

MÜHENDİSLİKTE KURAM, ARAŞTIRMA VE TARTIŞMALAR

Editör

Dr. Öğr. Üyesi Burçin Yılmaz



MÜHENDİSLİKTE KURAM, ARAŞTIRMA VE TARTIŞMALAR

Editör

Dr. Öğr. Üyesi Burçin YILMAZ*



Mühendislikte Kuram, Araştırma ve Tartışmalar

Editör: Dr. Öğr. Üyesi Burçin YILMAZ

Genel Yayın Yönetmeni: Berkan Balpetek

Kapak ve Sayfa Tasarımı: Duvar DESIGN

Basım Tarihi: 30 Eylül 2026

Yayıncı Sertifika No: 49837

E-ISBN: 978-625-5471-07-9

© Duvar Yayınları

853 Sokak No:13 P.10 Kemeraltı-Konak/İzmir

Tel: 0 232 484 88 68

www.duvar yayinlari.com

duvarkitabevi@gmail.com

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

İÇİNDEKİLER

1. Bölüm	1
Kardiyovasküler Hastalıkların Yönetiminde	
Giyilebilir Biyosensör Teknolojileri	
Esra ARMAĞAN, Muhammed Emin BEDİR	
2. Bölüm	24
7 Katlı Bir Konut Binası İçin Isıtma Sistemi Seçimi: Kömür ve Doğalgazın	
Karşılaştırmalı Analizi	
Tarek ALSARAN, Mustafa Tahir AKKOYUNLU	
3. Bölüm	43
Genetik Algoritmanın Güncel Çalışmalarla	
Farklı Alanlarda Kullanımı	
Oben ADAK, Mehmet ACI	
4. Bölüm	58
Yapay Sinir Ağları Kullanan Güncel Çalışmaların Analizi	
Oben ADAK, Mehmet ACI	

1. Bölüm

Kardiyovasküler Hastalıkların Yönetiminde Giyilebilir Biyosensör Teknolojileri

Esra ARMAĞAN¹, Muhammed Emin BEDİR²

1. Giriş

Kardiyovasküler hastalıklar (KVH), dünya genelinde hastalık yükünün en önemli nedenlerinden biri olup, aynı zamanda ölümlerin başlıca sebebinin oluşturmaktadır (Tsao ve diğerleri, 2022). Dünya genelinde milyonlarca insanı etkileyen bu hastalıkların görülme sıklığı giderek artmakta ve erken tanı ile etkin tedavi yaklaşımlarının önemini daha da artırmaktadır. KVH'lar çoğu zaman damarların daralması veya tıkanması sonucu kalbin normal fonksiyonlarının bozulmasıyla ortaya çıkar. Bu durum dokulara yeterli oksijen ve besin taşınmasını engelleyerek organ hasarına, ilerleyen vakalarda ise ani kardiyak ölüm gibi ciddi sonuçlara yol açabilir. Her ne kadar KVH'ların patofizyolojisi farklılık gösterse de, çoğu hastalık zamanında müdahale edilmediğinde yaşamı tehdit eden komplikasyonlara neden olmakta ve hastaların yaşam kalitesini önemli ölçüde düşürmektedir (Michaud ve diğerleri, 2022).

Kronik hastalıkların aksine KVH'lar çoğu zaman hızlı başlangıçlı klinik belirtiler gösterir. Bu nedenle hastalığın erken evrede tanınması, uygun tedavinin gecikmeden uygulanması ve hastaların sürekli izlenmesi büyük önem taşımaktadır. Erken tanıyı desteklemek amacıyla, bakım noktasında kullanılabilecek, taşınabilir ve sürekli izleme yapabilen biyosensör sistemlerinin geliştirilmesi son yıllarda yoğun ilgi görmektedir. Bu biyosensörlerin pikomolar düzeylerde biyobelirteçleri yüksek seçicilik, yüksek duyarlılık, kısa analiz süresi ve yüksek doğrulukla tespit edebilmesi beklenmektedir (Mansouri ve diğerleri, 2023). Ayrıca ideal bir biyosensörün düşük maliyetli, seri üretime uygun, güvenilir ve uzman olmayan kullanıcılar tarafından da kolaylıkla kullanılabilecek özelliklere sahip olması gerekmektedir. Böylece hastalar, KVH'ların farklı evrelerinde hızlı ve kolay bir şekilde izlenebilecektir (Haleem ve diğerleri, 2021).

¹ Öğr. Gör., Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Ermenek Uysal ve Hasan Kalan Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Karaman, Türkiye,
ORCID: 0000-0002-5414-2392

² Dr. Öğr. Üyesi, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Karaman, Türkiye
ORCID: 0000-0002-4428-1241

Biyosensör teknolojilerindeki gelişmeler sayesinde, son on yılda giyilebilir ve esnek tanı sistemlerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar önemli ölçüde hız kazanmıştır. Bu sistemler, bireylerin sağlık durumunu kesintisiz olarak takip edebilmek amacıyla çeşitli fizyolojik parametreleri ve biyobelirteçleri sürekli izleyebilmektedir. Günümüzde geliştirilen yeni nesil cihazlar, mevcut sistemlere göre daha yüksek performans, daha fazla kullanıcı konforu ve uzun süreli izleme olanağı sunacak şekilde tasarlanmaktadır (Liu ve diğerleri, 2023; Wang ve diğerleri, 2023).

Giyilebilir biyosensörler, karmaşık tıbbi işlemlere ihtiyaç duyulmaksızın doğrudan vücut üzerine yerleştirilebilmekte ve biyoelektronik bileşenler yardımıyla kan glukozu, vücut sıcaklığı, nabız, kalp hızı ve benzeri birçok yaşamsal parametreyi ölçebilmektedir. Sürekli izleme sırasında invaziv yöntemlere gereksinim duyulmaması, bu sistemlerin en önemli avantajlarından biridir. Bunun yanında, yaşamsal bulgulardaki ani değişikliklerin gerçek zamanlı olarak belirlenebilmesi sayesinde hem sağlık profesyonelleri hem de hastalar gerekli durumlarda hızlı şekilde bilgilendirilebilmekte ve tedaviye zamanında başlanabilmektedir. Bu özellikleri nedeniyle giyilebilir biyosensörler; hastalık salgınlarının izlenmesi, klinik araştırmalar, tele-tıp uygulamaları, ameliyat sonrası hasta takibi, çevresel izleme ve genel sağlık hizmetlerinde giderek daha yaygın şekilde kullanılmaktadır (Kazanskiy ve diğerleri, 2024).

2. Kardiyovasküler Hastalıklarda İzlenmesi Gereken Biyobelirteçler

2.1. Algılama Sinyalleri ve Biyobelirteçler

KVH'ların erken dönemde belirlenmesi, kalbin oluşturduğu fizyolojik sinyallerin ve kanda bulunan biyobelirteçlerin izlenmesiyle mümkündür. Klinik uygulamalarda kalp sağlığının değerlendirilmesi amacıyla elektrokardiyogram (EKG), fonokardiyogram (PKG), fotopletismografi (PPG), nabız dalga hızı (Pulse Wave Velocity, PWV) ve kan basıncı gibi çeşitli biyosinyaller rutin olarak kullanılmaktadır. Bu sinyaller sayesinde bireyin kardiyovasküler sistemi hakkında kapsamlı bilgiler elde edilmekte ve hastanın KVH geliştirme riski değerlendirilebilmektedir (Evdochim ve diğerleri, 2023).

Günümüzde bu biyosinyaller hem hastanelerde kullanılan gelişmiş tanı sistemleri hem de ev ortamında kullanılabilen taşınabilir giyilebilir cihazlar aracılığıyla gerçek zamanlı olarak izlenebilmektedir. Bunun yanı sıra kreatin kinaz-MB (CK-MB), miyogloblin ve kardiyak troponin gibi biyobelirteçlerin kandaki düzeyleri de kardiyovasküler sistemde meydana gelen hasarın belirlenmesinde önemli göstergeler olarak kabul edilmektedir (Nejati-Koshki ve diğerleri, 2023). Özellikle konjestif kalp yetmezliği ve akut miyokard enfarktüsü gibi hastalıklarda bu biyobelirteçlerin kandaki konsantrasyonları belirgin şekilde

artmaktadır. Günümüzde bu biyobelirteçlerin ölçümü çoğunlukla antijen-antikor etkileşimine dayanan immünolojik laboratuvar testleriyle gerçekleştirilmektedir. Ancak bu yöntemlerin zaman alıcı olması, hızlı tanı sağlayabilen yeni biyosensör teknolojilerine olan gereksinimi artırmaktadır (Tang ve diğerleri, 2023).

2.1.1. Elektrokardiyogram (EKG)

Elektrokardiyogram (EKG), kardiyologlar tarafından invaziv olmayan en önemli tanı araçlarından biri olarak kullanılmaktadır. EKG, cilt yüzeyine belirli anatomik noktalara yerleştirilen elektrotlar aracılığıyla kalbin elektriksel aktivitesinin kaydedilmesine dayanır. Her kalp atımı sinoatriyal düğümde başlayan elektriksel uyarı ile başlar ve bu uyarı önce atriumlara, ardından ventriküllere iletilerek kalp kasının kasılmasını sağlar. Bu elektriksel iletim sırasında oluşan sinyaller elektrotlar tarafından algılanarak EKG dalga formu elde edilir (Sabherwal ve diğerleri, 2023).

Tipik bir EKG sinyali P dalgası, QRS kompleksi ve T dalgasından oluşmaktadır. P dalgası, atriyumların depolarizasyonunu, QRS kompleksi, ventriküllerin depolarizasyonunu, T dalgası ise ventriküllerin repolarizasyonunu göstermektedir. Bu dalga formlarının analizi kalbin elektriksel aktivitesinin değerlendirilmesinde temel rol oynar (Berkaya ve diğerleri, 2018). EKG sinyalleri kullanılarak kalp atım hızı ve kalp ritmi kolaylıkla belirlenebilmektedir. Ayrıca zaman ve frekans domenlerinde gerçekleştirilen analizlerle kalp hızı değişkenliği (HRV) hesaplanabilmektedir. HRV, sempatik ve parasempatik sinir sistemlerinin kalp üzerindeki etkilerini yansıttığından kardiyovasküler sistemin nörolojik düzenlenmesi hakkında önemli bilgiler sunmaktadır (Duong ve diğerleri, 2019). Özellikle KVH açısından yüksek risk taşıyan bireylerde HRV'nin değerlendirilmesi oldukça değerlidir. EKG sinyallerinin ayrıntılı analizi; miyokard enfarktüsü, aritmiler ve diğer kardiyovasküler hastalıkların tanısında önemli katkılar sağlamaktadır. Bununla birlikte geleneksel EKG ölçümlerinde çok sayıda elektrodun vücudun belirli bölgelerine yerleştirilmesi gerekmektedir. Bu durum cihazların taşınabilirliğini azaltmakta ve uzun süreli sürekli izlemeyi zorlaştırmaktadır. Bu nedenle günümüzde esnek, hafif ve giyilebilir EKG sistemlerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar hız kazanmıştır (Zhang ve diğerleri, 2023).

2.1.2. Fonokardiyografi (PKG)

Fonokardiyografi (PKG), kalbin çalışma sırasında oluşturduğu seslerin invaziv olmayan yöntemlerle kaydedilmesine dayanan önemli bir tanı tekniğidir (Jaros ve diğerleri, 2023). Uzun yıllardır stetoskop yardımıyla kalp kapaklarının açılıp kapanması sırasında oluşan sesler değerlendirilerek kardiyovasküler sistemdeki olası anormallikler belirlenmektedir. Fonokardiyografi ise bu seslerin

dijital olarak kaydedilmesini ve ayrıntılı analizini mümkün kılmaktadır. Kalp sesleri genel olarak S1, S2, S3 ve S4 olmak üzere dört ana bileşenden oluşmaktadır (Ismail ve diğerleri, 2018). S1 sesi atriyoventriküler kapakların kapanmasını, S2 sesi semilunar kapakların kapanmasını, S3 ve S4 sesleri ise çoğunlukla patolojik durumlarla ilişkili ek kalp seslerini ifade etmektedir.

Bu seslerin şiddeti ve frekans özelliklerinin analiz edilmesiyle kalp kapak hastalıkları, kan akışındaki bozukluklar ve çeşitli kardiyak patolojiler değerlendirilebilmektedir (Kalaivani ve diğerleri, 2018).

2.1.3. Nabız Dalga Hızı (PWV) ve Kan Basıncı

Kan basıncı, dolaşım sırasında kanın damar duvarlarına uyguladığı kuvveti ifade eder ve kardiyovasküler sağlığın değerlendirilmesinde temel parametrelerden biridir (Li ve diğerleri, 2023). Kalbin kanı pompalama etkinliğini ve dokulara oksijen ile besin taşınmasını doğrudan yansıtmaktadır. Hipertansiyon, arter duvarlarına uygulanan basıncın normal değerlerin üzerine çıkması sonucu oluşmakta ve çoğu zaman belirti vermeden ilerleyerek kalp krizi, koroner arter hastalığı ve damar hasarı gibi ciddi komplikasyonlara neden olabilmektedir (Valencia-Hernández ve diğerleri, 2022).

Nabız dalga hızı (PWV), kan basıncı dalgasının arter boyunca yayılma hızını ifade eden önemli bir biyofiziksel parametredir. PWV değerinin artması arter duvarlarının sertleştiğini göstermekte olup kardiyovasküler risk değerlendirmesinde önemli bir belirteç olarak kabul edilmektedir. Klinik uygulamalarda karotis ve femoral arterler arasında ölçülen nabız dalga hızı, kardiyovasküler olay riskinin tahmininde yaygın olarak kullanılmaktadır. Mevcut ticari sistemler PWV ölçümü yapabilmesine rağmen daha hassas, düşük maliyetli ve taşınabilir giyilebilir biyosensörlerin geliştirilmesi bu alandaki araştırmaların temel hedeflerinden biridir.

2.1.4. Kardiyovasküler Hastalıklara Özgü Biyobelirteçler

KVH'lara özgü biyobelirteçler, kalp dokusunda meydana gelen hasar sonucunda kana salınan biyomoleküllerdir. Kalp kasında inflamasyon gelişmesi veya miyokardın yeterli oksijen alamaması durumunda bu biyobelirteçlerin kandaki konsantrasyonları belirgin şekilde yükselir ve kardiyovasküler hastalık riskinin değerlendirilmesinde önemli göstergeler olarak kullanılır (De Sousa ve diğerleri, 2021). Son yıllarda özellikle orta bölge pro-atrilyal natriüretik peptit (MR-proANP), N-terminal pro-B tipi natriüretik peptit (NT-proBNP), CD40, miyeloperoksidaz (MPO), C-reaktif protein (CRP), kreatin kinaz-MB (CK-MB), miyogloblin ve kardiyak troponin gibi biyobelirteçler KVH'ların erken tanısı amacıyla yoğun şekilde araştırılmıştır (Dhara ve Mahapatra, 2020).

Erken tanıda kullanılacak biyosensörlerin; düşük algılama limiti, düşük tayin limiti, yüksek duyarlılık, yüksek seçicilik, kısa analiz süresi, geniş doğrusal çalışma aralığı ve uzun dönem kararlılık gibi temel analitik performans özelliklerine sahip olması gerekmektedir. Bu özellikler sayesinde biyobelirteçlerin çok düşük konsantrasyonlarda güvenilir biçimde tespit edilmesi mümkün olmaktadır (Duque-Ossa ve diğerleri, 2023).

Kardiyak Troponin

Kardiyovasküler biyobelirteçler arasında kardiyak troponin, özellikle akut miyokard enfarktüsünün erken tanısında en güvenilir biyobelirteç olarak kabul edilmektedir. Bunun temel nedeni, miyokard hasarı meydana geldiğinde troponinin kısa sürede kana salınması ve kandaki düzeyinin hızla yükselmesidir. Kardiyak troponin iki ana alt tipten oluşmaktadır:

-Kardiyak Troponin I (cTnI)

-Kardiyak Troponin T (cTnT)

Her iki biyobelirteç de miyokard enfarktüsünün erken döneminde tespit edilebilmekte ve kandaki konsantrasyonları yaklaşık 14 gün boyunca yüksek seviyelerde kalabilmektedir. Bu nedenle hem erken tanıda hem de hastalığın takibinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Kim ve diğerleri, 2022). Sağlıklı bireylerde kardiyak troponin I düzeyi yaklaşık 1 pg/mL iken, miyokard enfarktüsü geçiren hastalarda bu değer 100 pg/mL veya daha yüksek seviyelere ulaşabilmektedir (Çimen ve diğerleri, 2020).

Miyogloblin

Miyogloblin, kas dokusunda oksijen depolayan bir proteindir ve kalp kası hasarı oluştuğunda hızla dolaşıma geçmektedir. Akut miyokard enfarktüsünün başlamasından sonraki ilk 30 dakika içerisinde kandaki miyogloblin düzeyinde belirgin artış gözlenmektedir. Bu nedenle miyogloblin, erken tanıda önemli biyobelirteçlerden biri olarak değerlendirilmektedir. Ancak miyogloblin yalnızca kalp kasına özgü değildir; iskelet kası hasarında da yükseldiği için özgüllüğü troponine göre daha düşüktür. Bu nedenle klinik uygulamalarda genellikle troponin ve diğer kardiyak biyobelirteçlerle birlikte değerlendirilmektedir (Aydin ve diğerleri, 2019).

Kreatin Kinaz-MB (CK-MB)

CK-MB, miyokard hasarının belirlenmesinde uzun yıllardır kullanılan önemli enzim biyobelirteçlerinden biridir. Miyokard enfarktüsünden yaklaşık 5 saat sonra kandaki düzeyi yükselmeye başlamakta ve 24 saat içerisinde maksimum seviyeye ulaşmaktadır. Bu nedenle CK-MB düzeyinin belirlenmesi, miyokard

hasarının büyüklüğünün değerlendirilmesinde önemli bilgiler sağlamaktadır (Xu ve diğerleri, 2020). Bununla birlikte CK-MB'nin molekül ağırlığının yüksek olması nedeniyle çok küçük düzeydeki kalp kası hasarlarını belirlemedeki başarısı sınırlıdır. Ayrıca dolaşımında CK-MB'nin farklı izoformlara ayrılması nedeniyle özellikle CK-MB2/CK-MB1 oranının değerlendirilmesi akut miyokard enfarktüsünün tanısında daha yüksek doğruluk sağlamaktadır (Aydın ve diğerleri, 2019).

İnflamatuvar Kardiyovasküler Biyobelirteçler

Miyokard enfarktüsü dışında kardiyovasküler inflamasyonun değerlendirilmesinde kullanılan birçok biyobelirteç bulunmaktadır. Bunlar arasında;

- Serbest yağ asitleri
- İskemi modifiye albümin (IMA)
- CD40 ligand proteinini
- Miyeloperoksidaz (MPO)
- C-reaktif protein (CRP)

öne çıkan biyobelirteçlerdir (Singh ve diğerleri, 2010). Bu biyobelirteçler doğrudan tanı koymaktan ziyade, kronik kardiyovasküler riskin değerlendirilmesinde ve koruyucu tedavi stratejilerinin planlanmasında önemli rol oynamaktadır. Özellikle CRP, kardiyak inflamasyonun en yaygın kullanılan göstergelerinden biridir (Arnett ve diğerleri, 2019).

BNP ve NT-proBNP

Kalp yetmezliği tanısında son yıllarda en fazla önem kazanan biyobelirteçler B tipi natriüretik peptit (BNP) ve N-terminal pro-B tipi natriüretik peptit (NT-proBNP) olmuştur. Kardiyomiyositlerin gerilmesi sonucunda bu biyobelirteçlerin kana salınımı hızla artmaktadır. Bu nedenle BNP ve NT-proBNP, özellikle kalp yetmezliği ve akut koroner sendromun erken tanısında oldukça değerli biyobelirteçler olarak kabul edilmektedir. Çok sayıda klinik çalışma bu biyobelirteçlerin tanısal önemini doğrulamıştır (Karolina ve diğerleri, 2020).

Yeni Nesil Kardiyovasküler Biyobelirteçler

Günümüzde prognostik değeri araştırılan birçok yeni biyobelirteç bulunmaktadır. Bunlar arasında;

- Atriyal natriüretik peptit (ANP)
- MR-proANP
- Growth Differentiation Factor-15 (GDF-15)

-Kopeptin (Copeptin)

en dikkat çekici adaylar arasındadır. Ayrıca miyeloperoksidazın diğer kardiyak biyobelirteçlerle birlikte değerlendirilmesi, özellikle akut koroner sendrom hastalarında prognozun belirlenmesine önemli katkılar sağlamaktadır.

Kardiyovasküler biyobelirteçler yüksek duyarlılık ve seçicilik sunmalarına rağmen tek başlarına kesin tanı koymak için yeterli değildir. Hastalığın ilerleyişi sırasında biyobelirteç düzeyleri zamanla değişebilmekte ve farklı biyobelirteçler farklı zamanlarda yükselmektedir. Bu nedenle günümüzde en doğru yaklaşım, birden fazla biyobelirtecini birlikte değerlendirilmesi ve biyobelirteç sonuçlarının elektrokardiyografi, görüntüleme yöntemleri ve klinik bulgular ile birlikte yorumlanmasıdır. Bu yaklaşım hem erken tanının doğruluğunu artırmakta hem de hasta yönetiminin daha etkin şekilde planlanmasına olanak sağlamaktadır.

2.2. İleri Algılama Teknikleri

2.2.1. Giyilebilir Elektrofizyolojik Cihazlar

KVH'ların yönetiminde hastaların kalp fonksiyonlarının uzun süreli ve kesintisiz olarak izlenmesi büyük önem taşımaktadır. Kalbin elektriksel ve mekanik aktivitesi sırasında oluşan biyosinyaller, hastanın kardiyovasküler durumu hakkında ayrıntılı bilgi sağlamaktadır. Bu nedenle EKG, fotopletizmografi (PPG), PKG, PWV ve kan basıncı gibi fizyolojik parametrelerin uzun süre boyunca sürekli olarak izlenmesi gerekmektedir (Lin ve diğerleri, 2021).

Günümüzde kullanılan geleneksel kardiyovasküler izleme sistemleri bu biyosinyalleri yüksek doğrulukla ölçebilmesine rağmen, büyük boyutları, taşınabilir olmamaları ve sürekli enerji kaynağına ihtiyaç duymaları nedeniyle uzun süreli günlük kullanım için uygun değildir. Bu nedenle araştırmacılar, bireyin günlük yaşamını kısıtlamadan çalışabilen, hafif, esnek ve invaziv olmayan giyilebilir biyosensörlerin geliştirilmesine odaklanmıştır. Bu cihazlarda elektrotların cilt ile uzun süre güvenilir temas sağlayabilmesi, ölçüm doğruluğu açısından kritik öneme sahiptir. Ayrıca sinyal-gürültü oranı (SNR), güç tüketimi ve örnekleme frekansı gibi performans kriterleri, yeni nesil biyosensörlerin değerlendirilmesinde temel parametreler olarak kabul edilmektedir.

Giyilebilir EKG Sistemlerindeki Son Gelişmeler

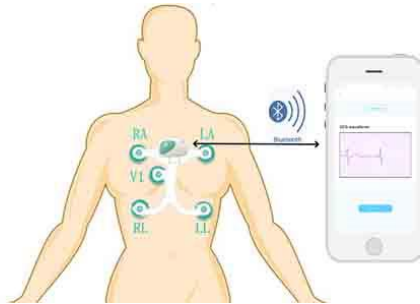
Son yıllarda biyomühendislik alanındaki gelişmeler sayesinde gerçek zamanlı veri toplayabilen yeni nesil giyilebilir EKG sistemleri geliştirilmiştir. Akıllı saatler kalp atım hızını ölçbilse de klinik tanı için gerekli ayrıntılı EKG verilerini sağlayamamaktadır. Bu nedenle geliştirilen yeni sistemlerin gerçek zamanlı EKG

kaydı yapabilmesi, kablosuz veri aktarımı gerçekleştirebilmesi ve elde edilen verileri anında işleyebilmesi hedeflenmektedir.

Wang ve arkadaşları düşük güç tüketimine sahip taşınabilir bir EKG cihazı geliştirmiştir. Bu sistem:

- 0,4 kHz örnekleme frekansında EKG kaydı yapabilmektedir.
- Çalışma sırasında yalnızca 3,6 mA akım tüketmektedir.
- Bluetooth tabanlı kablosuz haberleşme modülü içermektedir.
- Güç yönetim sistemi sayesinde uzun süre kesintisiz çalışabilmektedir.
- Esnek baskılı devre teknolojisi kullanılarak üretilmiştir.

Bu cihazda geleneksel Ag/AgCl elektrotlar yerine yüksek elektriksel iletkenliğe sahip bakır elektrotlar tercih edilmiştir. Elektrotların özel yerleşimi sayesinde kullanıcıların elektrot yerleşimi konusunda bilgi sahibi olmasına gerek kalmadan cihaz kolaylıkla kullanılabilir. Ayrıca tek kullanımlık iletken jel kullanılması hem elektrotların cilde güçlü şekilde tutunmasını sağlamakta hem de alerjik reaksiyon riskini azaltmaktadır. Sistemin düşük enerji tüketimi sayesinde 137 saate kadar sürekli EKG kaydı yapılabilirdiği bildirilmiştir (Şekil 1) (Wang ve diğerleri, 2022).



Şekil 1. Düşük güçlü, çok kanallı giyilebilir EKG sistemi (Wang ve diğerleri, 2022)

Kuru Elektrot (Dry Electrode) Teknolojileri

Uzun süreli EKG kayıtlarında jel elektrotların kuruması ve cilt tahrişine neden olması önemli bir problemdir. Bu nedenle araştırmacılar jel kullanılmadan çalışan kuru elektrot sistemleri geliştirmektedir.

Pullano ve arkadaşları yaptıkları çalışmada polidimetilsiloksan (PDMS) içerisine sodyum bazlı zeolit parçacıkları yerleştirilerek kompozit bir elektrot geliştirmiştir (Şekil 2). Bu yeni elektrot;

- oldukça ince yapıdadır,
- yüksek elektriksel iletkenlik göstermektedir,
- yaklaşık 240 mV sinyal genliği üretebilmektedir,

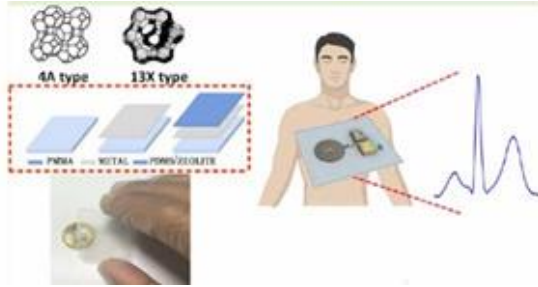
-cilt alerjisi riskini önemli ölçüde azaltmaktadır.

-yüksek sinyal-gürültü oranına,

-yüksek giriş empedansına,

-hareket artefaktlarından daha az etkilenen bir yapıya sahiptir.

Araştırmacılar gelecekte bu elektrotların anten sistemleriyle birleştirilerek kablosuz veri aktarımı sağlayan tamamen giyilebilir EKG platformlarının geliştirilebileceğini öngörmektedir (Pullano ve diğerleri, 2022).



Şekil 2. Giyilebilir EKG takibi için optik olarak göze çarpmayan zeolit tabanlı kuru elektrotlar (Pullano ve diğerleri, 2022).

Giyilebilir Fonokardiyografi Sistemleri

Kalbin oluşturduğu mekanik-akustik sinyaller de kardiyovasküler sağlığın değerlendirilmesinde önemli bilgiler sağlamaktadır. Geleneksel stetoskop muayenelerinde elde edilen sonuçlar büyük ölçüde hekimin deneyimine bağlıdır. Bu nedenle kalp seslerini dijital olarak kaydedebilen giyilebilir fonokardiyografi sistemleri geliştirilmektedir (Qu ve diğerleri, 2022).

Makalede tanıtılan sistemlerden biri, alüminyum nitrür piezoelektrik membran kullanan mikroeletromekanik bir biyosensördür. Kalp sesleri membranda titreşim oluşturmakta ve bu mekanik titreşim elektrik sinyaline dönüştürülmektedir. Sistemde;

- düşük seviyeli sinyalleri yükselten elektronik devreler,
- dış ortam gürültüsünü azaltan filtreler,
- biyolojik sinyallerin daha doğru algılanmasını sağlayan yüksek geçiren filtreler

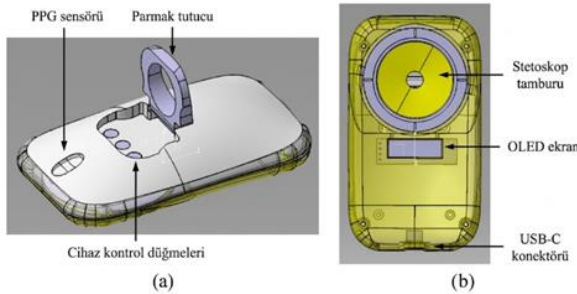
bulunmaktadır. Böylece kalp sesleri yüksek doğrulukla kaydedilebilmektedir. Araştırmacılar ayrıca silikon ve hava boşluklarından oluşan kompozit bir yapı kullanarak mekanik sönümlemeyi azaltmış ve 13,6 dB sinyal-gürültü oranına ulaşmıştır. Bu performans birçok dijital stetoskoptan daha yüksektir (Park ve diğerleri, 2022).

Akıllı Stetoskoplar

Çok modlu çalışan yeni nesil akıllı stetoskoplarda (Şekil 3):

- Parmak ucuna yerleştirilen **PPG sensörü** ile nabız dalgaları ölçülmekte,
- Göğüs üzerine yerleştirilen elektronik stetoskop ile **S1** ve **S2** kalp sesleri aynı anda kaydedilmektedir.

Bu sayede hem mekanik hem de optik kardiyovasküler sinyaller eş zamanlı analiz edilebilmektedir. Çok modlu sistemler klasik stetoskoplara göre daha kapsamlı klinik bilgi sunmaktadır (Park ve diğerleri, 2022).



Şekil 3. Önerilen akıllı stetoskop şeklinin tasarımı: (a) cihazın üst kısmı ve (b) cihazın alt kısmı (Park ve diğerleri, 2022)

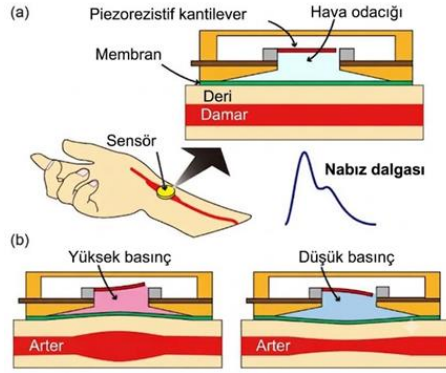
Nabız Dalga Hızı ve Kan Basıncı İçin Giyilebilir Sensörler

Son yıllarda biyomalzemeler, kablosuz iletişim teknolojileri ve mikroelektronik alanındaki gelişmeler sayesinde nabız dalga hızı ve kan basıncını sürekli ölçebilen giyilebilir sistemler geliştirilmiştir. Bu sensörlerde genellikle;

- kapasitif sensörler,
- piezoelektrik sensörler,
- piezorezistif sensörler

tercih edilmektedir. Bu sensörler mekanik deformasyonu elektrik sinyaline dönüştürerek çalışmaktadır (Kim ve diğerleri, 2019).

Makalede elastomerik dielektrik tabaka ile altın ince film kullanılarak geliştirilen bir basınç sensörünün $0,15 \text{ kPa}^{-1}$ duyarlılığa ulaştığı belirtilmektedir. Ayrıca mikroeletromekanik sistem (MEMS) tabanlı piezorezistif kantilever sensörleri kullanılarak nabız dalga hızının yüksek doğrulukla ölçülebildiği gösterilmiştir (Şekil 4). PWV hesaplamasında iki farklı noktadan eş zamanlı sinyal alınması gerekmektedir (Nguyen ve diğerleri, 2020).



Şekil 4. Önerilen nabız dalgası ölçüm sensörünün kavramsal şematik diyagramı: (a) Sensör; piezodirençli bir kantilever ve esnek bir zarla kaplı bir hazneden oluşmaktadır. (b) Önerilen sensörün algılama prensibi (Nguyen ve diğerleri, 2020)

2.2.2. Optik Fiber Tabanlı ve Elektrokimyasal Biyosensörler

KVH'ların erken tanısı ve sürekli izlenmesinde kullanılan biyosensör teknolojileri son yıllarda önemli ilerlemeler kaydetmiştir. Özellikle **optik fiber tabanlı sensörler** ve **elektrokimyasal biyosensörler**, yüksek duyarlılık, hızlı analiz süresi ve gerçek zamanlı ölçüm yapabilme özellikleri sayesinde klinik uygulamalarda giderek daha fazla ilgi görmektedir. Bu sensörler yalnızca kalbin fizyolojik sinyallerini değil, aynı zamanda KVH'larla ilişkili biyobelirteçleri de yüksek doğrulukla analiz edebilmektedir (Wu ve diğerleri, 2022).

Optik Fiber Tabanlı Biyosensörler

Optik fiber sensörleri, ışığın fiber içerisindeki yayılım özelliklerinde meydana gelen değişimleri algılayarak çalışmaktadır. Elektriksel girişimlerden etkilenmemeleri, yüksek hassasiyet göstermeleri ve elektromanyetik ortamlarda güvenilir ölçüm yapabilmeleri bu sensörlerin en önemli avantajlarıdır. Ayrıca küçük boyutları sayesinde damar içerisine veya kateter sistemlerine entegre edilebilmektedirler.

Makalede, **Fiber Bragg Izgarası (Fiber Bragg Grating, FBG)** tabanlı sensörlerin kardiyovasküler uygulamalarda yaygın olarak kullanıldığı belirtilmektedir (Liu ve diğerleri, 2018). Bu sensörlerde fiber üzerine oluşturulan periyodik kırılma indisi değişimleri sayesinde dalga boyundaki küçük değişimler algılanabilmektedir. Böylece;

- nabız,
- kan basıncı,
- damar duvarı deformasyonu,

- kalp atım hareketleri

yüksek doğrulukla ölçülebilmektedir.

FBG sensörlerinin önemli avantajları şunlardır:

- yüksek biyouyumluluk,
- uzun süreli kararlılık,
- elektromanyetik girişimlerden etkilenmeme,
- çok küçük boyut,
- gerçek zamanlı ölçüm yapabilme.

Bu özellikleri nedeniyle geleceğin implant edilebilir kardiyovasküler sensörleri arasında önemli bir yere sahip oldukları belirtilmektedir.

Elektrokimyasal Biyosensörler

Elektrokimyasal biyosensörler, biyobelirteçlerin elektrot yüzeyinde oluşturduğu elektrokimyasal değişimleri elektriksel sinyallere dönüştürerek analiz yapmaktadır. Son yıllarda özellikle **kardiyak troponin I (cTnI)**, **troponin T (cTnT)**, **BNP**, **NT-proBNP**, **CRP** ve **miyogloblin** tayininde yaygın şekilde kullanılmaktadır.

Bu biyosensörlerde algılama elemanı olarak;

- antikorlar,
- aptamerler,
- enzimler,
- moleküler baskılanmış polimerler (MIP)

kullanılabilmektedir (Singh ve diğerleri, 2021).

Nanomalzeme Destekli Elektrotlar

Nanoteknoloji elektrokimyasal biyosensör performansını önemli ölçüde artırmaktadır.

En sık kullanılan nanomalzemeler şunlardır:

- Altın nanopartiküller
- Gümüş nanopartiküller
- Grafen
- Grafen oksit
- Karbon nanotüpler
- MXene nanomalzemeleri
- İletken polimerler

Bu nanomalzemeler elektrot yüzey alanını artırarak daha fazla biyomolekül bağlanmasına olanak sağlamakta, elektron transfer hızını yükseltmekte ve böylece sensörün duyarlılığını önemli ölçüde artırmaktadır (Sharma ve diğerleri, 2020).

Giyilebilir Elektrokimyasal Sensörler

Son yıllarda geliştirilen elektrokimyasal biyosensörlerin büyük bölümü artık doğrudan deri üzerine uygulanabilmektedir.

Bu sistemlerde analiz edilen biyolojik sıvılar şunlardır:

- Ter
- İnterstisyel sıvı
- Tükürük
- Gözyaşı

Bu biyolojik örneklerde bulunan çeşitli biyobelirteçler kullanılarak bireyin kardiyovasküler durumu invaziv olmayan yöntemlerle değerlendirilebilmektedir. Özellikle mikroakışkan sistemlerle birlikte geliştirilen giyilebilir biyosensörler, biyolojik sıvıları otomatik olarak toplayıp analiz edebilmektedir. Araştırmacılar gelecekte çoklu biyobelirteç analizi yapabilen, tek kullanımlık ve düşük maliyetli sensörlerin kişiselleştirilmiş sağlık hizmetlerinde önemli rol oynayacağını belirtmektedir.

İmplant Edilebilir Kardiyak Sensörler

Bu sistemler doğrudan kalp dokusuna veya damar içerisine yerleştirilebilmekte ve uzun süre boyunca sürekli veri sağlayabilmektedir.

İmplant edilebilir cihazlar sayesinde;

- kalp ritmi,
- intrakardiyak basınç,
- kan akışı,
- oksijen düzeyi,
- elektriksel aktivite

kesintisiz olarak izlenebilmektedir.

Özellikle kalp pili (pacemaker) ve implante edilebilir kardiyoverter defibrilatörler (ICD), yalnızca tedavi amacıyla değil aynı zamanda sürekli fizyolojik veri sağlayan akıllı biyosensör platformları olarak da kullanılmaktadır. Bu cihazlardan elde edilen veriler kablosuz iletişim sistemleri sayesinde hastanelere aktarılabilen ve uzaktan hasta takibi gerçekleştirilebilmektedir (Choi ve diğerleri, 2021).

2.3. Hidrojel Tabanlı Giyilebilir Biyosensörler

Hidrojel tabanlı biyosensörler, yüksek su tutma kapasiteleri, biyoyumumlulukları, mekanik esneklikleri ve biyolojik dokulara benzer fiziksel özellikleri sayesinde son yıllarda giyilebilir biyosensör teknolojilerinde önemli bir araştırma alanı hâline gelmiştir. Hidrojeller üç boyutlu polimer ağ yapısına sahip olup büyük miktarda su absorbe edebilmekte ve bu özellikleri sayesinde

biyolojik sıvılar ile etkin temas kurabilmektedir. Özellikle KVH'ların sürekli izlenmesinde kullanılan giyilebilir sensörlerde hidrojel, hem biyobelirteçlerin taşınmasını kolaylaştırmakta hem de sensör ile cilt arasındaki temas kalitesini artırmaktadır.

Hidrojellerin bir diğer önemli avantajı, yumuşak yapıları sayesinde deri yüzeyine kolayca uyum sağlayabilmeleri ve uzun süreli kullanımlarda kullanıcı konforunu artırmalarıdır. Ayrıca mekanik deformasyona karşı dayanıklı olmaları nedeniyle hareket sırasında oluşabilecek sinyal bozulmalarını azaltmaktadırlar. Bu özellikleri, hidrojelleri sürekli fizyolojik izleme gerektiren giyilebilir biyosensör uygulamaları için ideal malzemeler hâline getirmektedir.

Ter Tabanlı Biyosensörler

Ter, invaziv olmayan şekilde kolaylıkla elde edilebilmesi nedeniyle giyilebilir biyosensörlerde en sık kullanılan biyolojik örneklerden biridir. Ter içerisinde; sodyum, potasyum, klorür, glukoz, laktat, ürik asit, kortizol gibi çok sayıda analit bulunmaktadır (Qiao ve diğerleri, 2023). Son yıllarda yapılan çalışmalar, KVH'larla ilişkili bazı metabolik değişikliklerin ter örneklerinden de izlenebileceğini göstermektedir.

Ter tabanlı biyosensörlerde genellikle mikroakışkan kanallar kullanılarak ter otomatik olarak sensör yüzeyine taşınmakta ve elektrokimyasal analiz gerçekleştirilmektedir. Böylece kullanıcı herhangi bir örnek toplama işlemi yapmadan gerçek zamanlı biyobelirteç takibi mümkün olmaktadır.

İnterstisyel Sıvı Tabanlı Sensörler

İnterstisyel sıvı, hücreleri çevreleyen ve kan plazmasına benzer biyokimyasal içeriğe sahip olan biyolojik bir sıvıdır. Pek çok biyobelirtecin konsantrasyonu, interstisyel sıvıda kan ile yüksek korelasyon göstermektedir. Bu nedenle son yıllarda geliştirilen giyilebilir biyosensörlerin önemli bir bölümü interstisyel sıvının analizine yönelmiştir (De la Paz ve diğerleri, 2023).

Özellikle **mikroiğne** tabanlı hidrojel sistemlerinde mikrometre boyutundaki iğneler yalnızca epidermis tabakasına ulaşmakta ve sinir uçlarına erişmediği için uygulama sırasında ağrı hissedilmemektedir. Mikro iğneler aracılığıyla interstisyel sıvı sensör yüzeyine taşınmakta ve biyobelirteç analizi gerçek zamanlı olarak gerçekleştirilmektedir (Ciui ve diğerleri, 2018).

Gözyaşı Tabanlı Biyosensörler

Gözyaşı, son yıllarda biyobelirteç analizi için ilgi gören alternatif biyolojik örneklerden biridir. Gözyaşı içerisinde elektrolitler, proteinler, glukoz ve çeşitli

metabolitler bulunmaktadır. Bu nedenle akıllı kontakt lens teknolojileri kullanılarak gözyaşından biyobelirteç analizi yapılabilmektedir (Jalbert, 2013).

Hidrojel esaslı akıllı kontakt lenslerin biyobelirteçleri sürekli izleyebildiği ve elde edilen verilerin kablosuz sistemlerle mobil cihazlara aktarılabilirdiği belirtilmektedir. Bu sistemlerin özellikle uzun süreli sağlık izlemi açısından önemli avantajlar sunduğu vurgulanmaktadır (Kim ve diğerleri, 2022).

Tükürük Tabanlı Biyosensörler

Tükürük örnekleri de kolay ve ağrısız şekilde elde edilebildiği için giyilebilir biyosensörlerde değerlendirilmektedir. Tükürük içerisinde çeşitli proteinler, enzimler, elektrolitler ve metabolitler yer almaktadır. KVH'larla ilişkili bazı biyobelirteçlerin tükürükte de belirlenebilmesi nedeniyle bu örnek türü, non-invaziv tanı yöntemleri açısından umut verici görülmektedir.

Hidrojellerin Giyilebilir Sensörlerde Sağladığı Avantajlar

Hidrojel tabanlı biyosensörlerin sahip olduğu temel avantajlar şu şekilde özetlenmektedir:

- Yüksek biyouyumluluk
- Esnek ve yumuşak yapı
- Cilt ile güçlü temas
- Yüksek su tutma kapasitesi
- Düşük mekanik sertlik
- Gerçek zamanlı biyobelirteç analizi
- Mikroakışkan sistemlerle uyumluluk
- Uzun süreli kullanım konforu

Bununla birlikte, hidrojellerin mekanik dayanıklılıklarının artırılması, su kaybının önlenmesi ve uzun süreli kararlılıklarının geliştirilmesi gerektiği de belirtilmektedir.

3. Esnek Elektronik Tabanlı Giyilebilir Biyosensörler

Esnek elektronik teknolojileri, insan vücudunun yüzeyine uyum sağlayabilen ve mekanik deformasyonlara rağmen işlevini sürdürebilen giyilebilir sensörlerin geliştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu sistemler özellikle **basınç, hareket, nabız, sıcaklık ve biyokimyasal değişimlerin** sürekli olarak izlenmesine olanak sağlamaktadır.

Esnek elektronik tabanlı sensörler, kullanılan dönüştürücü (transdüser) mekanizmasına göre temel olarak **dirençsel, kapasitif ve piezoelektrik kuvvet sensörleri** şeklinde sınıflandırılmaktadır (Anbuselvam ve diğerleri, 2024).

3.1. Dirençsel Kuvvet Sensörleri

Dirençsel sensörlerde, sensörün üretiminde kullanılan malzemelerin dışarıdan uygulanan bir kuvvet sonucunda elektriksel dirençleri değişmektedir. Meydana gelen bu direnç değişimi elektriksel bir sinyale dönüştürülerek uygulanan kuvvetin büyüklüğü belirlenmektedir.

Esnek dirençsel kuvvet sensörlerinin elektriksel iletkenliğini ve esnekliğini artırmak amacıyla çeşitli iletken dolgu malzemeleri kullanılmaktadır. Bunlar arasında:

- iletken polimerler,
- nanotel yapıları,
- nanopartiküller,
- metalik ince filmler,
- karbon nanotüpler,
- grafen,
- indirgenmiş grafen oksit

yer almaktadır. Bu malzemeler elastomerik kompozitlerin aktif algılama bileşenleri olarak kullanılmakta ve uygulanan dış kuvvetlere bağlı olarak elektriksel özelliklerini değiştirmektedir.

Piezorezistif platforma dayalı esnek dirençsel kuvvet sensörleri; **küçük boyutları, kolay üretilibilmeleri, düşük güç gereksinimleri ve geniş uygulama alanları** nedeniyle giderek daha fazla kullanılmaktadır (Amjadi ve diğerleri, 2014).

3.2. Kapasitif Kuvvet Sensörleri

Kapasitif kuvvet sensörleri, dışarıdan uygulanan özellikle **basınç ve mekanik kuvvetlerdeki değişimleri**, sensörün kapasitansındaki değişim üzerinden algılamaktadır. Dış kuvvet uygulandığında sensörün kapasitansı değişmekte ve bu değişim ölçülerek uygulanan kuvvetin büyüklüğü belirlenmektedir. Tipik bir kapasitif sensör yapısında, iki iletken plaka arasında bir **dielektrik tabaka** bulunmaktadır. İletken plakalar genellikle metal veya başka iletken malzemelerden oluşturulmaktadır. Kapasitif sensörlerin önemli avantajlarından biri, dirençsel sensörlere kıyasla daha yüksek duyarlılık ve daha düşük algılama limitleri sunabilmeleridir.

Organik alan etkili transistör (OFET) tabanlı bir elektronik deri sistemi geliştirilmiştir. Bu sistemde yarı iletken olarak siloksan-polizoidigobitiyofen, dielektrik tabaka olarak ise yüzeyinde mikroölçekli yapılar oluşturulmuş polidimetilsiloksan (PDMS) filmi kullanılmıştır. Sistem **8 kPa'nın altındaki basınçları** algılayabilmiş ve **10 ms'den daha kısa yanıt süresi** ile oldukça yüksek duyarlılık göstermiştir. Bu özellikleri sayesinde bilek nabız dalgalarının

yüksek doğrulukla ölçülmesi açısından umut verici bulunmuştur (Anbuselvam ve diğerleri, 2024).

3.3. Piezoelektrik Kuvvet Sensörleri

Piezoelektrik etki, mekanik bir kuvvetin belirli malzemelere uygulanması sonucunda malzemenin deformasyona uğraması ve bunun sonucunda iç elektrik dipollerinin yeniden yönleneceği olaydır. Bu dipol yönleneceği, kristalin karşılıklı iki yüzeyi arasında bir elektriksel gerilim oluşmasına neden olmaktadır.

Piezoelektrik malzemeler mekanik gerilme uygulandığında doğrudan elektriksel gerilim üretebildikleri için **zaman içerisinde hızlı değişen mekanik sinyallerin algılanması** açısından oldukça uygundur. Bu özellikleri nedeniyle piezoelektrik sensörler, özellikle **kendi kendine enerji üretebilen biyosensörlerin** geliştirilmesinde önemli adaylardır.

Esnek piezoelektrik sensörlerin üretiminde kullanılan başlıca malzemeler arasında:

- kurşun zirkonat titanat (PZT),
- kurşun titanat,
- çinko oksit (ZnO),
- poli(viniliden florür-trifloroetilen) [P(VDF-TrFE)]

bulunmaktadır (Shin ve diğerleri, 2017).

4. Sonuçlar ve Gelecek Perspektifleri

KVH'ların izlenmesi açısından değerlendirildiğinde, kalbin elektriksel sinyallerini ve kandaki biyobelirteçleri aynı anda tespit edebilen tek bir cihazın geliştirilmesi, kalbin fonksiyonu, fizyolojik durumu ve genel sağlık durumu hakkında daha ayrıntılı bilgi elde edilmesini sağlayabilecek umut verici ve gelecekte çığır açabilecek bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir. Bu tür algılama sistemlerinin, hastaların kalp ve damar sistemlerinin işlevlerinin derinlemesine ve ayrıntılı biçimde değerlendirilmesini sağlayarak KVH'ların farklı evrelerinde tanısal doğruluğun geliştirilmesine katkıda bulunması beklenmektedir.

Bu sorunun çözümüne yönelik potansiyel stratejilerden biri, biyolojik sinyallerin izlenmesi, biyobelirteçlerin tespit edilmesi ve çeşitli biyomedikal uygulamaların kontrol edilmesinde kullanılan gelişmiş bir teknoloji olan **biyo-hibrit elektronik sistemlerin** kullanılmasıdır. Biyo-hibrit sensörlerde canlı hücreler giyilebilir biyosensör cihazının içerisine yerleştirilmekte ve bu hücrelerin biyomoleküllerle etkileşime girmesi sağlanmaktadır. Daha sonra biyo-hibrit sensörler, doğal biyolojik süreçler aracılığıyla biyolojik sinyalleri elektriksel sinyallere dönüştürerek karmaşık biyolojik sistemlerdeki spesifik sinyallerin algılanmasını ve ayırt edilmesini mümkün kılmaktadır.

Günümüzde elektronik ve biyolojik bileşenleri bir araya getiren biyo-hibrit elektronik sistemler, kardiyovasküler mühendislik alanında henüz yaygın olarak kullanılmamaktadır. Bununla birlikte, bu sistemlerin KVH'ların izlenmesinde etkili ve yararlı olabileceği düşünülmektedir. Gelecekte araştırmacılar, kalp kası hücrelerinin biyoelektronik cihazlarla bütünleştirilmesi yoluyla kalbin oluşturduğu farklı elektriksel ve fizyolojik sinyal türlerinin algılanmasına yönelik yöntemleri araştırabilirler. Bu biyo-hibrit algılama sistemlerinin davranışlarının hassas biçimde ayarlanabilmesi ve kontrol edilebilmesi, hem **bakım noktasında tıbbi tanı** uygulamaları hem de vücut içine implante edilerek sürekli izleme gerçekleştiren sistemler açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Genel olarak, kardiyovasküler sağlığın izlenmesinde kullanılan mevcut teknolojilerin geliştirilmesi, yeni fikirlerin ortaya konulması ve mevcut sistemlerin iyileştirilmesi açısından önemli fırsatlar bulunmaktadır. KVH'ların tanı ve tedavisinde uygulanan müdahalelerin etkinliğini artırmak amacıyla, giyilebilir sensör sistemlerinin **duyarlılık, algılama limiti, tayin limiti, doğrusallık, seçicilik, tekrarlanabilirlik, yeniden üretilebilirlik, kararlılık ve doğruluk** gibi analitik performans özelliklerinin önemli ölçüde geliştirilmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- Amjadi, M., Pichitpajongkit, A., Lee, S., Ryu, S., & Park, I. (2014). Highly stretchable and sensitive strain sensor based on silver nanowire–elastomer nanocomposite. *ACS nano*, 8(5), 5154-5163.
- Anbuselvam, B., Gunasekaran, B. M., Srinivasan, S., Ezhilan, M., Rajagopal, V., & Nesakumar, N. (2024). Wearable biosensors in cardiovascular disease. *Clinica Chimica Acta*, 561, 119766.
- Arnett, D. K., Blumenthal, R. S., Albert, M. A., Buroker, A. B., Goldberger, Z. D., Hahn, E. J., ... & Ziaecian, B. (2019). 2019 ACC/AHA guideline on the primary prevention of cardiovascular disease: executive summary: a report of the American College of Cardiology/American Heart Association Task Force on Clinical Practice Guidelines. *Journal of the American College of Cardiology*, 74(10), 1376-1414.
- Aydin, S., Ugur, K., Aydin, S., Sahin, İ., & Yardim, M. (2019). Biomarkers in acute myocardial infarction: current perspectives. *Vascular health and risk management*, 1-10.
- Berkaya, S. K., Uysal, A. K., Gunal, E. S., Ergin, S., Gunal, S., & Gulmezoglu, M. B. (2018). A survey on ECG analysis. *Biomedical Signal Processing and Control*, 43, 216-235.
- Choi, Y. S., Yin, R. T., Pfenniger, A., Koo, J., Avila, R., Benjamin Lee, K., ... & Rogers, J. A. (2021). Fully implantable and bioresorbable cardiac pacemakers without leads or batteries. *Nature biotechnology*, 39(10), 1228-1238.
- Ciui, B., Martin, A., Mishra, R. K., Brunetti, B., Nakagawa, T., Dawkins, T. J., ... & Wang, J. (2018). Wearable wireless tyrosinase bandage and microneedle sensors: toward melanoma screening. *Advanced healthcare materials*, 7(7), 1701264.
- Çimen, D., Bereli, N., Günaydın, S., & Denizli, A. (2020). Detection of cardiac troponin-I by optic biosensors with immobilized anti-cardiac troponin-I monoclonal antibody. *Talanta*, 219, 121259.
- De la Paz, E., Saha, T., Del Caño, R., Seker, S., Kshirsagar, N., & Wang, J. (2023). Non-invasive monitoring of interstitial fluid lactate through an epidermal iontophoretic device. *Talanta*, 254, 124122.
- De Sousa, R. A. L., Improta-Caria, A. C., Aras-Júnior, R., de Oliveira, E. M., Soci, Ú. P. R., & Cassilhas, R. C. (2021). Physical exercise effects on the brain during COVID-19 pandemic: links between mental and cardiovascular health. *Neurological Sciences*, 42(4), 1325-1334.

- Dhara, K., & Mahapatra, D. R. (2020). Review on electrochemical sensing strategies for C-reactive protein and cardiac troponin I detection. *Microchemical Journal*, 156, 104857.
- Duong, H. T. H., Tadesse, G. A., Nhat, P. T. H., Van Hao, N., Prince, J., Duong, T. D., ... & Thwaites, L. (2019). Heart rate variability as an indicator of autonomic nervous system disturbance in tetanus. *The American journal of tropical medicine and hygiene*, 102(2), 403.
- Duque-Ossa, L. C., García-Ferrera, B., & Reyes-Retana, J. A. (2023). Troponin I as a biomarker for early detection of acute myocardial infarction. *Current problems in cardiology*, 48(5), 101067.
- Evdochim, L., Dobrescu, D., Dobrescu, L., Stanciu, S., & Halichidis, S. (2023). Left ventricular ejection time estimation from blood pressure and photoplethysmography signals based on tidal wave. *Applied Sciences*, 13(19), 11025.
- Haleem, A., Javaid, M., Singh, R. P., Suman, R., & Rab, S. (2021). Biosensors applications in medical field: A brief review. *Sensors International*, 2, 100100.
- Ismail, S., Siddiqi, I., & Akram, U. (2018). Localization and classification of heart beats in phonocardiography signals—a comprehensive review. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2018(1), 1-27.
- Jalbert, I. (2013). Diet, nutraceuticals and the tear film. *Experimental eye research*, 117, 138-146.
- Jaros, R., Koutny, J., Ladrova, M., & Martinek, R. (2023). Novel phonocardiography system for heartbeat detection from various locations. *Scientific Reports*, 13(1), 14392.
- Kalaivani, V., Devi, R. L., & Anusuyadevi, V. (2018). Phonocardiographic signal and electrocardiographic signal analysis for the detection of cardiovascular diseases. *Biosciences Biotechnology Research Asia*, 15(1), 79-86.
- Karolina, I., Michał, K., & Marzenna, Z. (2020). MR-proANP level predicts new onset atrial fibrillation in patients with acute myocardial infarction. *Biomarkers*, 25(7), 573-577.
- Kazanskiy, N. L., Khonina, S. N., & Butt, M. A. (2024). A review on flexible wearables—Recent developments in non-invasive continuous health monitoring. *Sensors and Actuators A: Physical*, 366, 114993.
- Kim, J., Chou, E. F., Le, J., Wong, S., Chu, M., & Khine, M. (2019). Soft wearable pressure sensors for beat-to-beat blood pressure monitoring. *Advanced healthcare materials*, 8(13), 1900109.
- Kim, S. K., Lee, G. H., Jeon, C., Han, H. H., Kim, S. J., Mok, J. W., ... & Hahn, S. K. (2022). Bimetallic nanocatalysts immobilized in nanoporous

- hydrogels for long-term robust continuous glucose monitoring of smart contact lens. *Advanced Materials*, 34(18), 2110536.
- Kim, S. Y., Lee, J. P., Shin, W. R., Oh, I. H., Ahn, J. Y., & Kim, Y. H. (2022). Cardiac biomarkers and detection methods for myocardial infarction. *Molecular & cellular toxicology*, 18(4), 443-455.
- Li, S., Wang, H., Ma, W., Qiu, L., Xia, K., Zhang, Y., ... & Zhang, Y. (2023). Monitoring blood pressure and cardiac function without positioning via a deep learning-assisted strain sensor array. *Science advances*, 9(32), eadh0615.
- Lin, J., Fu, R., Zhong, X., Yu, P., Tan, G., Li, W., ... & Ning, C. (2021). Wearable sensors and devices for real-time cardiovascular disease monitoring. *Cell reports physical science*, 2(8), 100541.
- Liu, G., Lv, Z., Batool, S., Li, M. Z., Zhao, P., Guo, L., ... & Han, S. T. (2023). Biocompatible material-based flexible biosensors: from materials design to wearable/implantable devices and integrated sensing systems. *Small*, 19(27), 2207879.
- Liu, T., Liang, L. L., Xiao, P., Sun, L. P., Huang, Y. Y., Ran, Y., ... & Guan, B. O. (2018). A label-free cardiac biomarker immunosensor based on phase-shifted microfiber Bragg grating. *Biosensors and Bioelectronics*, 100, 155-160.
- Mansouri, S., Mezan, S. O., Altalbawy, F. M., Kareem, A. K., Alhachami, F. R., Ramirez-Coronel, A. A., ... & Jawhar, Z. H. (2023). Recent advances in assembly strategies of new advanced materials-based analytical methods for the detection of cardiac biomarkers as a diagnosis tool. *Microchemical Journal*, 191, 108827.
- Michaud, K., Jacobsen, C., Basso, C., Banner, J., Blokker, B. M., De Boer, H. H., ... & Van Der Wal, A. C. (2022). Application of postmortem imaging modalities in cases of sudden death due to cardiovascular diseases—current achievements and limitations from a pathology perspective: endorsed by the Association for European Cardiovascular Pathology and by the International Society of Forensic Radiology and Imaging. *Virchows Archiv*.
- Nejati-Koshki, K., Fathi, F., Arabzadeh, A., & Mohammadzadeh, A. (2023). Biomarkers and optical based biosensors in cardiac disease detection: early and accurate diagnosis. *Analytical Methods*, 15(41), 5441-5458.
- Nguyen, T. V., Mizuki, Y., Tsukagoshi, T., Takahata, T., Ichiki, M., & Shimoyama, I. (2020). MEMS-based pulse wave sensor utilizing a piezoresistive cantilever. *Sensors*, 20(4), 1052.

- Park, H., Wei, Q., Lee, S., & Lee, M. (2022). Novel design of a multimodal technology-based smart stethoscope for personal cardiovascular health monitoring. *Sensors*, 22(17), 6465.
- Pullano, S. A., Kota, V. D., Kakaraparty, K., Fiorillo, A. S., & Mahbub, I. (2022). Optically unobtrusive zeolite-based dry electrodes for wearable ECG monitoring. *IEEE Sensors Journal*, 22(11), 10630-10639.
- Qiao, X., Cai, Y., Kong, Z., Xu, Z., & Luo, X. (2023). A wearable electrochemical sensor based on anti-fouling and self-healing polypeptide complex hydrogels for sweat monitoring. *ACS sensors*, 8(7), 2834-2842.
- Qu, M., Chen, X., Yang, D., Li, D., Zhu, K., Guo, X., & Xie, J. (2022). Monitoring of physiological sounds with wearable device based on piezoelectric MEMS acoustic sensor. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 32(1), 014001.
- Sabherwal, P., Agrawal, M., & Singh, L. (2023). Independent detection of t-waves in single lead ecg signal using continuous wavelet transform. *Cardiovascular Engineering and Technology*, 14(2), 167-181.
- Sharma, A., Bhardwaj, J., & Jang, J. (2020). Label-free, highly sensitive electrochemical aptasensors using polymer-modified reduced graphene oxide for cardiac biomarker detection. *ACS omega*, 5(8), 3924-3931.
- Shin, S. H., Park, D. H., Jung, J. Y., Lee, M. H., & Nah, J. (2017). Ferroelectric zinc oxide nanowire embedded flexible sensor for motion and temperature sensing. *ACS applied materials & interfaces*, 9(11), 9233-9238.
- Singh, A., Sharma, A., Ahmed, A., Sundramoorthy, A. K., Furukawa, H., Arya, S., & Khosla, A. (2021). Recent advances in electrochemical biosensors: Applications, challenges, and future scope. *Biosensors*, 11(9), 336.
- Singh, V., Martinezclark, P., Pascual, M., Shaw, E. S., & O'Neill, W. W. (2010). Cardiac biomarkers—the old and the new: a review. *Coronary artery disease*, 21(4), 244-256.
- Tang, L., Yang, J., Wang, Y., & Deng, R. (2023). Recent advances in cardiovascular disease biosensors and monitoring technologies. *ACS sensors*, 8(3), 956-973.
- Tsao, C. W., Aday, A. W., Almarzooq, Z. I., Alonso, A., Beaton, A. Z., Bittencourt, M. S., ... & American Heart Association Council on Epidemiology and Prevention Statistics Committee and Stroke Statistics Subcommittee. (2022). Heart disease and stroke statistics—2022 update: a report from the American Heart Association. *Circulation*, 145(8), e153-e639.
- Valencia-Hernández, C. A., Lindbohm, J. V., Shipley, M. J., Wilkinson, I. B., McEniery, C. M., Ahmadi-Abhari, S., ... & Brunner, E. J. (2022). Aortic

pulse wave velocity as adjunct risk marker for assessing cardiovascular disease risk: prospective study. *Hypertension*, 79(4), 836-843.

- Wang, B., Zhou, S., Jiang, S., Qin, S., & Gao, B. (2023). Personalized medical devices connect monitoring and assistance: emerging wearable soft robotics. *Analytical chemistry*, 95(22), 8395-8410.
- Wang, L. H., Zhang, Z. H., Tsai, W. P., Huang, P. C., & Abu, P. A. R. (2022). Low-power multi-lead wearable ECG system with sensor data compression. *IEEE Sensors Journal*, 22(18), 18045-18055.
- Wu, W., Wang, L., Yang, Y., Du, W., Ji, W., Fang, Z., ... & Li, L. (2022). Optical flexible biosensors: From detection principles to biomedical applications. *Biosensors and Bioelectronics*, 210, 114328.
- Xu, C., Zhang, T., Zhu, B., & Cao, Z. (2020). Diagnostic role of postmortem CK-MB in cardiac death: a systematic review and meta-analysis. *Forensic Science, Medicine and Pathology*, 16(2), 287-294.
- Zhang, T., Liu, N., Xu, J., Liu, Z., Zhou, Y., Yang, Y., ... & Jiang, S. (2023). Flexible electronics for cardiovascular healthcare monitoring. *The innovation*, 4(5).

2. Bölüm

7 Katlı Bir Konut Binası İçin Isıtma Sistemi Seçimi: Kömür ve Doğalgazın Karşılaştırmalı Analizi

Tarek ALSARAN¹, Mustafa Tahir AKKOYUNLU²

1. GİRİŞ

Enerji, modern şehir hayatının sürdürülebilirliği için sadece teknik bir gereklilik değil; aynı zamanda yaşam kalitesini doğrudan tayin eden bir unsurdur [2]. Konutlarda enerji tüketimi dendiğinde akla gelen ilk kalem olan ısınma ihtiyacı, hangi kaynağın seçileceği noktasında bizi hem ekonomik hem de çevresel bir yol ayrımına getirir [13]. Aslında bu seçim, hane bütçesinden küresel iklim hedeflerine kadar uzanan geniş bir etki alanına sahiptir [5, 11]. Sanayi Devrimi'nden bu yana enerji dünyasının yükünü sırtlayan kömür, özellikle yerli kaynaklara yönelmek isteyen ülkelerde uzun yıllar boyunca "vazgeçilmez" görülmüştür [4, 6]. Ancak bugün geldiğimiz noktada, nüfus yoğunluğunun arttığı kentlerde katı yakıt kullanmanın hem lojistik zorlukları hem de ekolojik maliyetleri çok daha görünür bir hal almıştır [14].

Artık sadece yakıtın ucuz olması yetmiyor; iklim kriziyle mücadele kapsamında "karbonsuzlaşma" artık bir zorunluluk [7]. Bu bağlamda, karbon yoğunluğu en yüksek fosil yakıt olan kömürden, daha verimli ve nispeten temiz olan doğalgaza geçiş, enerji dönüşümünün en kritik halkasını oluşturuyor [5, 11]. Özellikle 7 katlı binalar gibi kalabalık yapılarda; işletme kolaylığı, sistemin ne kadar otomatik yönetilebildiği ve şehir havasına etkisi gibi faktörler, seçim kriterlerini kökten değiştiriyor [1, 3]. Türkiye'deki güncel enerji tabloları da doğalgaz altyapısının ulaştığı yerlerde eski usul ısınma yöntemlerinin hızla tarih olduğunu net bir şekilde gösteriyor [3, 12].

Bu çalışma, 7 katlı tipik bir apartman modeli üzerinden, kömürlü sistemler ile modern doğalgaz çözümlerini objektif bir gözle kıyaslamayı hedeflemektedir. Yakıtların yer altındaki oluşum sertiveninden başlayarak; avantajlarını, kullanım sırasında çıkardıkları zorlukları ve çevresel etkilerini mercek altına alacağız [8, 10]. Temel gayemiz, hem bireysel ekonomi hem de toplumsal sağlık açısından hangi sistemin daha makul olduğuna dair akademik bir perspektif sunmaktır [9, 11].

¹ Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, Türkiye, ORCID: 0009-0004-3005-0946

² Prof. Dr. Necmettin Erbakan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye ORCID: 0000-0001-5748-6759

Anahtar Kelimeler: Konut Isıtma Sistemleri, Kömür, Doğalgaz, Enerji Verimliliği , Karbon Emisyonu , 7 Katlı Bina, Çevresel Etki Analizi, Fosil Yakıtlar .

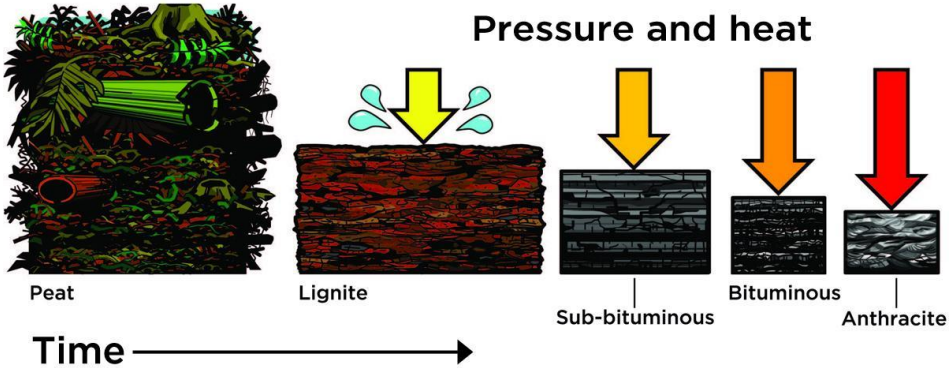
2. KÖMÜR: TANIMI, OLUŞUMU ve KARAKTERİSTİK ÖZELLİKLER

2.1 Kömür Nedir?

Kömür; temelde yüksek karbon içeriğiyle bilinen, yanında hidrojen, oksijen ve az miktarda da olsa azot barındıran katı bir fosil yakıt türüdür [13]. Kalitesi ise içindeki nem miktarı ve yanma sonrası verdiği ısı ile ölçülür [10].

2.2 Kömür Nasıl Oluşur?

Kömürün varlığı, milyonlarca yıl önceki bitki kalıntılarının bataklıklarda oksijensiz kalarak çökmesine dayanır [13]. Yer kabuğunun derinliklerindeki o muazzam basınç ve sıcaklık, bu organik kütleyi zamanla linyitten taş kömürüne, oradan da en saf hali olan antrasite dönüştüren devasa bir kimyasal süreçtir [10].



Şekil 1. Kömürün oluşumu.

2.3 Kömürün Avantajları

Kömürün hala tercih edilmesinin arkasında yatan en büyük güç, dünya genelindeki dev rezervlerin sağladığı "enerji güvenliği" hissidir [2, 6]. Diğer yakıtlarla kıyaslandığında birim maliyetinin düşük kalması, ekonomik kısıtları olan bölgelerde onu hala bir seçenek olarak tutmaktadır [6]. Ayrıca, bir boru hattına ihtiyaç duymadan, kamyonlarla istenilen her yere taşınabilmesi ciddi bir lojistik esneklik sağlar [13].

2.4 Kömürün Dezavantajları

Fakat 7 katlı bir binada kömür yakmak demek, bitmek bilmeyen bir mesai demektir [1]. Tonlarca yakıtın depolanacağı dev kömürlükler, bitmeyen kül temizliği ve yakıtın kazana manuel yüklenmesi gibi zahmetler hem zaman hem de yer kaybına yol açar [8]. Üstelik bu sistemlerde ısıyı hassas bir şekilde kontrol etmek çok zordur, bu da ya fazla ısınmaya ya da üşümeye sebep olan verimsiz bir konfor ortamı yaratır [9].

2.5 Kömürün Çevresel Etkileri

Kömür, ne yazık ki yandığında atmosfere en fazla CO₂ bırakan yakıt olarak küresel ısınmanın baş aktörüdür [5, 7]. Şehir merkezlerindeki binalarda kömür yakılması, solunum yollarını vuran kükürt dioksit ve partikül madde kirliliğinin ana sebebidir [14]. Ayrıca, yanma sonrası kalan küllerin içindeki ağır metaller, toprak ve yer altı suyu sağlığı için sessiz bir tehdit oluşturur [1].

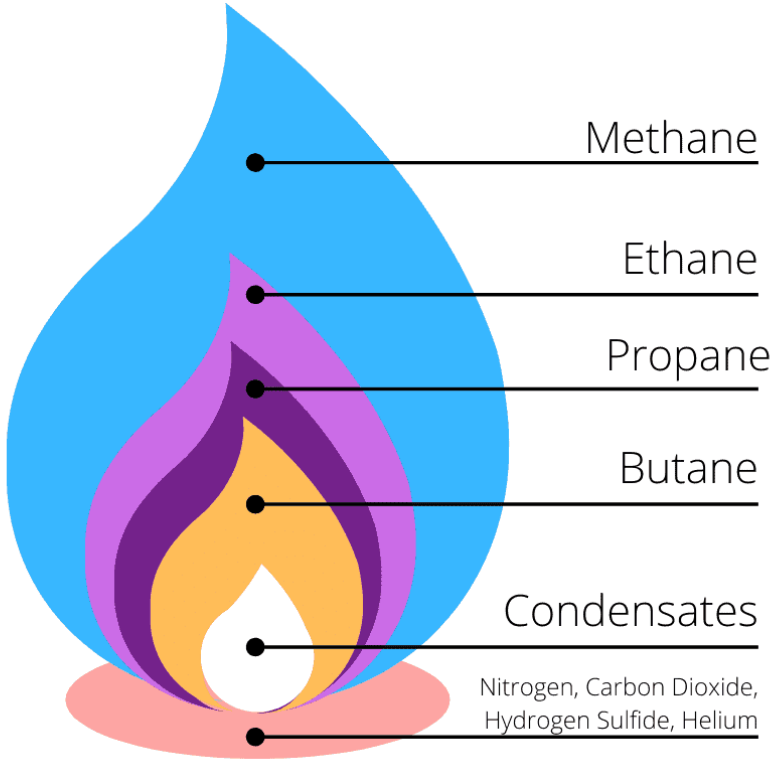
3. DOĞALGAZ: TANIMI, OLUŞUMU ve AVANTAJLARI

3.1 Doğalgaz Nedir?

Doğalgazı sadece "bir gaz" olarak tanımlayıp geçmek, onun yer altındaki milyonlarca yıllık emeğine haksızlık olur . Bu enerji kaynağını aslında doğanın bizim için hazırladığı özel bir "hidrokarbon kokteyli" olarak görmek daha doğrudur. Karışımın ana gövdesini (yaklaşık %70-90 oranında) en hafif üye olan **metan (C H₄)** oluşturur. Ancak doğalgazın o meşhur ısıl gücünü ve kalitesini belirleyen asıl zenginlik, karışımın içine serpilmiş olan daha ağır moleküllerdir:

- **Metan (C H₄):** Karışımın bel kemiğidir. Çok hafif ve atak bir yapısı vardır. Havadan hafif olması, olası bir sızıntıda gazın zemine çökmek yerine hızla yükselerek dağılmasını sağlar ki bu da güvenlik açısından büyük bir şanstır [9].
- **Etan (C₂ H₆):** Metandan sonra gelen en önemli bileşendir. Doğalgazın "enerji yoğunluğunu" artıran gizli kahramanlardan biridir. Sanayide plastik üretiminin de ham maddesi olan bu molekül, ısınma verimimize ciddi katkı sunar.
- **Propan (C₃ H₈):** Isıl değeri oldukça yüksektir. Şebekedeki gazın içinde bir denge unsuru olarak bulunur ve yakıtın "alev gücünü" pekiştirir [13].

Bu karışımı kömür gibi rakiplerinden ayıran en zarif özelliği ise yandığında arkasında kül, katran veya boğucu kükürt kokuları bırakmamasıdır. İşte bu yüzden ona "temiz enerji" demeyi tercih ediyoruz [11, 14].



Şekil 2. Doğal Gaz Bileşimi.

3.2 Doğalgaz Nasıl Oluşur?

Bu gaz, denizlerdeki mikroorganizma kalıntılarının milyonlarca yıl boyunca yer altında termal bir bozunmaya uğramasıyla oluşur [13]. Kayaçların gözeneklerinde hapsolan bu enerji, sondajlarla yeryüzüne çıkarılır ve işlenerek kullanıma sunulur [9].

3.3 Doğalgazın Avantajları

Doğalgazlı bir sistem, kullanıcıya kesintisiz ve "zahmetsiz" bir konfor vadeder [11]. Yeni nesil yoğunmalı cihazların verimlilikleri %95'leri bularak yakıt israfını adeta sıfırlar [12]. Depolama gerektirmemesi bina içinde alan kazandırırken; koku, duman veya is gibi sorunları da hayatımızdan çıkarır [9].

3.4 Doğalgazın Dezavantajları

En büyük handikabı, altyapı bağımlılığıdır; yani boru hattı yoksa kullanımı da mümkün değildir [3]. Kurulum aşamasındaki tesisat giderleri ve cihazların periyodik bakım ihtiyacı başta bir maliyet kalemi oluşturur [9]. Ayrıca, fiyatların

küresel piyasalardaki siyasi dalgalanmalardan ve döviz kurlarından etkilenmesi, ekonomik öngörülebilirliği bazen zorlaştırabilir [2].

3.5 Doğalgazın Çevresel Etkileri

Doğalgaz, kömüre göre %50 daha az karbon salımı yaptığı için "köprü yakıt" olarak görülür ve çevreci dönüşümde önemli bir basamaktır [11]. Şehirlerdeki hava kalitesini korumada en etkili çözümdür [14]. Yine de bir fosil yakıt olduğu gerçeği unutulmamalı; taşıma hatlarındaki metan sızıntıları çevresel risk teşkil etmeye devam etmektedir [7].

4. MATERYAL VE METODOLOJİ

Bu çalışmada, teorik kabullerin ötesine geçilerek, yaşayan bir binanın ısı ihtiyaçları oda oda analiz edilmiş ve sistem tasarımı bu somut veriler üzerine inşa edilmiştir. Metodolojimiz, sadece toplam yükü değil, binanın en uç noktalarındaki enerji taleplerini de kapsayan titiz bir hesaplama sürecini içermektedir.

Araştırmanın ana nesnesi olarak; modern şehircilik yapısına uygun, 7 katlı ve her katında ikişer dairenin bulunduğu (toplam 14 bağımsız bölüm) betonarme bir bina modeli seçilmiştir.

Mimari Detaylar: Her bir daire; geniş bir salon, üç yatak odası, mutfak ve ıslak hacimlerden oluşan standart bir aile konutu olarak kurgulanmıştır.

Teknik Kaynaklar: Isı kaybı katsayıları için TS 825 standartları [12], yakıtların enerji yoğunlukları ve yanma karakteristiği için ise küresel enerji veri tabanları temel alınmıştır [9, 13].

[illegible]

Sütun 1-3: Yapı bileşeninin sembolü, baktığı yön ve malzemenin kalınlığı tanımlanır.

Sütun 4-6: Bileşenin uzunluk ve yüksekliği çarpılarak toplam alan (brüt alan) hesaplanır.

Sütun 7-9: Aynı bileşenden kaç adet olduğu ve varsa pencere/kapı boşlukları düşülerek net hesap alanı bulunur.

Sütun 10: Malzemenin toplam ısı geçiş katsayısı (K) işlenir [12].

Sütun 11: İç ve dış ortam arasındaki sıcaklık farkı (ΔT) yazılır. Bu aşamada binanın bulunduğu ilin dış hava sıcaklığı (Ek-2) ve mahalin kullanım amacına göre iç sıcaklığı (Çizelge 7) esas alınır [13].

Sütun 12: Alan, K katsayısı ve sıcaklık farkının çarpımıyla elde edilen Artırımsız Isı Kaybı (Q_0) hesaplanır.

Artırım Katsayıları ile Sistemin Revize Edilmesi

Ham ısı kaybı değerleri, binanın fiziksel ve işletme şartlarına göre şu katsayılarla güncellenmiştir:

Sütun 13 (ZD - Birleştirilmiş Artırım): Binanın kesintili ısınma durumunda (geceleri ateşin azaltılması vb.) soğuyan yapı elemanlarının tekrar ısıtılması için gereken ek kapasitedir. Bu değer, işletme şekline ve binanın "hantallığını" gösteren D katsayısına göre belirlenir.

Sütun 14 (ZW - Kat Yükseklik Artırımı): 7 katlı yapımızın üst katlarında artan rüzgar hızı ve tesisat suyunun borularda soğuması nedeniyle uygulanan artırımdır.

Sütun 15 (ZH - Yön Artırımı): Odanın baktığı yöne (Kuzey, Güney vb.) göre maruz kaldığı rüzgar ve güneş etkisini dengelemek için eklenir [13]. Nihai Kapasite ve Cihaz Seçimi Tüm bu katsayıların eklenmesiyle bulunan toplam ısı kaybına, boru kayıpları ve ani yük değişimleri için %10 emniyet payı ilave edilmiştir. Toplam Dizayn Yükü: Detaylı hesaplama sonucu binanın nihai ısı ihtiyacı 108 kW olarak netleşmiştir. Malzeme ve Cihaz Seçimi: Bu kapasiteyi karşılamak için doğalgazda yüksek verimli ve yedekli çalışabilen 2 adet 55-60 kW'lık kaskad kazan; kömürde ise yakıtın düşük verimini kompanse edecek 125-130 kW'lık merkezi çelik kazan seçilmiştir [1, 9, 12].

ISI YALITIMI VE YAPI BİLEŞENLERİ ANALİZİ (TS 825)

Binamızın ısı kaybı tablosuna geçmeden önce, her bir yapı elemanının katmanlarını ve bu katmanların ısıya karşı gösterdiği direnci (R) belirlememiz gerekir. Toplam ısı iletim katsayısı (U), bu dirençlerin toplamının tersidir ($U = 1/R_{\text{toplam}}$).

Dış Duvar Hesaplaması (Dıştan İçe Doğru)

Dış duvarlar, binanın en geniş yüzeyini oluşturduğu için yalıtımda aslan payına sahiptir.

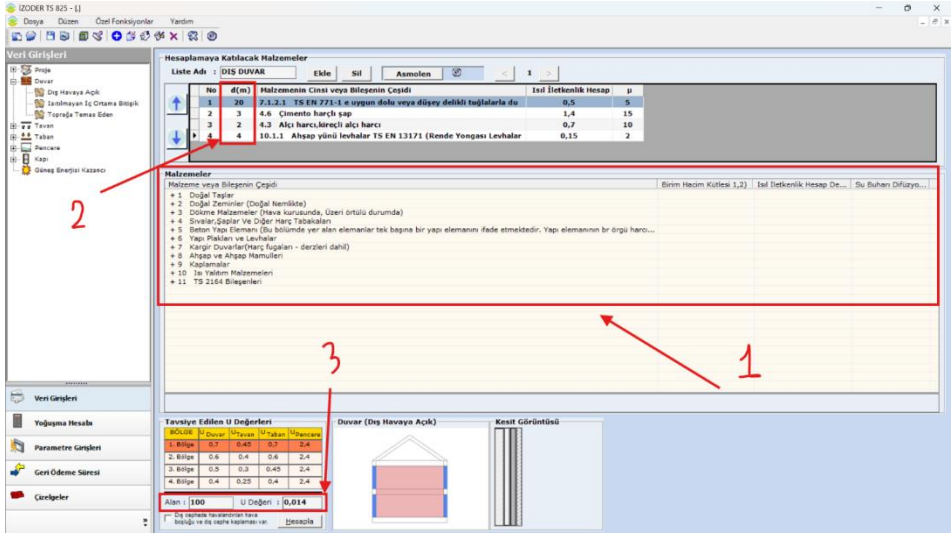
yapı bileşenlerinin her biri için malzeme türü ve santimetre cinsinden kalınlık değerleri İZODER'in TS 825 uyumlu hesaplama uygulamasına tek tek girilerek, bileşenlerin ısı geçirgenlik katsayısı olan U değerleri hassasiyetle belirlenmiştir.

Örneğin:

Katman	Malzeme	Kalınlık (cm)	Amaç
Dış Yüzey	Çimento Esaslı Sıva	3 cm	Dış cephe koruması
Isı Yalıtımı	Ahşap Yünü Levhalar	4 cm	Isı ve Ses Yalıtımı
Taşıyıcı	Düşey Delikli Tuğla	20 cm	Yapısal kütle
İç Yüzey	Alçı Harcı	2 cm	Yüzey düzeltme

Şekil 4. İzoder TS 825 uygulamasına aktaracağımız bileşenler ve kalınlıklarını.

Dış duvarın toplam ısı geçiş katsayısını (U) bulmak için, yukarıda belirttiğimiz katmanlar; kalınlıkları ve malzeme türleri baz alınarak İZODER'in TS 825 uyumlu hesaplama uygulamasına tek tek girilir.

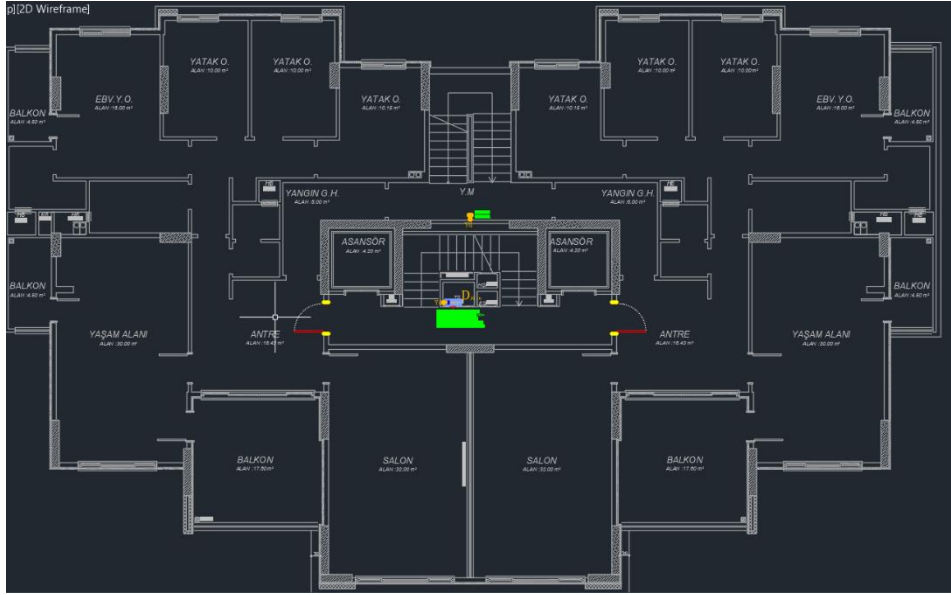


Şekil 5. İzoder TS 825 uygulamasında dış duvar ısı geçirgenlik katsayısı U hesaplama arayüzü.

Duvar bileşenleri 1 numaralı kutudan seçilir ve 2 numaralı kutuya bileşenlerin kalınlıkları (cm) girilir. 3 numaralı kutuya ilgili duvarın yüzey alanı yazıldıktan sonra 'Hesapla' butonuna tıklanarak **U** değeri hesaplanır.

Yapı bileşenlerinin (duvar, tavan, taban, pencere vb.) ısıl geçirgenlik katsayılarını (**U**) belirlemek, ısı kaybı hesabının en temel aşamasıdır.

Elde edilen **U** değerleri, ısı kaybı formumuzun 10. sütunundaki "Isıl Geçirgenlik Katsayısı" kısmına aktarılır.



Şekil 6. Örnek dairenin mimar planı.

Ebeveyn Yatak Odası (EYO) Isıl Analizi

Hesaplamalarımızda odanın iç sıcaklığını ($T_{iç}$) 20°C olarak esas alıyoruz. Odanın çevrelediği diğer mahallerle olan sıcaklık farklarını (ΔT) dengeleyerek, her bir yüzey için ısı kaybını ayrı ayrı belirleyeceğiz.

Cephe	Durum	$T_{iç}$	$T_{dış}$
K	DIŞ ORTAM	20°C	-12°C
D	DIŞ ORTAM	20°C	-12°C
G	İÇ ORTAM	20°C	18°C
GB	İÇ ORTAM	20°C	18°C
KB	İÇ ORTAM	20°C	26°C

Tablo 1. Ebeveyn yatak odasına ait iç ve dış ortam sıcaklık değerleri

Şekil 7. Ebeven yatak odasının ısı kaybı hesabı.

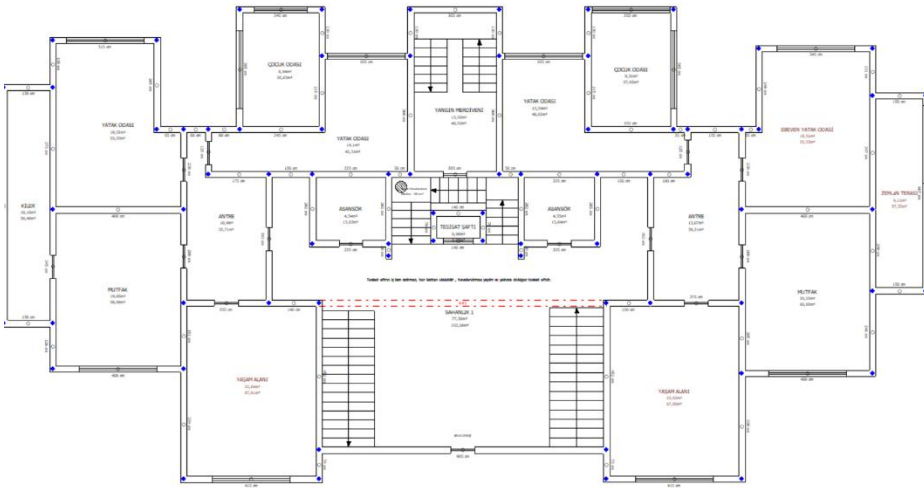
7 katlı bir yapıda 14 dairenin tüm odaları için ayrı ayrı tekrarlanan bu analiz sayesinde; her odanın spesifik ısı kaybı hesaplanarak bu ihtiyacı tam karşılayacak radyatör dilim sayısı veya yerden ısıtma debi ayarı bilimsel verilere göre belirlenir ve bu hassas hesaplama yöntemi binanın işletme ömrü boyunca %20 ile %40 arasında enerji tasarrufu sağlanmasının temel anahtarını oluşturur.

Her odanın ayrı ayrı Watt ihtiyaçlarını toplanarak ulaşılan toplam bina ısı kaybı (Q_{toplam}) değerine, tesisat kayıpları ve emniyet payları ilave edilerek, yapının tüm ısı yükünü karşılayacak en uygun kapasitesindeki kazan seçimi gerçekleştirilir.

Projenin ısı kayıp analizi tamamlandıktan sonra; hesaplanan toplam ısı kaybı değerine tam uyum sağlayacak kazan tipi ve kapasitesi başta olmak üzere tüm boru metrajları, vana adetleri, regülatör sayısı, baca tipi ile genişlik ve yükseklik ölçüleri gibi teknik detaylar ve tesisat ekipmanları teker teker Excel ortamına aktarılarak, işçilik ile montaj giderlerini de kapsayan profesyonel bir maliyet analizi ve teklif formu oluşturulur.

7 KATLI BİNANIN TEKLİF FORMU				
MALZEME	MİKTAR	BİRİM	B.FİYAT	TOPLAM
150 kW BUDERUS Duvar Tipi Kazan	6	AD	₺200.000,00	₺1.200.000,00
kazan flexi	6	AD	₺800,00	₺4.800,00
Manometre	4	AD	₺600,00	₺2.400,00
DN 50 Vana	5	AD	₺3.200,00	₺16.000,00
DN 50 Selenoid Vana	1	AD	₺2.000,00	₺2.000,00
DN 50 Konik Filtre	1	AD	₺6.800,00	₺6.800,00
DN 50 Regülatör	1	AD	₺6.200,00	₺6.200,00
DN 50 Topraklama Çubuğu	1	AD	₺1.150,00	₺1.150,00
DN 25 Regülatör	1	AD	₺3.200,00	₺3.200,00
DN 32 Vana	6	AD	₺1.000,00	₺6.000,00
DN 25 Vana	20	AD	₺750,00	₺15.000,00
3" SDM	10	MT	₺900,00	₺9.000,00
2 1/2" SDM	4	MT	₺700,00	₺2.800,00
2" SDM	25	MT	₺450,00	₺11.250,00
1 1/4" SDM	5	MT	₺275,00	₺1.375,00
1" SDM	50	MT	₺215,00	₺10.750,00
Boru Ek Parçaları	1	TK	₺30.000,00	₺30.000,00
Kazan Bacası	1	TK	₺100.000,00	₺100.000,00
Karot Delimi	1	TK	₺40.000,00	₺40.000,00
İşçilik	1	TK	₺250.000,00	₺250.000,00
			TOPLAM	₺1.718.725,00
			K.D.V	₺343.745,00
			G.TOPLAM	₺2.062.470,00

Şekil 8. Teknik Detaylandırma, Metraj ve Maliyet Analizi.



ZetaCAD uygulama süreci, AutoCAD ortamından alınan mimari planın programda yeniden çizilmesiyle başlar; bu proje üzerine doğalgaz tesisat projesi dijital olarak tasarlanıp, proje e-imza ile imzalanarak DİPOS IV platformuna iletilir ve burada (müşteri sözleşmesi, baca raporu, taahhütname, tapu) gibi gerekli tüm evraklar sisteme yüklenerek yetkili gaz dağıtım firmasının onayına sunulur.

Proje onay süreci başarıyla tamamlandıktan sonra, teorik tasarımın fiziksel uygulamaya dönüştüğü tesisat döşeme ve uygulama aşamasına geçilir. Bu süreç, güvenlik standartlarının en üst seviyede tutulması gereken, güvenlik, sızdırmazlık ve belirli bir teknik sırayı takip eden kapsamlı bir operasyondur.

Projenin Fiziksel Uygulama Süreci:

1. Şantiye Hazırlığı ve Malzeme Sevkiyatı

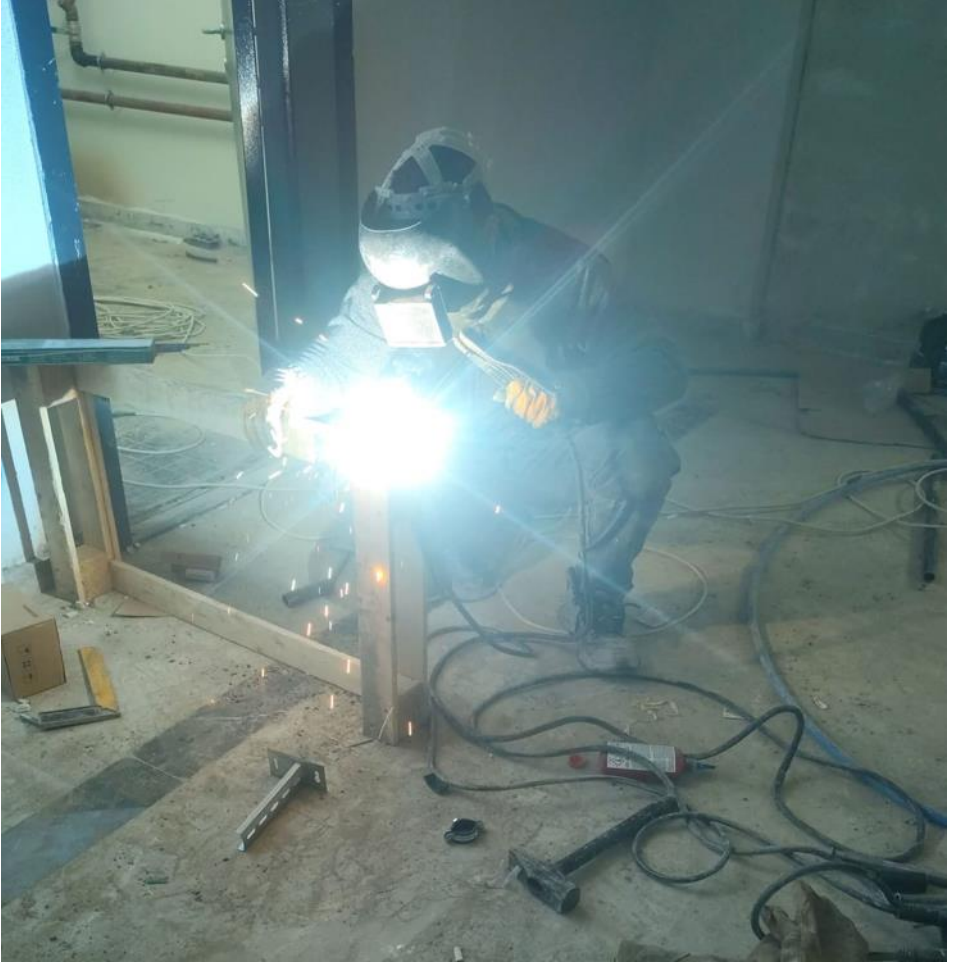
Onaylı projedeki metrajlar doğrultusunda belirlenen çelik borular, bağlantı ekipmanları (fittings), vanalar ve regülatörler şantiye alanına ulaştırılır. Tüm malzemelerin TSE belgeli olması ve projede belirtilen sınıflara (örneğin; flanşlı/küresel vna, dişli/patent çelik boru, uzun trifonlu/ somunlu kelepçe ayrımı) uygunluğu denetlenir.



Şekil 10. Şantiye Sahası Doğalgaz Malzeme.

2. Boru Hattı Montajı ve Kaynak İşlemleri

Onaylı projedeki güzergah izlenerek çelik boruların kelepçelerle sabitlendiği, birleşim noktalarının sızdırmazlık için uzman ustalarca kaynaklandığı ve duvar geçişlerinin koruyucu kılıflarla emniyete alındığı ana tesisat kurulum süreci gerçekleştirilir.



Şekil 11. Doğalgaz boru hattı kaynak montaj çalışması.

3. Ekipman ve Cihaz Yerleşimi

Isı kayıp analizine uygun seçilen kazan, pompa ve genişleme tankı gibi ana üniteler projede belirtilen konumlara yerleştirilirken; gaz basıncını dengeleyen regülatörler, emniyet vanaları ve atık gazın güvenli tahliyesini sağlayan sızdırmaz baca sistemleri teknik standartlara göre monte edilir.



Şekil 12. Kazan, pompa ve baca sisteminin kurulumunun tamamlanmış hali.

4. Sızdırmazlık ve Basınç Testi

Montaj bittikten sonra sisteme gaz verilmeden önce mutlaka basınç testi uygulanır. Manometre yardımıyla sisteme hava basılarak, belirli bir süre boyunca basınçta herhangi bir düşüş olup olmadığı kontrol edilir. Bu, kaynaklı veya dişli tüm birleşim noktalarının sızdırmazlığının nihai teyididir.



Şekil 13. U-Tipi Manometre ile Gaz Tesisatı Sızdırmazlık Testi.

5. Gaz Açma ve İşletmeye Alma

Tesisatın fiziki kurulumu bittikten sonra SAP üzerinden alınan randevu ile yetkili gaz dağıtım firması tarafından yerinde denetim gerçekleştirilir ve sızdırmazlık onayı alınarak gaz arzı sağlandıktan sonra, cihaz servislerinin ilk çalıştırma işlemleriyle sistem tamamen devreye alınır.

**DOĞAL GAZ TESİSATI MEVCUT DURUM
TESPİT RAPORU**

KONTROL TARİHİ: 06/11/2024 17:08 [102]
TESİSAT/SÖZLEŞME NO: 0010847958/100005899595
ABONE: YUSUF AZBOY
ADRES: KARAKAYA MAH. SİBEL SK. NO:3/13 KEÇİOR
EN

SAYAC NO/TİP/KAPASİTE: 20018368-MEKANİK-G4
ENDEKS (MEKANİK): 9316

TESPİT EDİLEN CİHAZLAR:
KOMBİ-HERMETİK, KW, 1 ADET
OCAK-ATMOSFERİK, KW, 1 ADET

RED KIRITERLERİ:
DOĞALGAZ SIZDIRMAZLIK TESTİ OLUMSUZ,(S)
DOĞALGAZ HİZMETİ DURDURULDU
ABONEYE GENEL BİLGİLENDİRME YAPILDI
VANA KAPATILDI

KONTROL PERSONELİ/İMZA
DURSUN BAYAR

ABONE/MUHATAP/İMZA

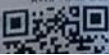
*** TESİSATI ALDIRAN TESPİT BAŞLIĞINDA BELİRTİLEN
EKSİK İKİMLERİN AŞAĞIDAKİ YÜKÜMLÜLERE GÖRE
GİDERİLMESİ ÖNEMLİ ANIZ ETMEKTEDİR

(M) MÜŞTERİ YÜKÜMLÜLÜĞÜNDE
(S) SERTİFİKALI DOĞAL GAZ FİRMASI YÜKÜMLÜLÜĞÜNDE
(D) DİĞER EYETKİLİ SERVİSLER, BACA FİRMALARI,
MİMARİ KURULUŞLARI VB. E YÜKÜMLÜLÜĞÜNDE

USULSİZ DOĞAL GAZ KULLANIMININ TESPİTİ HALİNDE
GASİFİM VE MÜŞTERİ HÜKÜMLERİ KONTROL GİTİRGİ İŞLEM YAPILIR.

SERTİFİKALI DOĞAL GAZ FIRMA LİSTESİNE
ULAŞMAK İÇİN KARE KODU OKUTUNUZ!

AKTİF FİRMALAR 7/24 FİRMALAR



Şekil 14. Doğalgaz uygunluk belgesi.

Peki Doğalgazdan Vazgeçip Katı Yakıtta Geçiş: Riskler ve Sonuçlar

Doğalgazın yüksek operasyonel esnekliği ve düşük karbon salınımı gibi çevresel avantajlarından vazgeçerek katı yakıtlı kazan sistemlerine yönelmek, modern enerji yönetimi ve sürdürülebilirlik hedefleri açısından ciddi bir gerileme riski taşımaktadır. Doğalgazın yanma veriminin yüksekliği ve baca gazı emisyonlarının minimal düzeyi, sistemin çevresel ayak izini önemli ölçüde hafifletirken; katı yakıtlı kazanlara dönüş, başta partikül madde, kükürt dioksit ve azot oksit olmak üzere yoğun bir emisyon yükü ile birlikte kapsamlı bir kül/atık yönetimi sorunu doğuracaktır. Ekonomik açıdan bakıldığında, katı yakıtın ilk yatırım maliyetinin daha düşük gibi görünmesine rağmen; lojistik, depolama, baca gazı arıtma teknolojileri ve uzun vadeli karbon vergisi gibi "gizli maliyetler" toplam operasyonel giderleri ciddi oranda artıracaktır. Dolayısıyla, doğalgazın

sunduğu yüksek dönüşüm verimliliği ve şebeke esnekliği gibi teknik üstünlüklerden feragat edip katı yakıtlı sistemlere dönmek, hem çevresel standartların gerisinde kalınmasına hem de santral verimliliğinde belirgin bir düşüşe neden olarak enerji sistemlerinin gelecekteki rekabet gücünü zayıflatacaktır.

Kömür ve Doğalgaz Maliyet Karşılaştırma Tablosu

Maliyet Kalemi	Kömürlü Kazan Sistemleri	Doğalgaz Kombine Çevrim (NGCC)
İlk Yatırım Maliyeti (CAPEX)	Çok Yüksek (Baca gazı arıtma, depolama ve büyük kazan yapıları nedeniyle) [10]	Düşük (Modüler yapı ve basit kurulum) [1]
İşletme ve Bakım Maliyeti (OPEX)	Yüksek (Kül yönetimi, aşınma ve lojistik giderleri) [6]	Düşük (Tam otomasyon ve temiz yanma) [1]
Yakıt Maliyeti	Düşük ve Nispeten Stabil [6]	Yüksek ve Volatil (Dışa bağımlı) [13]
Ekonomik Rekabetçilik	Karbon vergisi ile azalıyor [13]	Karbon emisyon avantajı ile artıyor [11]
Verimlilik	Orta (%35 - %45) [12]	Yüksek (%60+) [8], [12]
Lojistik / Depolama	Yüksek maliyetli ve alan gerektirir [6]	Boru hattı ile sürekli/Düşük maliyetli [3]

Şekil 15. Kömür ve Doğalgaz Maliyet Karşılaştırma Tablosu.

5. KAYNAKÇA

- [1] Agrawal, K. K., vd. (2013). Assessment of greenhouse gas emissions from coal and natural gas thermal power plants using life cycle approach.
- [2] BP. (2022). Statistical Review of World Energy.
- [3] EPDK. (2023). Doğal Gaz Piyasası Sektör Raporu.
- [4] ETKB. (2025). T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı 2025 Yılı Faaliyet Raporu.
- [5] Hefner, M., vd. (2024). The changing mix of fossil fuels used and the related evolution of CO₂ emissions.
- [6] IEA. (2023). Coal 2023 Analysis and Forecast.
- [7] IPCC. (2022). Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change.
- [8] Jaramillo, P. (2007). A Life Cycle Comparison of Coal and Natural Gas for Electricity Generation.
- [9] Kidnay, A. J., vd. (2020). Fundamentals of Natural Gas Processing.
- [10] Mercure, J. F., & Salas, P. (2012). An assessment of global energy resource economic potentials.
- [11] Mohammad, N., vd. (2021). Natural Gas as a Key Alternative Energy Source in Sustainable Renewable Energy Transition.
- [12] SHURA. (2020). Türkiye Elektrik Sistemi için En Ekonomik Katkı: Enerji Verimliliği.
- [13] Speight, J. G. (2019). Natural Gas: A Basic Handbook.
- [14] THHP. (2024). Kara Rapor 2024: Hava Kirliliği ve Sağlık Etkileri.

3. Bölüm

Genetik Algoritmanın Güncel Çalışmalarla Farklı Alanlarda Kullanımı

Oben ADAK¹, Mehmet ACI²

ÖZET

Genetik Algoritmanın güncel literatürdeki teorik ve pratik uygulamalarını incelemeyi amaçlayan bu çalışmada, son yılları kapsayan toplam 14 adet makale incelenmiştir. Çalışma kapsamında incelenen yayınlar, literatüre sundukları katkılar çerçevesinde dört ana kategori altında sınıflandırılmıştır. Bu kategoriler; algoritma geliştirme, modelleme uygulamaları, karşılaştırmalı analizler ve teorik çalışmalar olarak belirlenmiştir. Ayrıca çalışmanın giriş bölümünde, John H. Holland tarafından geliştirilen algoritmanın temel çalışma prensipleri ve evrimsel operatörleri özetlenmiştir. Yapılan her incelemede, alana özgü terminoloji takip edilerek Genetik Algoritmanın ilgili problemlerdeki çözüm yeteneği ve kullanım amacı detaylandırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Genetik Algoritma, Metasezgisel, Optimizasyon, Popülasyon, Seleksiyon

¹ Arş. Gör.; Mersin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, odenadak@mersin.edu.tr, ORCID No: 0009-0000-1289-437X

² Doç. Dr.; Mersin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, maci@mersin.edu.tr, ORCID No: 0000-0002-7245-8673

GİRİŞ

Genetik Algoritma (GA) canlıların gelişimini evrimsel süreçteki adaptasyon ve iyileşme mekanizmalarıyla tanımlayan evrim teorisini temel alarak John Holland tarafından geliştirilmiştir. Ebeveyn dizilerden çocuk diziler üreten GA; doğada canlıların genetik sistemlerinde gözlemlenen temsil, seleksiyon, çaprazlama ve mutasyon operatörlerini kullanarak problem için en iyi ya da en iyiye yakın çözümü bulur. Algoritmanın işleyişi, potansiyel çözümleri içeren popülasyondaki elemanların (genellikle 1 ya da 0 gibi karakterlerle) kodlanarak temsil aşamasının tamamlanmasıyla başlar.

Ardından seleksiyon aşamasında, uygunluk adı verilen değerlendirme fonksiyonu ile her çözümün kalitesi değerlendirilir ve genlerini aktaracak en iyi bireyler seçilerek eşleştirilir. Eşleştirilen diziler rastgele bir noktadan bölünür, parçalar birbirleriyle yer değiştirir ve böylece çaprazlama gerçekleşmiş olur. Mutasyon işlemi ile de dizilerin bazı kısımları rastgele değişime uğratarak popülasyonun çeşitliliği ve yeni çözümler üretme potansiyeli artırılır. Her jenerasyonda düşük uygunluktaki diziler elenir ve daha iyi ebeveynler yeni nesilde daha çok çocuk diziye sahip olma şansı yakalar. GA, bu döngü ile evrimleşerek problem için optimum sonuca ulaşmaya çalışır (Holland, 1992).

Bu literatür taramasında son 5 yıl içinde GA alanında nasıl gelişmeler yaşandığı ve bu gelişmelerin literatüre hangi türde katkı sağladığı farklı başlıklar altında sınıflandırılmıştır. Analizler sonucunda çalışmalar: Algoritma Geliştirme ve İnovasyon Çalışmaları, Uygulama ve Model Geliştirme Çalışmaları, Karşılaştırmalı ve Kıyaslamalı Çalışmalar son olarak Teorik ve Analitik Çalışmalar olmak üzere dört ana kategoride ele alınmıştır.

Algoritma Geliştirme ve İnovasyon Çalışmaları kategorisinde, GA modelinde problem çözümleri amacıyla yapılan yeni katkılar ve geliştirilen yeni yöntemler sunulmuştur.

Uygulama ve Model Geliştirme Çalışmaları kategorisinde, daha önce çözülmemiş bir problemi GA ile çözen veya var olan bir probleme daha iyi bir çözüm bulmayı amaçlayan akademik yayınlar incelenmiştir.

Karşılaştırmalı ve Kıyaslamalı Çalışmalar kategorisinde, GA'nın problem çözme yeteneğini diğer algoritmalar ile karşılaştırmayı amaçlayan çalışmalar derlenmiştir.

Teorik ve Analitik Çalışmalar kategorisinde, GA'nın matematiksel arka planı ve teorik temellerini inceleyen çalışmalar özetlenmiştir.

ALGORİTMA GELİŞTİRME VE İNOVASYON ÇALIŞMALARI

Mahmoudinazlou ve Kwon (2024), Drone Destekli Gezgin Satıcı Problemi (TSPD) ve Uçan Yardımcılı Gezgin Satıcı Problemi (FSTSP) isimli ulaşım sorunlarını çözmek için hibrit bir GA geliştirmişlerdir. TSPD ve FSTSP, bir aracın siparişi müşteriye mümkün olan en kısa zamanda ulaştırmasını amaçlar. Bu iki problem arasındaki temel fark; TSPD’de dronun buluşma noktasına kamyonundan önce varması durumunda yere inip bekleyebilmesi, FSTSP’de ise havada süzülerek beklemek zorunda olmasıdır. Çalışmada, teslimat süresini (objektif fonksiyon) minimize etmek için GA, Dinamik Programlama (DP) ve Yerel Arama içeren 3 katmanlı bir yapı inşa edilmiştir. Yöntemin temeli, kamyon düğümlerinin pozitif, dron düğümlerinin ise negatif sayılarla temsil edildiği Tip-Farkındalıklı Kromozom (TAC) kodlamasıdır. Algoritmanın işleyişi aşağıdaki gibidir.

GA Katmanı (Üretim): Başlangıç popülasyonu, işaret ve yer değişikliği içeren eleman bazlı ve alt dizileri değiştirmeyi içeren dizi bazlı metotlarla oluşturulur. Evrim sürecinde, turnuva ile seçilen ebeveynlere Tür Farkında Sıra Çaprazlama (TOX) ve iki farklı mutasyon (İşaret Mutasyonu, Tür Mutasyonu) uygulanır.

DP Katmanı (Değerlendirme): GA tarafından üretilen her bir kromozom sıralama olarak ele alınarak, JOIN adlı DP algoritmasıyla değerlendirilir. Bu algoritma, GA’dan gelen sıralama için en uygun dron kalkış ve iniş noktalarını bularak On2 değerindeki düşük bir karmaşıklıkla toplam teslimat süresini, yani uygunluk değerini hesaplar.

Yerel Arama Katmanı (İyileştirme): JOIN tarafından uygunluk değeri hesaplanan ve uygulanabilir olan çözümlere, kalitelerini daha da artırmak için yerel arama komşulukları uygulanır.

Algoritma, genetik çeşitliliği korumak amacıyla çözümleri üç farklı alt popülasyonda yönetir: (1) Uygulanabilir çözümler, (2) Tek uçuşta çoklu ziyaret yaparak kısıtı ihlal eden Tip 1 (Uygulanamaz) çözümler ve (3) Menzil aşımı yapan Tip 2 (Uygulanamaz) çözümler. Eğer bir çocuk kromozomda dron kısıtı ihlali olursa, çözüm belirli bir olasılıkla dron düğümünün kamyona dönüştürülmesiyle onarılır ve uygulanabilir hale getirilir. Ayrıca, yerel optimuma takılmayı önlemek için "kaçış stratejisi" adı verilen gelişmiş bir metot kullanılmıştır. Bu stratejide, uygunluk değeri daha zayıf olan bireyler bir tamponda tutulur ve bu bireylerin yerel optimum noktadan kaçacağı varsayılarak rastgele seçim yapılır. Sunulan bu hibrit GA yönteminin, 5 farklı veri kümesi üzerinde literatürdeki diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında hem daha başarılı sonuçlar verdiği hem de yeni en iyi çözümleri bulduğu yapılan deneylerle ispatlanmıştır.

Zhang vd. (2024), araçların Elektro-Hidrolik Fren Sistemleri (EHFS) için geliştirilen Durum Geri Besleme Kontrolü (SFC) yöntemindeki temel bir zorluğa çözüm sunmuşlardır. Geleneksel SFC’de kontrol performansını doğrudan etkileyen katsayı matrislerinin en uygun değerlerinin belirlenmesi güç olduğundan, çalışma bu sorunu çözmek için Parametre-Adaptif GA (PAGA) tabanlı bir optimizasyon yöntemi önermektedir. Çalışmalarında, iki temel mekanizmaya dayanan bir yenilik getirmişlerdir. Bunlardan ilki, kontrol sırasında hedeflenen fren basıncının üzerine çıkılmasını engellemek amacıyla GA’nın uygunluk fonksiyonuna bir ceza terimi eklenmesidir. İkincisi ise standart GA’nın yavaş yakınsama ile yerel optimuma takılma sorunlarını aşmak için çaprazlama ve mutasyon olasılıklarını bireylerin uygunluğuna göre dinamik olarak ayarlayan adaptif bir yapı kullanılmasıdır.

Simülasyon sonuçları ile değerlendirilen PAGA yönteminin; standart GA, Parçacık Sürüşü Optimizasyonu (PSO) ve Karınca Kolonisi Optimizasyonu gibi diğer algoritmalara göre daha hızlı yakınsadığı ve yerel optimumdan kaçınmada daha başarılı olduğu ispatlanmıştır. Sonuç olarak, PAGA ile optimize edilen kontrolcünün, geleneksel SFC ve Oransal İntegral (PI) kontrolcülerine kıyasla farklı yük koşulları altında daha hızlı tepki süresine, daha iyi kararlılığa ve aşırı sapmayı etkin bir şekilde bastırma yeteneğine sahip olduğu kanıtlanmıştır.

Huang vd. (2024), meme kanseri dijital patoloji görüntülerindeki çoklu eşik belirleme problemini, Geliştirilmiş GA kullanarak optimize etmişlerdir. Çalışmada, görüntüleri bölmek için optimal eşik değerlerinin, uygunluk fonksiyonunu maksimize edecek şekilde tespit edilmesi amaçlanmıştır. GA süreci, eşik değerlerinin reel sayı kodlama şeması ile temsil edildiği rastgele bir başlangıç popülasyonunun oluşturulmasıyla başlar. Yöntemde, seleksiyon aşamasında standart yaklaşımlar yerine monarşik strateji kullanılmış ve çaprazlama operatörleri iyileştirilmiştir. Modelin başarısı; F1 skoru ve hassasiyet gibi çeşitli metriklerle farklı başlangıç koşulları altında test edilmiş; geleneksel yöntemlerin yanı sıra Segment Anything Model (SAM) ile de kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlar, geliştirilen GA yapısının hem yakınsama hızı hem de yüksek hassasiyetli segmentasyon kalitesi bakımından diğer yaklaşımlardan daha üstün ve kararlı olduğunu göstermiştir.

Mao vd. (2025), nedensel keşif problemlerinde kullanılan GA’nın yavaş yakınsama ve yerel optimuma takılma sorunlarını çözmek amacıyla Alan Bilgisi ile Geliştirilmiş GA (IGADK) modelini sunmuşlardır. Nedensel keşifte kullanılan geleneksel modellerde alan bilgisi süreç ile bütünleştirilemez ve mutasyon operatörünün rastgele çalışması keşif ve geliştirmede dengenin korunmasını zorlaştırırken; bu çalışmada, alan bilgisi uygunluk fonksiyonuna ödül mekanizması ile entegre edilmiş ve gelişmiş bir mutasyon operatörü ideal

gen setine göre uyarlanabilir hale getirilmiştir. Burada alan bilgisinin doğruluğundan emin olunamadığı durumda örneklem boyutu arttıkça alan bilgisinin ağırlığı logaritmik olarak azaltılarak yanlış bilginin model üzerindeki etkisi minimize edilmiştir.

IGADK modeli geliştirilirken dört farklı varsayımdan faydalanılmıştır: her düğümün yalnızca ebeveyn düğümünden etkilenmesi, gözlemlenmeyen faktörlerin keşfe müdahalesini ortadan kaldırma, bir olayın başka bir olayın tahminine destek olması ve nedensel keşif için bir alan bilgisinin varlığı. Geliştirilen sistem ilk olarak aralarında ilişki olan düğümleri 1, olmayan düğümleri 0 ile temsil ederek nedenselliğe dayalı ikili matris kodlaması kullanır. Mutasyon operatörü tarafında yapılan geliştirmede ise, mükemmel bireyler korunarak daha iyi bireyler üretmek için mükemmel bireylerin mutasyon oranı azaltılmış, düşük kalitedeki bireylerin ise artırılmıştır. Mükemmel bireyler popülasyonda uygunluk fonksiyonundaki skorlamadan en yüksek değeri alan en iyi düğümlerden oluşan ideal genlerdir.

IGADK'nın performansı puan tabanlı nedensel keşif algoritması (K2 algoritması) ve klasik GA ile karşılaştırılmıştır. IGADK'nın hesaplama karmaşıklığının klasik GA ile benzer seviyede olduğunu, ancak düğüm sayısı arttığında faktöriyel karmaşıklığa sahip K2 algoritmasına kıyasla çok daha ölçeklenebilir ve düşük maliyetli olduğunu analiz etmişlerdir. Karşılaştırma sinerjiyle ilişkili nedenselliğe sebep olabilecek beş farklı neden üzerinden alan bilgisi olmayan, doğru alan bilgisi olan, kısmi doğru alan bilgisi olan ve yanlış alan bilgisi olan dört farklı senaryo üzerinden yürütülmüştür. Sonuçlar, IGADK'nın klasik GA'dan çok daha hızlı yakınsadığını göstermiştir. Özellikle doğru alan bilgisi kullanıldığında algoritma çok düşük örneklem boyutlarında bile doğru nedensel yapıyı keşfedebilmiş; yanlış alan bilgisi verildiğinde ise veri sayısı arttıkça hatalı bilgiyi elimine ederek sağlam bir performans sergilemiştir.

UYGULAMA VE MODEL GELİŞTİRME ÇALIŞMALARI

Awad vd. (2023), Boolean fonksiyonları ile tanımlanan sistemlerde değişken sıralamasını optimize ederek İkili Karar Diyagramlarının (BDD) boyutunu küçültmek amacıyla GA ve Sürü Tabanlı yaklaşımlar geliştirmişlerdir. Problem çözümünde GA'nın uygunluk fonksiyonu, BDD'nin boyutu olarak belirlenmiştir. Amaç, optimum sıralamaya GA ile uygun bir sürede ulaşmaktır. Çalışmada önerilen Sürü Tabanlı algoritma ile gerçek sayılardan oluşan sürekli bir vektör üretilmiş ve bu vektör bir eşleme fonksiyonuyla ayrık permütasyonlara dönüştürülerek BDD sıralaması elde edilmiştir. GA tarafında ise, çaprazlama ve mutasyon operatörleri belirlenen oranlarda karıştırılarak arama uzayında keşif ve sömürü dengesi korunmuştur. Bu süreçte, Durağan Durum stratejisi izlenerek,

yeni üretilen daha iyi çözümler popülasyondaki en kötü çözümlerle değiştirilmiş ve erken yakınsama probleminin önüne geçilmiştir. Çaprazlama ve mutasyon operatörlerinin karışımı, oluşturulan ilk popülasyonda rastgele seçilen permütasyon çiftleri üzerinde uygulanmıştır. Bu süreç popülasyon üzerinde yinelemeli olarak maksimum iterasyon sayısına ulaşana kadar çalıştırılmış ve daha iyi çözümler belirlenmiştir.

Yazarlar, GA'nın performansını 7 farklı GA operatörü ile değerlendirmiş; büyük ve karmaşık fonksiyonlarda Cycle Crossover ile Shuffle Mutation kombinasyonunun en iyi sonucu verdiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca yürüttükleri sürü tabanlı testlerde, Moth-Flame Optimization algoritmasının GA'dan ve diğer sürü algoritmalarından daha iyi performans sergilediğini göstermişlerdir. Geliştirilen bu yaklaşımları Tersinir Mantık Sentezi problemine uygulayarak devrelerin kuantum maliyetlerinde belirgin bir düşüş sağlandığını da ispatlamışlardır.

Li vd. (2024), Diferansiyel Gizlilik (DP) K-Means algoritmalarının karşılaştığı önemli bir optimizasyon sorununa GA tabanlı bir çözüm sunmuştur. DP K-Means'teki temel zorluk, toplam gizlilik bütçesinin (ϵ) algoritmanın çoklu iterasyonları arasında nasıl paylaştırılacağıdır. Bu bütçe dizisinin seçimi; algoritmanın yakınsamasını, kümeleme kalitesini ve kullanılabilirliğini doğrudan etkileyen NP-Zor bir problem oluşturmaktadır. Yazarlar, Kombinatoriyel optimizasyon problemi olarak tanımlanan bu sorunu çözmek için GA'ya Dayalı Gizlilik Bütçesi Ayırma Stratejisi (GAPBAS) adlı bir yöntem önermişlerdir.

Bu yöntemde GA'nın rolü, bu karmaşık ve kısıtlı arama uzayı içerisinde en yüksek kümeleme performansını sağlayacak optimal bütçe dizisini evrimsel yollarla keşfetmektir. Bu amaçla GA'daki her bir birey, $\text{seq}=1,2, \dots, \epsilon T$ şeklinde bir gizlilik bütçesi dizisini temsil edecek biçimde kayan noktalı kodlama yöntemiyle kodlanmıştır. Her bir bireyin (bütçe dizisinin) uygunluğu, o dizi kullanılarak çalıştırılan DP K-Means algoritmasının kümeleme kalitesini gösteren Normalleştirilmiş Küme İçi Varyans (NICV) metriği ile ölçülmüştür.

Popülasyonu evrimleştirmek için seçim operatörü olarak rulet tekeri seçimi, çaprazlama için iki noktalı çaprazlama ve mutasyon için üniform mutasyon operatörleri kullanılmıştır. Bu operatörler aracılığıyla nesiller boyu iyileştirilen popülasyonda, GA süreci belirlenen iki temel kısıt altında çalıştırılmıştır: 1) Her bir iterasyonun bütçesi, algoritmanın yakınsamasını garanti eden minimum bir eşik değerden büyük olmalıdır; 2) dizideki tüm bütçelerin toplamı, belirlenen toplam gizlilik bütçesini aşmamalıdır.

Dört farklı veri kümesi üzerinde yapılan deneysel çalışmalarda GAPBAS yöntemi; Aritmetik Dizi ve Üçlü Bölüm (ASTS), İkili Bölüm (DAS), Seri Toplam (SSAS) ve Aritmetik İlerleme (APAS) olarak adlandırılan dört farklı

bütçe ayırma stratejisiyle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, GA'nın optimize ettiği bütçe dağıtım stratejisinin, aynı gizlilik koruma seviyesinde diğer bütçe dağıtım stratejilerine kıyasla daha başarılı bir kümeleme performansı sağladığını göstermiştir.

Zhou vd. (2024), jeotermal alanında GA'yı baskın akış yollarından kaynaklanan kısa devre problemini çözmek amacıyla kullanmışlardır. Kızgın Kuru Kaya (HDR) rezervuarlarının işletilmesini sağlayan Geliştirilmiş Jeotermal Sistemler (EGS), kayaların heterojen yapısı sebebiyle ısı alışverişini engelleyen kısa devre etkisine maruz kalmaktadır; bu durum kaya çatlak ağı içerisinde ısı transferinin verimsizleşmesine yol açmaktadır.

Yazarlar, rezervuardaki bu akış yollarını belirlemek amacıyla GA ve kübik Bezier eğrilerini entegre eden bir ters çözüm modeli önermişlerdir. Kontrol noktalarından karmaşık eğriler türeten kübik Bezier yöntemi akış yolunu modellemek için kullanılmış; bu yapı Termal-Hidrolojik (TH) modele, TH model ise GA'nın uygunluk fonksiyonu olarak sisteme entegre edilmiştir. GA üzerine kurulan bu sistemde, uygunluk fonksiyonu olarak görev yapan TH model ile farklı akış yollarındaki sıcaklık tepkileri hesaplanmıştır. Uygunluk değerlendirmesi, seçim, çaprazlama ve mutasyon gibi klasik GA operatörleri belirlenen kriterler sağlanana kadar yinelenmiştir.

Modelin başarısı farklı geometrik yapılarıdaki akış kırıkları üzerinde değerlendirilmiş ve sonuçlar, modelin %82 ve üzeri yüksek bir tespit hassasiyetine sahip olduğunu göstermiştir.

Kim ve Eor (2025), deterministik olmayan polinom zamanlı tam (NP-complete) problem sınıfında yer alan Sudoku bulmacalarını çözmek amacıyla, GA'ya dayalı Üst Güven Sınırı (GA-UCB) isimli bir hibrit yaklaşım geliştirmişlerdir. Bu yaklaşımda, bir pekiştirmeli öğrenme (RL) algoritması olan Çok Kollu Haydut (MAB) yöntemi seleksiyon operatörüne yerleştirilerek GA'nın popülasyon kalitesini artırması ve keşif-sömürü (exploration-exploitation) dengesini sağlaması hedeflenmiştir.

MAB, mevcut bilgilerle en iyi eylemi seçme (sömürü) ile potansiyel olarak daha iyi sonuçlar verebilecek yeni eylemleri deneme (keşif) ikilemini yöneten bir yaklaşımdır. Çalışmada her bir aday çözüm (kromozom) bir kol olarak modellenmiş ve bir ajan, bu kolların başarı olasılıklarını deneme-yanılma yoluyla öğrenmeye çalışmıştır. Kullanılan UCB algoritması, bir kolun potansiyelindeki belirsizliği o kolun seçilme sayısına bağlı olarak değerlendirir; böylece düşük uygunluk değerine sahip ancak potansiyeli olan adayların da seçilme şansı bulmasını sağlar.

Uygulama aşamasında, başlangıç popülasyonu oluşturulurken boş hücrelere, ilgili alt blokta tekrar etmeyecek rastgele sayılar atanarak Sudoku'nun alt blok

kısıtlaması baştan sağlanmıştır. Uygunluk değeri Sudoku kurallarına (satır ve sütun çakışmaları) göre hesaplanmış ve çözüm durumunda bu değerin 1'e (normalize edilmiş tam uyum) ulaşması hedeflenmiştir. Seleksiyonda ise UCB ajanı tarafından seçilen ebeveynlerin çaprazlanması sonucu oluşan bireyin uygunluk değeri, referans alınan ebeveynden yüksekse sisteme ödül (1), değilse ceza (0) verilmiştir. Çaprazlamada alt bloklar birer gen olarak kabul edilip bloklar arası geçiş yapılırken, mutasyon işlemi blok içi yer değiştirmelerle gerçekleştirilmiştir. Bu operatörler tekrarlanarak adayların güçlenmesi sağlanır.

Algoritmanın yerel optimumda takılmasını önlemek amacıyla, uygunluk değerinin belirli bir süre değişmediği durumlarda popülasyonu yeniden başlatan bir yeniden başlatma mekanizması geliştirilmiştir. Yapılan testlerde de yeniden başlatma mekanizmasının, algoritmanın takıldığı durumlarda global optimuma ulaşmasını sağladığı görülmüştür.

Geliştirilen GA-UCB, Yerel Arama GA (LSGA), Düğüm Tabanlı Tesadüf (NB-COIN), Yapı Taşlarını Koruyan GA (GA-1) ve Yerel Optimumlarla Başa Çıkan GA (GA-2) ile kıyaslanmıştır. Kolay bulmacalarda %100 başarı elde edilirken, orta seviyede GA-UCB ikinci en hızlı yakınsayan algoritma olmuştur. Zor bulmacalarda ise GA-UCB rakiplerine kıyasla %55 daha hızlı yakınsama sağlamıştır. Analizler, problem zorluğu arttıkça (dolu hücre sayısı azaldıkça) gereken jenerasyon sayısının arttığını ortaya koymuştur. Buna göre, GA-UCB'nin başarısının başlangıçtaki dolu hücre sayısı ile ilişkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Yazarlar bu yeni algoritmanın performansını değerlendirmek için kümülatif pişmanlık metriği ile MAB tahminlerinin doğruluğunu ölçmüşlerdir. Kümülatif pişmanlık analizleri, nesiller ilerledikçe ajanın seçimlerinin iyileştiğini ve optimuma yaklaştığını doğrulamıştır. Ayrıca, süper zor kategorisindeki bulmacalarda GA-UCB 10.000 jenerasyonda çözüm bulamazken, limit 1.000.000 jenerasyona çıkarıldığında %100 başarı oranına ulaşmıştır.

KARŞILAŞTIRMALI VE KIYASLAMALI ÇALIŞMALAR

Sinha vd. (2023), denizcilik faaliyetlerinde önemli etkiler taşıyan solügan dalga yüksekliklerinin tahmini üzerine karşılaştırmalı bir çalışma yürütmüşlerdir. Çalışmada, Bengal Körfezi'ndeki dalga yüksekliklerini modellemek amacıyla GA ve Derin Öğrenme modellerinin tahmin başarılarını karşılaştırmışlardır. Zaman serisi analizlerinde GA ile derin öğrenme modellerinden LSTM ve BiLSTM kullanılmıştır. Hem zaman serisi hem de havza ölçeğindeki tahminlerde GA'dan yararlanılmış; havza ölçeği için veriler EOF analizinden geçirilerek tahmin denklemi üreten hibrit bir EOF-GA modeli geliştirilmiştir.

Yazarlar, modellerin tahmin edilen değerler yerine gözlemlenen değerlerle güncellendiği durumlarda doğruluğun arttığını vurgulamışlardır. Ayrıca seçtikleri bölgeler üzerinde GA ve derin öğrenme modellerinin performanslarını karşılaştırmışlardır. Bu karşılaştırma sonucunda sakın deniz koşullarında derin öğrenme modellerinin (özellikle BiLSTM) 0,09 metreye kadar düşen RMSE değeri ile daha yüksek başarı gösterdiği; şiddetli hava koşullarında (siklon varlığında) ise GA modelinin 0,1 metre RMSE değeri ile daha yüksek başarı gösterdiği gözlemlenmiştir.

Ayoola ve Ogunfunmi (2023), meme kanseri tümör tespitinde kullanılan GA'nın tahmin başarısını geliştirmek amacıyla; GA'yı filtre, sarmalayıcı ve gömülü öznitelik seçim algoritmaları (FSA) ile birleştirmişler ve bu yöntemlerin başarılarını hem hibrit hem de bireysel olarak karşılaştırmışlardır. Wisconsin Meme Kanseri veri kümesi üzerinde yaptıkları analizde; filtre algoritmaları özniteliklerin hedef ile arasındaki korelasyon ilişkisine bakarak öznitelik seçimi yaparken, GA'nın da dahil olduğu sarmalayıcı algoritmalar modelleri seçilen öznitelik üzerinde eğiterek kullanılabilirliğini analiz etmektedir. Gömülü algoritmalar ise yerleşik bir model ile metrikleri öğrenme sürecinde işlemektedir.

Çalışmada Random Forest (RF) ile iyi huylu/kötü huylu tümör sınıflandırması yapılmıştır. Hibrit modellerin kombinasyonları 3 farklı durumda çalıştırılarak test edilmiştir. İlk durumda veri kümesi önce GA'ya girdi olarak verilmiş; GA tarafından seçilen öznitelikler daha sonra filtre ve gömülü FSA'lara iletilerek veri RF sınıflandırıcısına gönderilmiştir. İkinci durumda veri kümesi FSA'lara girdi olarak verilmiş, seçilen öznitelikler GA'ya iletilerek elde edilen çıktı kümeleri RF sınıflandırıcısına gönderilmiştir. Son durumda ise özniteliklerin önceki durumlardaki birleşimi RF sınıflandırıcısına sunulmuştur.

Karşılaştırmalı analizde; Durum 1'de en yüksek başarıyı %99,12'lik doğruluk skoru ile GA ile birleştirilen Fisher Score isimli filtre FSA yöntemi göstermiştir. Durum 2'de ise gömülü algoritma olan Tree-based ile birleştirilen GA %97,37'lik bir doğrulukla en başarılı sonucu vermiştir. Son olarak Durum 3'te en başarılı sonucu, yine gömülü bir algoritma olan L1 Lasso ile birleştirilen GA, %98,25 doğruluk ile elde etmiştir. Geliştirilen bu metodolojilerin sonucunda, algoritmaların uygulanma sırasının başarı üzerinde etkisi olduğu ve en başarılı sonucun Durum 1 metodolojisinde elde edildiği sonucuna varılmıştır.

Liu vd. (2024), biçerdöverlerin arızalanması durumunda uygulanacak acil durum planlamasını, GA ve Karınca Koloni Algoritması (KKA) ile geliştirdikleri hibrit bir yaklaşımla (GA-KKA) optimize etmişlerdir. Çalışma, GA'nın global arama yapısına KKA'nın yerel arama kabiliyetini ekleyerek, çözümün yerel optimuma takılma riskini azaltmayı hedeflemiştir. Yazarlar, zamanlamanın kritik olduğu hasat operasyonlarında ani arızaların yol açtığı plan sapmalarını ve

ekonomik kayıpları en aza indirmek amacıyla, acil durum planlama maliyetlerini minimize eden ve işin en hızlı şekilde tamamlanmasını sağlayan bir model sunmuşlardır.

Öncelikle arıza durumları ve gereklilikler bir matematiksel model ile ifade edilmiştir. Objektif fonksiyon; toplam seyahat, operasyon, ceza maliyetleri ve arıza sonrası oluşan zaman sapma maliyetinin toplamından oluşmaktadır. Kısıtlar; biçerdöverlerin planlamalarını, çalışma kapasitelerini, ulaşım, gecikme ve bekleme sürelerini içerir. Bekleme maliyeti, biçerdöverin en erken başlama süresinden daha erken varması durumunda, gecikme (penaltı) maliyeti ise en geç bitiş süresinden daha geç varması durumunda uygulanmaktadır. Karar değişkenleri, bir biçerdöverin tarlalar arasında rotasını belirleyen ve herhangi bir tarlaya atanıp atanmadığını ifade eden iki adet ikili değişkendir.

GA-KKA algoritması, GA ile arızalı biçerdöverlerin bilgisini, arıza zamanını, makine parametrelerini ve arazi bilgilerini alarak tam sayı kodlaması ile başlangıç popülasyonunu oluşturur. Görevler, makine ve arazi arasındaki uzaklığa göre ölçeklendirilir. Bu süreçte KKA, feromon konsantrasyonunu güncelleyerek bulduğu etkin çözümleri GA popülasyonu ile birleştirmiştir. Erken yakınsamayı önlemek amacıyla feromon konsantrasyonu belirli bir aralıkla sınırlandırılmıştır. GA sürecinde seçim için Rulet tekerleği, çaprazlama için Kısmi Eşleştirmeli Çaprazlama (PMX) ve mutasyon operatörleri kullanılırken; elitizm stratejisi ile en iyi birey korunarak bir sonraki nesle aktarılır.

Yapılan karşılaştırmalı analizde, geliştirilen hibrit algoritmanın performansı standart GA ve standart KKA ile kıyaslanmıştır. Rastgele oluşturulmuş üç farklı arıza senaryosunda, hibrit algoritmanın maliyeti standart GA'ya kıyasla sırasıyla %47,49, %19,60 ve %32,45; standart KKA'ya kıyasla ise %34,70, %14,80 ve %24,40 oranında azalttığını göstermiştir. Sonuçlar, GA-KKA yaklaşımının iki algoritmanın avantajlarını başarıyla birleştirdiğini göstermektedir. GA'nın global arama yeteneği ile genel çözüm uzayı etkin bir şekilde taranırken, KKA'nın yerel arama kabiliyeti ile plan optimize edilmiştir.

TEORİK VE ANALİTİK ÇALIŞMALAR

Jiacheng ve Lei (2020), yerel optimum değerde takılıp kalma sorununa sahip olan klasik GA'ya çözüm olarak Bilgi Entropisi ve Oyun Teorisi temelli hibrit bir GA yaklaşımı önermişlerdir. Bu yaklaşımda Bilgi Entropisi, popülasyonun çeşitliliğini nicel olarak ölçmek için kullanılmıştır. Çalışmada, uygunluk fonksiyonu yerine bireylerin kodlama yapılarındaki benzerlikleri temel alan bir entropi hesaplaması kullanılmıştır. Başlangıç popülasyonu, kritik bir entropi eşiği (S_0) kullanılarak oluşturulmuş; $S > S_0$ koşulunu sağlayan yani yeterince farklı

olan kromozomların kabul edilmesiyle yüksek çeşitliliğe sahip bir başlangıç popülasyonu elde edilmiştir.

Oyun Teorisi mekanizmasını uygulayabilmek için, oyuncular olarak görev yapan üç farklı alt popülasyon; Standart GA (SGA), Partheno GA (PGA) ve Hibrit GA (SGA-PGA) metotlarını çalıştıran paralel bir mimaride tasarlanmıştır. Bu model, bireysel kazançtan ayrı olarak kolektif faydayı maksimize etmeyi amaçlayan bir işbirlikçi oyun olarak kurgulanmıştır. Sistemin ana stratejisi, üç popülasyonun anlık entropi durumlarına göre dinamik olarak belirlenir:

İş birliği Modu: Tüm popülasyonların çeşitliliği S_0 eşiğinin altına düştüğünde yani yerel optimuma takılma sinyali verdiğinde, gruplar birleştirilir, düşük uygunluk değerine sahip bireyler elenir ve popülasyonlar çeşitliliği artırmak için yeniden dağıtılır.

Rekabet Modu: Tüm popülasyonların çeşitliliği yüksekse, en iyi uygunluk değerine sahip birey diğer gruplara kopyalanarak global optimuma yakınsama hızlandırılır.

Koordinasyon Modu: Gruplar arasında çeşitlilik dengesizliği varsa, çeşitliliği yüksek olan gruplardan, çeşitliliği azalıp takılıp kalmış olan gruplara birey aktarımı yapılarak denge sağlanır.

Bu hibrit model Rosenbrock, Rastrigin ve Schaffer test fonksiyonları üzerinde standart SGA, PGA ve SGA-PGA yöntemleriyle karşılaştırmıştır. Sonuçlar, geliştirilen Bilgi Entropisi ve Oyun Teorisi tabanlı hibrit algoritmanın; yüksek çözüm doğruluğu, hızlı yakınsama oranı ve hem global hem de yerel arama performansında geleneksel yöntemlere göre daha başarılı çalıştığını göstermiştir.

Albadr vd. (2020), geleneksel GA'nın çözüm uzayını tarama (keşif) ve yerel optimuma odaklanma (sömürü) yetenekleri arasındaki dengesizliği gidermek amacıyla Doğal Seçilim Teorisine Dayalı GA (GABONST) yöntemini önermişlerdir. Çalışmada GABONST her iterasyonda popülasyonun ortalama uygunluk değerini bir eşik olarak kabul etmektedir. Her kromozom için hesaplanan uygunluk değerleri ortalamadan küçük veya eşit ise mutasyon operatörü uygulanarak o kromozomun doğrudan diğer jenerasyona aktarılması sağlanmış; büyük ise o kromozom iki aşamalı bir geliştirilme sürecinden geçirilmiştir. İlk aşama popülasyonun en iyi 5 bireyi arasından rastgele seçilen biriyle çaprazlanmadır. Diğer aşama ise bu işlem sonucunda iyileşme göstermeyen zayıf kromozoma mutasyon uygulanarak güçlendirilmesidir. Bu iki aşamaya rağmen iyileşme göstermeyen bireylerin sistemden silinip yerlerine rastgele yenilerinin atanmasıyla genetik çeşitlilik korunmuştur.

Bu çalışmada başarı, 15 farklı kıyaslama fonksiyonu kullanılarak ve Ekstrem Öğrenme Makinesi (ELM) ile entegre edilerek test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, GABONST'un geleneksel GA, Bat ve Bee algoritmalarına kıyasla daha

hızlı yakınsadığını ve Konuşma Dili Tanıma (LID) probleminde %99,38 gibi yüksek bir doğruluk oranına ulaştığını göstermiştir.

Langazane ve Saha (2022), dağıtım sistemlerinde aşırı akım röleleri koordinasyon problemlerini çözmek ve sistemin hassasiyetini analiz etmek amacıyla PSO ve GA kullanmış; algoritmaların uygunluk fonksiyonu değerleri ve yakınsama performanslarını karşılaştırmışlardır. Dağıtım sistemlerinde aşırı akım gibi anormal bir durum oluştuğunda, çeşitli devre elemanlarını içeren koruyucu sistemler devreye girerek hataların önüne geçmektedir. Aşırı akım rölesinin çalışma süresi ve çalışma sırası ters kesin minimum zaman (IDMT) ve koordinasyon zaman aralığı (CTI) denklemleri ile yönetilir. Çalışma süresini ve çalışma sırasını belirlerken performansı artırmak için denklemlerdeki zaman çarpanı değerini (TMS) minimize etmek amacıyla evrimsel algoritmalar kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, 132 kV'luk bir dağıtım şebekesi üzerinde, kısıt ihlalleri için ceza faktörü de kullanılarak GA ve PSO'nun kontrol parametreleri ile hassasiyet analizi gerçekleştirilmiştir. PSO'nun sürü boyutu, yineleme sayısı ve eylemsizlik ağırlığı parametreleri; GA'nın ise popülasyon boyutu, çaprazlama değeri ve mutasyon oranı parametreleri incelenmiştir. Değerlendirme aşamasında, minimum röle çalışma süresi olan en iyi uygunluk değerini elde eden, en az yineleme ile global çözümü bulan ve çeşitlilik sağlayan algoritma parametreleri başarılı kabul edilmiştir.

Sonuçlarda, PSO'nun eylemsizlik ağırlığı ve sürü boyutu parametrelerine daha duyarlı olduğu yineleme sayısına ise fazla bir etki göstermediği görülmüştür. Sürü boyutu 10'dan 500'e kadar artırıldıkça işlem süresi uzarken algoritma daha iyi sonuçlar bulmuş fakat küçük sürü boyutlarında röleler çok yavaş çalışarak koordinasyon hataları oluşmuştur. İterasyon sayısı ise 100'den 1000'e kadar değişen değerlerde artırılmış fakat sonuçlarda pek bir değişiklik gözlenmemiştir. Eylemsizlik ağırlığı ise farklı stratejilerle test edilmiş lineer olarak azalan (0,9-0,4) stratejinin en başarılı sonucu verdiği görülmüştür.

GA tarafında ise düşük çaprazlama ve mutasyon oranlarının küçük popülasyonlarda hızlı yakınsama sağladığı ve uygunluk fonksiyonunu optimize ettiği saptanmıştır. Çaprazlama oranı 0,3 ile 0,9 aralığında değişik değerlerle test edilmiş oran arttıkça çözümün kötüleşerek uygunluk fonksiyonunda ve yakınsamada artışa sebep olduğu gözlemlenmiştir. Mutasyon oranındaki 0,02'den 0,30'a kadar değişken değerlerde de çaprazlama oranına benzer olarak yüksek mutasyon oranı yakınsamayı yavaşlatırken yüksek uygunluk değeri ile sonuçlanmış, düşük mutasyon oranı ise algoritmanın performansını iyileştirmiştir. Popülasyon boyutundaki değişikliklerde (10'dan 500'e kadar)

büyük popülasyonun yavaş yakınsama ve daha iyi çözüm yani düşük uygunluk değeri ile sonuçlandığı görülmüştür.

Karşılaştırma sonucunda; PSO rölelerin toplam çalışma süresini 6,169 saniye değerine, GA ise 7,239 saniye değerine yakınsamış, PSO daha başarılı performans göstermiştir. Yazarlar, sonuçlardan yola çıkarak parametrelerden aldıkları geri dönüşlerle çalışan evrimsel durum tabanlı Modifiye Edilmiş PSO (MAPSO) geliştirmiş ve rölelerin toplam çalışma süresini 4,331 saniyeye düşürerek koruma sisteminin hızını ve seçiciliğini maksimize etmişlerdir.

SONUÇLAR

İncelenen çalışmalar, GA'nın birçok problemin çözümünü optimize etmede etkin bir şekilde kullanıldığını göstermiştir. Farklı alanlarda optimum çözüme ulaşmayı sağlayan GA, literatürde önemli bir yere sahip metasezgisel bir yöntemdir. Özellikle evrimsel süreçleri modellemesi, algoritmanın mantığının kavranmasını ve farklı problemlere uyarlanmasını kolaylaştırmıştır. Bu sayede birçok karmaşık problem, GA mantığıyla modellenerek evrimsel iterasyonlar sonucu çözüme kavuşturulmuştur. İleride yapılacak daha kapsamlı literatür taramaları ile burada değinilmeyen farklı problem türlerinde GA'nın performansı da değerlendirilebilir.

KAYNAKÇA

- Albadr, M. A., Tiun, S., Ayob, M., & Al-Dhief, F. (2020). Genetic algorithm based on natural selection theory for optimization problems. *Symmetry*, 12(11), 1758. <https://doi.org/10.3390/sym12111758>
- Awad, A., Hawash, A., & Abdalhaq, B. (2023). A genetic algorithm (GA) and swarm-based binary decision diagram (BDD) reordering optimizer reinforced with recent operators. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 27(3), 535-549. <https://doi.org/10.1109/TEVC.2022.3170212>
- Ayoola, J. A., & Ogunfunmi, T. (2023). A comparative analysis of hybridized genetic algorithm in predictive models of breast cancer tumors. *IEEE Access*, 11, 87111-87119. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3304330>
- Holland, J. H. (1992). Genetic algorithms. *Scientific American*, 267(1), 66-73. <https://doi.org/10.2307/24939139>
- Huang, T., Yin, H., & Huang, X. (2024). Improved genetic algorithm for multi-threshold optimization in digital pathology image segmentation. *Scientific Reports*, 14(1), 22454. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-73335-6>
- Jiacheng, L., & Lei, L. (2020). A hybrid genetic algorithm based on information entropy and game theory. *IEEE Access*, 8, 36602-36611. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2971060>
- Kim, J. L., & Eor, E. (2025). A genetic algorithm for solving sudoku based on multiarmed bandit selection. *IEEE Transactions on Games*, 17(2), 429-441. <https://doi.org/10.1109/TG.2024.3487861>
- Langazane, S. N., & Saha, A. K. (2022). Effects of particle swarm optimization and genetic algorithm control parameters on overcurrent relay selectivity and speed. *IEEE Access*, 10, 4550-4567. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3140679>
- Li, Y., Song, X., Tu, Y., & Liu, M. (2024). GAPBAS: Genetic algorithm-based privacy budget allocation strategy in differential privacy K-means clustering algorithm. *Computers and Security*, 139, 103697. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2023.103697>
- Liu, H., Zhang, L., Zhao, B., Tang, J., Luo, J., & Wang, S. (2024). Research on emergency scheduling based on improved genetic algorithm in harvester failure scenarios. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1413595. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1413595>
- Mahmoudinazlou, S., & Kwon, C. (2024). A hybrid genetic algorithm with type-aware chromosomes for Traveling Salesman Problems with Drone.

- European Journal of Operational Research, 318(3), 719-739. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2024.05.009>
- Mao, T., Bu, X., Cai, C., Lu, Y., & Du, J. (2025). An improved genetic algorithm for causal discovery. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 36(3), 768-777. <https://doi.org/10.23919/jsee.2025.000015>
- Sinha, M., Biswas, S., & Banerjee, S. (2023). Genetic algorithm and deep learning models compared for swell wave height prediction. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 102, 101365. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2023.101365>
- Zhang, J., Ding, L., & Long, S. (2024). State feedback control for vehicle electro-hydraulic braking systems based on adaptive genetic algorithm optimization. *International Journal of Intelligent Systems*, 2024, 3616505. <https://doi.org/10.1155/2024/3616505>
- Zhou, C., Liu, G., & Liao, S. (2024). Probing dominant flow paths in enhanced geothermal systems with a genetic algorithm inversion model. *Applied Energy*, 360, 122841. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122841>

4. Bölüm

Yapay Sinir Ağları Kullanan Güncel Çalışmaların Analizi

Oben ADAK¹, Mehmet ACI²

Özet

Bu çalışmada, Yapay Sinir Ağları temelli yaklaşımların uygulandığı 2022 ile 2026 yılları arasındaki literatür incelenmiş olup, 5 farklı yıla ait toplam 20 makale kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. İnceleme sonucunda; bu ağların hangi problemleri çözmek amacıyla kullanıldığı, katman ve nöron sayılarından oluşan ağ mimarilerinin probleme özgü olarak nasıl tasarlandığı ve modellerin tahmin ile sınıflandırma başarıları özetlenmiştir. Ayrıca, geliştirilen modellerin performansları, ele aldıkları problemlere özgü hata ve doğruluk oranlarını yansıtan çeşitli istatistiksel metrikler üzerinden değerlendirilerek literatürdeki yaklaşımların bir özeti sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Yapay Sinir Ağları, Derin Öğrenme, Çok Katmanlı Ağlar, Sınıflandırma, Regresyon

¹ Arş. Gör.; Mersin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, odenadak@mersin.edu.tr, ORCID No: 0009-0000-1289-437X

² Doç. Dr.; Mersin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, maci@mersin.edu.tr, ORCID No: 0000-0002-7245-8673

Giriş

Yapay Sinir Ağları (YSA), insan beyninin bilgi işleme prensiplerinden ilham alınarak tasarlanmış ve matematiksel temelleri ilk olarak 1943 yılında McCulloch & Pitts tarafından atılmış bir makine öğrenmesi teknolojisidir. Günümüzde yapay zekâ ve derin öğrenme teknolojilerinin temelini oluşturan bu sistemler dışarıdan verilerin alındığı giriş katmanı, verilerin işlendiği bir veya daha fazla gizli katman ve sonuçların üretildiği çıkış katmanından oluşan bir mimariye sahiptir. Bu katmanlar arasındaki bağlantı ağırlıkları ve matematiksel aktivasyon fonksiyonları sayesinde sistem, doğrusal olmayan karmaşık problemleri yüksek doğrulukla çözebilme yeteneği kazanmaktadır. Ağın bu karmaşık ilişkileri kavrayabilmesi, aşırı öğrenme sorunundan kaçınabilmesi ve yüksek tahmin başarısına ulaşabilmesi için büyük veri kümeleriyle eğitilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Başlangıçta belirli alanlarda kullanılan YSA, veri miktarındaki büyük artış ve özellikle gelişmiş grafik işlemci birimlerinin sunduğu donanım gücü sayesinde günümüzde çok daha geniş bir alanda tercih edilmektedir. Görüntü ve doğal dil işleme başta olmak üzere zaman serisi tahminlerinde, mühendislik optimizasyonlarında ve karmaşık kontrol sistemlerinde ve daha birçok alanda kullanılan bu ağların mimari yapıları, ele alınan problemin türüne göre geliştiriciler tarafından özel olarak tasarlanmaktadır. Bu çalışmada, YSA'ların sunduğu mimarinin ve büyük veri işleme kapasitesinin farklı mühendislik ve bilim dallarında nasıl uyarlandığını gözlemlemek amacıyla son beş yılda literatüre kazandırılmış çeşitli makaleler incelenmiştir.

2022 YILINDAKİ ÇALIŞMALAR

Sarkar vd. (2022) çalışmalarında, belirsiz talep ve enflasyon koşulları altındaki çok periyotlu envanter problemlerini çözmek amacıyla çoklu iş parçacığı mimarisine dayanan Çok Katmanlı Algılayıcı (Multi-Layer Perceptron - MLP) tabanlı bir YSA modeli geliştirmiştir. Modeldeki belirsizlikler ağırlık merkezi defuzzifikasyon yöntemi kullanılarak bulanık mantık yaklaşımıyla ele alınmıştır. Çalışmanın temel amacı, çift amaçlı bir optimizasyon fonksiyonu kurarak hem toplam sistem maliyetini hem de gereken depolama alanını eşzamanlı olarak minimize etmektir. Yapılan sayısal analizler sonucunda, çoklu iş parçacığına sahip YSA modelinin literatürdeki mevcut meta-sezgisel yöntemlere kıyasla hem maliyet ve alan optimizasyonunda daha başarılı olduğu hem de çözüm süresini mevcut algoritmaların süresinin %30'unun altına düşürerek ciddi bir Merkezi İşlem Birimi (Central Processing Unit - CPU) verimliliği sağladığı kanıtlanmıştır.

Xu vd. (2022) çalışmalarında, Katı Oksit Yakıt Hücrelerinin (Solid Oxide Fuel Cell - SOFC) performansını artırmak amacıyla Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamic - CFD), YSA ve Genetik Algoritma (GA) tabanlı hibrit bir optimizasyon çerçevesi sunmuştur. Çalışmada öncelikle geometrik, mikroskobik ve işletme koşullarını kapsayan 10 temel parametre kullanılarak 3 boyutlu bir CFD modeli oluşturulmuş ve bu modelden elde edilen verilerle bir veri kümesi hazırlanmıştır. Hesaplama maliyeti ve süresi yüksek olan CFD modelinin yerine geçecek bir vekil model (surrogate model) geliştirmek için, aralarında YSA'nın da bulunduğu 19 farklı makine öğrenmesi algoritması test edilmiştir. Değerlendirmeler sonucunda en yüksek tahmin doğruluğuna 0,9989 R2 değeri ile ulaşan YSA modeli seçilmiş; ardından GA kullanılarak sistemin güç yoğunluğunu maksimize edecek optimum çalışma parametreleri belirlenmiştir. Sonuç olarak, bu metodolojinin SOFC performans tahmini ve optimizasyonu için hem hızlı hem de yüksek doğruluklu bir çözüm sunduğu kanıtlanmıştır.

Yu & Tang (2022) Parkinson hastalarının L-dopa ilaç yönetimini kişiselleştirmek amacıyla alkali metal katkılı g-C₃N₄ tabanlı, enzimsiz ve esnek bir ter algılama çipi geliştirmiştir. Sensörden Bluetooth ile akıllı telefona aktarılan L-dopa akım sinyalleri; ortam sıcaklığı, nem, ter pH'ı ve fiziksel kullanıcı verileriyle birleştirilerek farklı makine öğrenmesi algoritmalarıyla analiz edilmiştir. Değerlendirmeler sonucunda Doğrusal Regresyon 0,009 ve Çoklu Doğrusal Regresyon 0,2047 R2 değerleri ile yetersiz kalırken; en düşük hata ve en yüksek doğruluğa sahip olan YSA optimum algoritma olarak seçilmiştir. Küçük veri kümesinden kaynaklanabilecek aşırı öğrenmeyi önlemek için k-katlı çapraz doğrulama uygulanan ve 2 birim Gauss beyaz gürültüsüyle 4000 döngüde optimize edilen YSA modeli, simüle edilmiş deneylerde bir sonraki doz zamanlamasını başarıyla tahmin ederek akıllı medikal denetim sistemleri için tutarlı ve genellenebilir bir yapı sunmuştur.

Wang vd. (2022) güç dönüştürücülerinde Model Öngörülü Kontrolün (Model Predictive Control - MPC) getirdiği yüksek hesaplama karmaşıklığını ve donanım gereksinimlerini aşmak amacıyla YSA tabanlı yeni bir yaklaşım (ANN-MPC) önermiştir. Çalışmada öncelikle sanal bir MPC kontrolcüsü tasarlanarak donanım döngüsü simülasyonlarından elde edilen giriş-çıkış verileriyle bir YSA modeli çevrimdışı olarak eğitilmiştir. Daha sonra bu eğitilmiş model kullanılarak ağır matematiksel hesaplamalara ihtiyaç duymayan, gerçek zamanlı çalışan Alanda Programlanabilir Kapı Dizisi (Field Programmable Gate Array – FPGA) tabanlı bir kontrolcü geliştirilmiştir. Tek fazlı 5 seviyeli ve üç fazlı 3 seviyeli Uçan Kapasitörlü (Flying Capacitors - FC) dönüştürücüler üzerinde yapılan deneysel testlerde, önerilen YSA tabanlı yöntemin geleneksel Sonlu Kontrol

Kümeli MPC (Finite Control Set MPC - FCS-MPC) ile eşdeğer bir kontrol performansı sunduğu kanıtlanmıştır. Sonuç olarak, ANN-MPC yaklaşımının yük akımı Toplam Harmonik Bozulma oranını %0,71 seviyesinde tuttuğu, bu değerin FCS-MPC yönteminde elde edilen %0,38 değerine oldukça yakın ve kabul edilebilir olduğu görülmüştür. Ayrıca işlem süresini %15 kısalttığı ve FPGA kaynak kullanımını iki kattan fazla azalttığı gösterilmiştir.

2023 YILINDAKİ ÇALIŞMALAR

Mahdavi-Meymand & Sulisz (2023) Kuzey Denizi'ndeki belirli bölgelerde belirgin dalga yüksekliklerini tahmin etmek amacıyla İç İç Geçmiş YSA (Nested Artificial Neural Network - NANN) tabanlı yeni bir yaklaşım sunmuştur. Çalışmada NANN ile Uyarlamalı Sinirsel-Bulanık Çıkarım Sistemi (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System - ANFIS) ve Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization - PSO) algoritmaları birleştirilerek NANN-ANFIS ve NANN-ANFIS-PSO olmak üzere iki farklı model geliştirilmiştir. Bu modellerin performansları geleneksel ANFIS, ANFIS-PSO ve Çoklu Doğrusal Regresyon (Multiple Linear Regression - MLR) yöntemleriyle kıyaslanmıştır. Modellerin eğitiminde 1949-2014 yıllarını kapsayan rüzgâr hızı ve rüzgâr yönü verileri kullanılmış; veri kümesi %70 eğitim, %15 doğrulama ve %15 test olarak ayrılmıştır. Elde edilen bulgulara göre, makine öğrenmesi modelleri geleneksel MLR modeline kıyasla tahminlerde %18,39 daha başarılı olurken; en düşük Hata Kareleri Ortalamasının Karekökü (Root Mean Square Error - RMSE) 0,525 ve en yüksek doğruluğa 0,84 R2 değeri ile ulaşan NANN-ANFIS-PSO algoritması en uygun model olarak belirlenmiştir. Ayrıca, geliştirilen NANN mimarisinin, geleneksel modellerin tahmin doğruluğunu %34'e kadar artırdığı ispatlanmıştır.

Kurnaz vd. (2023) çalışmalarında deprem kaynaklı zemin sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesindeki belirsizlikleri ve karmaşıklığı aşmak amacıyla hiperparametre optimizasyonuna dayalı bir YSA modeli önermiştir. YSA, Karar Ağaçları (Decision Tree - DT), Rastgele Orman (Random Forest - RF) ve Destek Vektör Regresyonu (Support Vector Regression - SVR) olmak üzere dört farklı makine öğrenmesi algoritması ile Rastgele Arama (Random Search - RS), Izgara Arama (Grid Search - GS) ve Bayes Optimizasyonu (Bayes Optimization - BO) algoritmaları kullanılmıştır. Üç farklı ülkeden toplanan tarihsel deprem verileri normalize edildikten sonra %70 eğitim ve %30 test olarak ayrılmış, eğitim veri kümesi 5-katlı çapraz doğrulama ile test edilmiştir. Değerlendirmeler sonucunda, 0,99'luk R2 değeri ile YSA diğer modellerden çok daha üstün bir performans sergilemiştir. Kendi içinde kıyaslandığında YSA-GS en düşük ortalama RMSE skorunu verirken; işlemci süresi ve donanım maliyeti

açısından YSA-RS'nin en verimli model olduğu görülmüştür. Genel ortalama ise hiperparametre optimizasyon algoritmalarından BO ve RS'nin en iyi sonuçları verdiği kanıtlanmıştır. Sonuç olarak, test aşamasında 0,9882; eğitimde 0,9940) R2 skoruna ulaşan hiperparametre optimizasyonunun, ortalama RMSE değerini YSA için %37,7, SVR için %14,6, DT için %47,9 ve RF için %15,0 oranında azalttığı tespit edilmiştir.

Alshanbari vd. (2023) çalışmalarında, Pakistan'daki doğrulanmış vaka, ölüm ve iyileşen hasta sayılarından oluşan günlük COVID-19 verilerini kullanarak salgının seyrini tahmin etmek amacıyla YSA ile beş farklı tek değişkenli zaman serisi modelini karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Çalışmada zaman serisi yaklaşımları olarak Otoregresif, Hareketli Ortalama, Otoregresif Hareketli Ortalama, Parametrik Olmayan Otoregresif ve Basit Üstel Düzeltme algoritmaları kullanılmıştır. Analiz sonuçlarına göre Yapay Sinir Ağı modeli, iyileşen vakalarda 1870,07 RMSE ve 1006,91 MAE hata skorları elde ederken, ölüm vakalarında ise bu değerleri sırasıyla 24,00 ve 17,89 seviyesinde tutarak diğer tüm zaman serisi modellerinden çok daha üstün bir tahmin performansı sergilemiştir. Doğrulanmış yeni vaka sayılarının tahmininde ise Hareketli Ortalama modeli 733,92 RMSE ve 629,95 MAE skorlarıyla en başarılı algoritma olarak öne çıkmıştır. Hata oranlarındaki bu performans farklılıklarının istatistiksel anlamlılığı Diebold-Mariano testi ile de doğrulanmış olup; sonuç olarak ölüm ve iyileşme sayılarını tahmin etmede YSA'nın, genel vaka artışını öngörmede ise Hareketli Ortalama modelinin en uygun ve güvenilir araçlar olduğu ispatlanmıştır.

Niksan vd. (2023) pilsiz, çipsiz ve kablosuz olarak sorgulanabilen bir mikrodalga rezonatör dizisinin buz algılama yeteneğini YSA yardımıyla artırmayı amaçlamıştır. Sensörün kurulum yapıldığı yüzeyin rezonans özelliklerine olan etkisini yani çevresel parazitleri en aza indirmek için tasarıma bir bakır taban düzlemi eklenmiştir. Yüzeyde hava, su veya buz bulunması durumunda diziye gelen elektromanyetik dalganın yansıma katsayısı değişmekte ve bu değişimler bir sorgulayıcı anten aracılığıyla izlenmektedir. DeneySEL süreçte toplanan 1329 adet veri; boş yüzey, su ve buz olmak üzere her biri 443 örnekten oluşan üç alt kümeye ayrılmıştır. Geliştirilen YSA modeli 5-katlı çapraz doğrulama ile eğitildikten sonra, daha önce hiç görmediği 75 yeni örnek üzerinde test edilmiştir. YSA modeli, yansıma katsayısı verilerini sınıflandırmada %94,67 oranında başarı sağlarken; zorlu çevre koşullarını simüle etmek amacıyla %5 oranında gürültü eklenen veri kümesinde dahi %93,33 gibi yüksek bir doğruluk skoruna ulaşarak buz ve su ayırımı başarılı bir şekilde gerçekleştirmiştir.

2024 YILINDAKİ ÇALIŞMALAR

Singh vd. (2024) piezoelektrik kompozit malzemelerin efektif elektromekanik özelliklerini tahmin etmek ve geleneksel Sonlu Elemanlar Yönteminin (Finite Element Method - FEM) getirdiği yüksek hesaplama maliyetini ve zaman kaybını azaltmak amacıyla YSA tabanlı bir hesaplama yaklaşımı geliştirmiştir. Çalışmada, farklı hacim oranlarına sahip piezoelektrik fiber ve matris kombinasyonlarının FEM analizlerinden elde edilen 280 örneklili bir veri kümesi kullanılmıştır. Geliştirilen YSA modeli; malzeme özelliklerini temsil eden 20 nöronlu bir giriş katmanı, Levenberg-Marquardt geri yayılım algoritması ve Tanh aktivasyon fonksiyonu içermektedir. Yapılan optimizasyon testleri sonucunda, eğitim, doğrulama ve test veri kümelerinin hepsi için en düşük RMSE değeri 0,2 ve en yüksek R2 değeri, gizli katmanda 12 nöron kullanıldığında elde edilmiştir. Sonuç olarak, kompozit malzemenin özelliklerini yansıtan 11 çıkış nöronuna sahip bu 20x12x11 mimarili optimal YSA modeli, FEM sonuçlarıyla kıyaslandığında %99,999 gibi yüksek bir doğrulukla tahmin işlemini gerçekleştirerek tasarım süreçlerindeki verimliliği ispatlamıştır.

Gao & Yang (2024) korozyona uğramış betonarmelerin olasılıksal yorulma ömrünü tahmin etmek amacıyla DT ve YSA tabanlı yeni bir hibrit yöntem önermiştir. Çalışmada öncelikle minimum numune sayısı yöntemiyle hayatta kalma oranları elde edilmiş, ardından korozyon ve yükleme koşullarından kaynaklı belirsizlikleri sınıflandırmak için DT algoritması kullanılmıştır. Elde edilen sınıflandırma etiketleri yani hayatta kalma oranları sırasıyla %16,67, %33,33, %50, %66,67 ve %83,33 olarak belirlenmiştir. YSA'nın eğitiminde kullanılan verilerin küçük örneklem boyutuna sahip olması nedeniyle, veri kümesi Beta-Varyasyonel Otomatik Kodlayıcı (Beta-VAE) algoritması ile sentetik olarak genişletilmiş ve modele sunulan girdiler normalize edilmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, YSA modeli numunelerin yorulma ömrünü 0,9824 R2 değeri ile yüksek bir doğrulukta tahmin etmeyi başarmış; korozyon koşullarını dikkate alan modelin, yalnızca yükleme koşullarını dikkate alan modele kıyasla çok daha üstün bir tanıma performansı sergilediği kanıtlanmıştır.

Frison vd. (2024) Bölgesel Isıtma Ağları'nın (District Heating Networks - DHN) yönetimi ve optimizasyonu için zaman serisi verilerine dayalı farklı YSA mimarilerinin performanslarını analiz etmeyi amaçlamıştır. Çalışmada, çok adımlı tahmin için tek atışlı ve otoregresif yaklaşımlara sahip Evrimsel Sinir Ağları (Convolutional Neural Networks - CNN) ile Uzun Kısa Süreli Bellek (Long Short-Term Memory - LSTM) ağları kullanılmıştır. Stiftung Liebenau DHN'den elde edilen gerçek dünya verileri üzerinde yapılan analizlerde; konutlar, ofisler ve seraların ısı talepleri ayrı ayrı tahmin edilmiştir. Modeller arasında en iyi performansı gösteren tek atışlı CNN modeli; konut ve ofis

binalarında %4,2, seralarda %6,3 ve tüm ağın genelinde %5,1 Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error - MAE) oranları elde etmiştir. Bu sonuçlarla, referans olarak kullanılan gelişmiş TFT ve istatistiksel SARIMAX modellerini geride bırakmayı başarmıştır. Sonuç olarak, CNN modeli hem yaz hem de kış dönemi için %27, yalnızca kış dönemi için ise %17 ile en düşük Ortalama Mutlak Yüzde Hata (Mean Absolute Percentage Error - MAPE) değerine ulaşmış olsa da verilerdeki yüksek oynaklık ve düzensizliğin tahmin doğruluğunu kısıtlayan en önemli faktörler olduğu vurgulanmıştır.

Luo vd. (2024) su altındaki hareketli hedeflerin şekil ve boyutlarını tahmin etmek amacıyla yapay yanal çizgi sistemine ve YSA'ya dayanan biyonomik bir algılama sistemi geliştirmiştir. Çalışmada, 5 farklı şekil ve 5 farklı boyuttan oluşan toplam 25 algılama modeli incelenmiş ve hedeflerden elde edilen basınç dağılımları ile nesne özellikleri arasında ilişki kurmak için problem, Çok Sınıflı Sınıflandırma olarak ele alınıp Geri Yayılımlı Yapay Sinir Ağı (Backpropagation Neural Network - BPNN) ile çözümlenmiştir. Sensör sayısına eşit olan 8 adet giriş düğümüne sahip ve Z-skoru ile standartlaştırılmış verilerle beslenen bu model; 2 gizli katman içeren toplam 4 katmanlı mimarisiyle maksimum performansa ulaşmıştır. Göreceli olarak sınırlı sayıdaki veriye rağmen model, %95,89 gibi oldukça yüksek bir doğruluk oranına ulaşarak başarılı bir çözüm sunmuştur. Sınıf bazında incelendiğinde en başarılı sonucu, 5 boyutun 4'ünde %100 hassasiyet değerine ulaşan küre formu elde etmiştir. Ayrıca, modelin başarısı RF ve Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machines - SVM) gibi popüler makine öğrenmesi algoritmalarıyla kıyaslanmış ve tüm değerlendirme metriklerinde en yüksek performansın yine BPNN tarafından sergilendiği kanıtlanmıştır.

2025 YILINDAKİ ÇALIŞMALAR

Khan & Siddiqui (2025) elektro-eğirme yöntemiyle üretilen polivinil alkol (PVA) nanofiberlerin çapını tahmin etmek amacıyla YSA tabanlı bir model geliştirmiştir. Çalışmada 27 örnekten oluşan bir veri kümesi kullanılarak; polimer konsantrasyonu, akış hızı, uygulanan yüksek voltaj, dönen toplayıcının hızı (RPM) ve iğne ucu ile toplayıcı arasındaki mesafe olmak üzere 5 farklı üretim parametresi ile elde edilen ortalama lif çapları arasındaki doğrusal olmayan etkileşimler MLP ile modellenmiştir. Geliştirilen YSA mimarisi, 5 giriş nöronu ile sırasıyla 5 ve 4 nöron içeren 2 gizli katmandan; toplam 9 gizli nörondan oluşmaktadır. Veri kümesi rastgele 6 farklı eğitim-test oranına bölünerek incelenmiş ve en yüksek performans, verilerin %76 eğitim ve %24 test olarak ayrıldığı durumda elde edilmiştir. Bu optimum model, test verileri üzerinde 0,8859 korelasyon katsayısı ve 0,164 RMSE değeri vermiştir. Genel

değerlendirmede ise tahmin edilen PVA lif çapları ile deneysel veriler arasında 0,973'lük yüksek bir regresyon ilişkisi ve 0,06 gibi oldukça düşük bir mutlak hata gözlemlenmiştir. Sonuç olarak YSA modeli, %94 ortalama model doğruluğuna ulaşarak, geleneksel regresyon yöntemlerinden çok daha üstün ve tutarlı bir performans sergilemiştir.

Mohanraj vd. (2025) entegre devrelerde üçüncü taraf üreticilerden kaynaklanabilen donanım Truva atlarını tespit etmek amacıyla YSA temelli yeni bir yöntem geliştirmiştir. Çalışmada, SAKURA-G FPGA kartı kullanılarak Truva atı içeren ve içermeyen durumlar için her biri 5000 örnekleme noktasına sahip 1000 adet güç izi verisi elde edilmiştir. Standart ölçeklendirme gibi ön işleme adımlarından geçirilen eğitim, test ve doğrulama verileri; bir giriş, beş gizli ve bir çıkış katmanından oluşan YSA modeline beslenmiştir. Geliştirilen model, ISCAS'89 sıralı kıyaslama devreleri üzerinde test edilmiş ve özellikle s444 devresi için 0,0074 gibi oldukça düşük bir model kaybı ile %100 doğruluk performansı göstermiştir. Genel değerlendirmede ise YSA modeli; %95,76 ortalama doğruluk, %94,24 duyarlılık ve %97,13 hassasiyet değerlerine ulaşarak literatürdeki mevcut güç tabanlı donanım Truva atı tespit yöntemlerini geride bırakmıştır.

Alrasheed vd. (2025) Kuveyt'teki kamu inşaat projelerinde maliyet etkenlerini kullanarak erken aşama maliyet tahmini yapmak amacıyla YSA tabanlı bir model geliştirmiştir. Çalışmada başlangıçta 34 projeden oluşan gerçek dünya verileri kullanılmış; ancak veri normalizasyonu ve aykırı değerlerin temizlenmesi sonucunda eğitim aşamasına 28 proje ile devam edilmiştir. Literatür taramasıyla belirlenen etkenler ışığında; 6 giriş nöronu, sırasıyla 6 ve 8 nöronlu 2 tam bağlı gizli katman ve bütçelenen maliyeti temsil eden tek çıkış nöronundan oluşan bir YSA mimarisi kurulmuştur. Kurulan modelin sektörel uygulaması için, kullanıcıdan 6 farklı girdiyi alarak hem maliyet tahmini yapacak hem de en benzer üç geçmiş projeyi döndürecek bir web arayüzü konsepti sunulmuştur. Toplam 16 farklı konfigürasyonun test edildiği optimizasyon sürecinde, en yüksek performans 14. denemede elde edilmiştir. Bu optimum model, MAPE metriğinde yalnızca %0,72'lik bir sapma göstererek %99,28'lik son derece yüksek bir doğruluk oranına ulaşmıştır. Ayrıca yazarlar, elde ettikleri bu modelin başarısını ve pratik fizibilitesini 5 farklı yeni proje üzerinde test ederek doğrulamışlardır.

Assani & Matic (2025) akış kontrol süreçlerinde PID kontrolör ayarlaması için YSA ve Transfer Fonksiyonu (TF) modellerinin performanslarını hem simülasyon hem de gerçek sistem üzerinde karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Çalışmada 4 farklı ayarlama yöntemi (ZN-SR, CC, C-H-R, ZN-CL) kullanılarak 8 farklı kontrolörün performansı kapalı döngüde değerlendirilmiştir. Veri kümesi

%70 eğitim, %15 doğrulama ve %15 test olarak ayrılmış ve 6-katlı çapraz doğrulama ile toplam 2520 YSA modeli eğitilmiştir. Geliştirilen YSA modeli, test verilerinde %97,85 ve %97,53 Uyum İyiliği skorlarına ulaşarak, %91,20 doğrulama skorunda kalan TF modelini geride bırakmıştır. Gerçek sistem üzerinde yapılan kontrolör ayarlama testlerinde ise YSA tabanlı model, TF modeline kıyasla RMSE bazında PID kontrolörler için ZN-CL yönteminde %29,65, PI kontrolörler için ise ZN-SR yönteminde %40,30'a varan oranlarda performans iyileşmesi sağlamıştır. Sonuç olarak, YSA tabanlı ayarlamaların TF modelinden çok daha doğru sonuçlar ürettiği ve özellikle PID kontrolörlerde ZN-CL yöntemiyle doğrudan gerçek sistem üzerinde yapılan ayarlamalara oldukça yakın, üstün bir performans sergilediği kanıtlanmıştır.

2026 YILINDAKİ ÇALIŞMALAR

Zhang vd. (2026) 3D baskı teknolojiyle üretilen ve güve gözünden ilham alan bir metayapının tasarımı sürecinde; minimum yansıma kaybı (minimum reflection loss - RLmin) ve efektif soğurma bant genişliği (effective absorption band-width - EAB) gibi parametrelerin tahmin edilebilmesi amacıyla YSA tabanlı bir mimari geliştirmiştir. Kurulan Tam Bağlı Sinir Ağı (fully connected neural network - FCNN) modeli; RF, Gradyan Arttırma Makinesi (Gradient boosting machine - GBM) ve Gauss Süreç Regresyonu (Gaussian process Regression - GPR) gibi geleneksel makine öğrenmesi algoritmalarıyla karşılaştırılmış ve en yüksek tahmin başarısını sergilemiştir. Toplam 1080 örnekten oluşan bir veri kümesiyle eğitilen FCNN mimarisi; 4 nöronlu bir giriş katmanı, sırasıyla 24 ve 12 nöronlu iki gizli katman ve RLmin ile EAB değerlerini tahmin eden 2 nöronlu bir çıkış katmanından oluşmaktadır. Yapılan testler sonucunda FCNN modeli, EAB ve RLmin tahminlerinde sırasıyla 0,9445 ve 0,9158 R2 değeri elde ederken; RMSE değerlerini ise sırasıyla 0,3707 ve 2,2508 seviyelerinde tutarak başarılı bir optimizasyon süreci ortaya koymuştur.

Ružiak vd. (2026) kayın kontrplak ve yüksek yoğunluklu lif levha (high-density fibreboard - HDF) malzemelerin CO2 lazer kesim işlemlerini optimize etmek ve kesim aralığı geometrisini tahmin etmek amacıyla YSA modelleri geliştirmiştir. Çalışmada, lazer gücü ve besleme hızı 2 giriş nöronu olarak kullanılmış; üst kesim genişliği (WKU), alt kesim genişliği (WKL) ve kesim genişliği oranı (WKR) ise 3 çıkış nöronu olarak tahmin edilmiştir. Geliştirilen MLP modellerinden kayın kontrplak için 2-7-3 mimarisi, HDF için ise 2-6-3 mimarisi en iyi sonuçları vermiştir. Modeller, 0,971'in üzerinde korelasyon katsayısı ve maksimum %6,21 MAPE ile yüksek tahmin yeteneği sergilemiştir. Çalışma sonucunda elde edilen sayısal optimizasyon verilerine göre; kayın kontrplak için en simetrik ve kusursuz kesim parametreleri 200-300 W güç, 10-15 mm/s hız ve 133 MJ/m2 enerji yoğunluğu

olarak belirlenmiştir. Daha yoğun ve homojen bir malzeme olan HDF için ise bu optimal değerler 300-500 W güç, 5-10 mm/s hız ve 433 MJ/m² enerji yoğunluğu olarak tespit edilmiştir. Sonuç olarak YSA'nın, malzemenin yoğunluğuna göre değişen ideal kesim parametrelerini başarıyla tahmin ederek enerji ve malzeme israfını azaltmada etkili bir araç olduğu kanıtlanmıştır.

Şahin vd. (2026) ağız esnasında inek memelerinden alınan termal görüntüleri ve YSA modellerini kullanarak mastitis hastalığını tespit etmeyi amaçlamıştır. Çalışmada, laktasyon dönemindeki 500 inekten alınan yüksek kaliteli termal görüntüler üzerinden enfeksiyonun neden olduğu bölgesel sıcaklık artışları incelenmiştir. Dört farklı sınıf için oluşturulan veri kümesindeki sınıflar arası dağılım dengesizliği, gerçek saha koşullarını yansıtmaması amacıyla veri artırma yöntemleriyle yapay olarak giderilmemiş; bunun yerine modelin performansı sınıfa özgü metrikler ve karmaşıklık matrisi analizi ile değerlendirilmiştir. Veri kümesi %70 eğitim, %15 doğrulama ve %15 test olarak üçe ayrılmış; farklı gizli katman ve nöron topolojileri test edildikten sonra en yüksek R2 değerine 54-27-10 nöron dizilimiyle ulaşılmıştır. Optimizasyonlar sonucunda YSA modeli eğitim, doğrulama ve test verilerinde sırasıyla $0,8862 \pm 0,072$, $0,9515 \pm 0,029$ ve $0,9481 \pm 0,057$ korelasyon değerleri elde etmiş; en iyi performans gösteren spesifik modelin test skoru ise 0,97915 olarak kaydedilmiştir. Sonuç olarak, Kaliforniya Mastitis Testi tabanlı sınıflandırma modeli %96,4 genel doğruluk oranına ulaşmış; hassasiyet, duyarlılık ve F1-skor metriklerinin tamamında 0,94'ün üzerinde değerler üreterek yüksek bir başarı sergilemiştir.

Ren vd. (2026) kaya kütlesi nokta bulutlarından süreksizlik izlerini otomatik ve hızlı bir şekilde çıkarmak amacıyla Çok Ölçekli Yüzey Varyasyon İndeksi (multi-scale surface variation index - MsSVI) ve Transfer Öğrenme ile güçlendirilmiş bir YSA modeli önermiştir. Çalışmada; düzenli geometrik gövde nokta bulutu ile Durum A ve Durum B olarak adlandırılan iki farklı kaya nokta bulutu olmak üzere toplam 3 veri kümesi kullanılmıştır. Modelin eğitim aşamasında manuel olarak etiketlenmiş 7000 düzlem noktası ve 3148 keskin kenar noktası kullanılırken, test aşaması için 3300 düzlem ve 2668 keskin kenar noktası ayrılmıştır. Geliştirilen 4 katmanlı YSA modeli; 21 düğümlü bir giriş katmanı, sırasıyla 10 ve 8 düğümlü iki gizli katman ve 2 düğümlü bir çıkış katmanından oluşmaktadır. Yöntem kapsamında öncelikle orijinal nokta bulutundan MsSVI hesaplanmış, ardından YSA modeli ile iz özellik noktalarının kaba çıkarımı yapılmış ve son olarak L1-medyan iskelet algoritması kullanılarak ince çıkarma, iz bağlantısı ve birleştirme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, geliştirilen model test veri kümesinde %86,38 doğruluk oranına ve %90,26 F1-skoruyla ulaşarak, manuel eşik değeri belirleme zorunluluğunu ortadan kaldıran başarılı ve dayanıklı bir sınıflandırma performansı sergilemiştir.

Kaynakça

- Alrasheed, K., Ballat, M. Al, Soliman, E., & Albader, H. (2025). Artificial neural network-based cost estimation for public construction projects in Kuwait. *Journal of Engineering Research (Kuwait)*. <https://doi.org/10.1016/J.JER.2025.09.001>
- Alshanbari, H. M., Iftikhar, H., Khan, F., Rind, M., Ahmad, Z., & El-Bagoury, A. A. A. H. (2023). On the implementation of the artificial neural network approach for forecasting different healthcare events. *Diagnostics*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/DIAGNOSTICS13071310>
- Assani, N., & Matic, P. (2025). Evaluating the ANN model performance for PID controller tuning in flow process control: A comparative study. *IEEE Access*, 13, 88499-88508. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3571222>
- Frison, L., Götzhäuser, S., Bitterling, M., & Kramer, W. (2024). Evaluating different artificial neural network forecasting approaches for optimizing district heating network operation. *Energy*, 307. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2024.132745>
- Gao, J., & Yang, H. (2024). An artificial neural network method for probabilistic life prediction of corroded reinforced concrete. *International Journal of Fatigue*, 186. <https://doi.org/10.1016/J.IJFATIGUE.2024.108418>
- Khan, K. U. H., & Siddiqui, I. A. (2025). A predictive model for electrospun based Polyvinyl alcohol (PVA) nanofibers diameter using an artificial neural network. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/S41598-025-92877-X>
- Kurnaz, T. F., Erden, C., Kökçam, A. H., Dağdeviren, U., & Demir, A. S. (2023). A hyper parameterized artificial neural network approach for prediction of the factor of safety against liquefaction. *Engineering Geology*, 319. <https://doi.org/10.1016/J.ENGGEOL.2023.107109>
- Luo, R., Li, C., & Wang, F. (2024). Underwater motion target recognition using artificial lateral line system and artificial neural network method. *Ocean Engineering*, 303. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2024.117757>
- Mahdavi-Meymand, A., & Sulisz, W. (2023). Application of nested artificial neural network for the prediction of significant wave height. *Renewable Energy*, 209, 157-168. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2023.03.118>
- McCulloch, W. S., & Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *The Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5(4), 115-133. <https://doi.org/10.1007/BF02478259/METRCS>
- Mohanraj, P., Paramasivam, S., & Sathyamoorthy, P. (2025). A power traces based hardware trojan detection using deep artificial neural network.

- Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 123(1).
<https://doi.org/10.1007/S10470-025-02351-X>
- Niksan, O., Colegrave, K., & Zarifi, M. H. (2023). Battery-free, artificial neural network-assisted microwave resonator array for ice detection. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 71(2), 698-709.
<https://doi.org/10.1109/TMTT.2022.3222194>
- Ren, M., Li, H., Hu, J., & He, M. (2026). A framework for automatic discontinuity trace extraction using multi-scale surface variation index and transfer-learning enhanced artificial neural network. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*.
<https://doi.org/10.1016/J.JRMGE.2025.05.010>
- Ružiak, I., der, O., Kubovský, I., Adijans, I., Kučerka, M., Richvalská, J., Gajtanska, M., Tudor, E. M., Todaro, L., & Štefančin, L. (2026). Artificial neural network-based optimization of CO₂ laser cutting parameters for beech plywood and HDF: A kerf geometry perspective. *Drvna Industrija*, 77(1), 71-80. <https://doi.org/10.5552/DRVIND.2026.0284>
- Sarkar, A., Guchhait, R., & Sarkar, B. (2022). Application of the artificial neural network with multithreading within an inventory model under uncertainty and inflation. *International Journal of Fuzzy Systems*, 24(5), 2318-2332.
<https://doi.org/10.1007/S40815-022-01276-1>
- Singh, K., Adhikari, J., & Roscow, J. (2024). Prediction of the electromechanical properties of a piezoelectric composite material through the artificial neural network. *Materials Today Communications*, 38.
<https://doi.org/10.1016/J.MTCOMM.2024.108288>
- Şahin, H. A., Mikó, E., Önder, H., & Baccouri, W. (2026). Thermal image-based artificial neural network approach to determine mastitis detection in holstein dairy cattle. *Animals*, 16(7), 1048.
<https://doi.org/10.3390/ANI16071048>
- Wang, D., Shen, Z. J., Yin, X., Tang, S., Liu, X., Zhang, C., Wang, J., Rodriguez, J., & Norambuena, M. (2022). Model predictive control using artificial neural network for power converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 69(4), 3689-3699. <https://doi.org/10.1109/TIE.2021.3076721>
- Xu, G., Yu, Z., Xia, L., Wang, C., & Ji, S. (2022). Performance improvement of solid oxide fuel cells by combining three-dimensional CFD modeling, artificial neural network and genetic algorithm. *Energy Conversion and Management*, 268. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2022.116026>
- Yu, Z., & Tang, D. (2022). Artificial neural network-assisted wearable flexible sweat patch for drug management in parkinson's patients based on

vacancy-engineered processing of g-C₃N₄. *Analytical Chemistry*, 94(51), 18000-18008. <https://doi.org/10.1021/ACS.ANALCHEM.2C04291>

Zhang, X., Hao, X., Wei, G., Zhang, H., Chen, W., Shan, F., Liu, K., Tan, S., & Ji, G. (2026). Artificial neural network-assisted design of 3D printed moth-eye inspired metastructure for broadband microwave absorption and infrared stealth. *Composites Part B: Engineering*, 313. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2026.113391>