastalığı tahmini. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 38(1), 451-460.
- Topol, E. J. (2019). High-performance medicine: The convergence of human and artificial intelligence. *Nature Medicine*, 25(1), 44-56. <https://doi.org/10.1038/s41591-018-0300-7>
- Uzun, R., Isler, Y., & Toksan, M. (2018, October). Use of support vector machines to predict the success of wart treatment methods. In *2018 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU)* (pp. 1-4). IEEE.
- Uzun, R., İşler, Y., & Toksan, M. (2019). WEKA yazılım paketinin siğil tedavi yöntemlerinin başarısının tahmininde kullanımı. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(1), 699-708.

- Ünlü, O., Ünlü, H., & Atay, Y. (2022). Kalp hastalığı teşhisinde yapay zekâ yöntemlerinin kullanımı ve karşılaştırılması. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 10(2), 396–411.
- Vatansever, B., Aydın, H., & Çetinkaya, A. (2021). Genetik algoritma yaklaşımıyla öznelik seçimi kullanılarak makine öğrenmesi algoritmaları ile kalp hastalığı tahmini. *Journal of Science, Technology and Engineering Research*, 2(2), 67–80.
- Yadav, A. L., Soni, K., & Khare, S. (2023). Heart diseases prediction using machine learning. In *Proceedings of the 14th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT)** (pp. 1–7). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCCNT56998.2023.10306469>
- Yapıcı, İ. Ş., & Arslan, R. U. (2024). Gebelikte Anne Sağlığı Risk Gruplarının Tahmini-ne Yönelik Makine Öğrenmesi Tabanlı Bir Karar Destek Sistem Tasarımı. *Black Sea Journal of Engineering and Science*, 7(3), 509-520.
- World Health Organization. (2025). Cardiovascular diseases (CVDs). Retrieved August 8, 2025, from [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-\(cvds\)](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-(cvds))



SENSÖR TEKNOLOJİSİNİN TEMELLERİ VE GELİŞİM SÜRECİ

“ ”

Zülfü TÜYLEK¹

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

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
- Sağlık: Hasta izleme, mobil teşhis cihazları, biyobelirteç izleme sistemleri
- Tarım ve gıda güvenliği: 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 kirliliği, toprak erozyonu ve radyasyon ölçümleri
- Savunma ve güvenlik: Sınır güvenliği, 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 değerlendirilecektir (Wang, Zhang ve Zhang, 2015).

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

1. Tanım 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).

2. Sensör Türleri

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

2.1. 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).

2.2. 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).

2.3. 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).

3. Temel Bileşenler ve Çalışma Prensipleri

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.

3.1. 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 tanıyarak ve bir biyokimyasal reaksiyonu başlatır (Turner, 2013). Fiziksel sensörler ise termokupllardaki sıcaklık farklılıklarına duyarlı metal kontaklar kullanırken, manyetik sensörler manyetik alan değişikliklerini algılayan malzemeler kullanır (Fraden, 2016).

3.2. 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).

3.3. 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.

3.4. 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).

4. Sensör Teknolojisinin Tarihçesi ve Evrimi

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 üretilabilmektedir.

- **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	Kaynak
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	Kaynak
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.

5. Akıllı Sensörler ve Nesnelerin İnterneti (IoT) Uygulamaları

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.

5.1 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 uyarabilirler. 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).

5.2 Nesnelerin İnterneti ile Entegrasyon

Nesnelerin İnterneti (IoT), fiziksel cihazların internet ağına bağlandığı ve birbirleriyle ve merkezi sistemlerle iletişim kurduğu bir ekosistemdir. 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.

6. Performans Parametreleri

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).

6.1 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).

6.2 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 özgüllüğüyle sağlanır.

6.3 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).

6.4 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).

6.5 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).

7. Sensör Teknolojilerinin Güncel Uygulama Alanları ve Kritik Roller

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 oluş-

turmaktadır. 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 ağları, 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 ağları 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 Roller

Uygulama Alanı	Kritik Roller	Örnek Sensör Türleri	Kaynak
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 Askeri 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.

KAYNAKLAR

- 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>