

MÜHENDİSLİK

Alanında Uluslararası Çalışmalar

EDİTÖR

PROF. DR. SELAHATTİN BARDAK

Horizon 2025

Genel Yayın Yönetmeni / Editor in Chief • Eda Altunel

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

Birinci Basım / First Edition • © Haziran 2025

ISBN • 978-625-5897-39-8

© copyright

Bu kitabın yayın hakkı Serüven Yayınevi'ne aittir.

Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz. The right to publish this book belongs to Serüven Publishing. Citation can not be shown without the source, reproduced in any way without permission.

Serüven Yayınevi / Serüven Publishing

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

Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA

Telefon / Phone: 05437675765

web: www.seruvenyayinevi.com

e-mail: seruvenyayinevi@gmail.com

Baskı & Cilt / Printing & Volume

Sertifika / Certificate No: 42488

MÜHENDİSLİK

ALANINDA ULUSLARARASI ÇALIŞMALAR

EDİTÖR

PROF. DR. SELAHATTİN BARDAK

İÇİNDEKİLER

Bölüm 1

İŞLETMELERDE DİJİTAL DÖNÜŞÜM

Öznur ÖZDİNÇ—1

Bölüm 2

ÇBAG TABANLI RÜZGÂR ÇİFTLİĞİNDE SSR ETKİSİNİ AZALTMAK İÇİN GSC VE RSC DEVRESİNDE ESK MODELLERİN GELİŞTİRİLMESİ

Mehmet Kenan DÖŞOĞLU, Mustafa DURSUN—15

Bölüm 3

MÜHENDİSLİKTE BİYOMİMETİK: DOĞADAN İLHAM ALAN YAPISAL MALZEMELERİN TASARIMI VE ÜRETİMİ

Tevfik Oğuzhan ERGÜDER, Caner BULUT—31

Bölüm 4

ORTOPEDİK İMPLANTLAR İÇİN MALZEME PERFORMANSININ SİSTEMATİK DEĞERLENDİRMESİ

Cihan YAYLACI—43

Bölüm 5

TAŞ MASTİK ASFALT KAPLAMALARDA FİBER KULLANIMI

Hande VAROL MOROVA —57

Bölüm 6

MANUEL MONTAJ HATLARININ İŞ BİRLİKÇİ SİSTEMLERE DÖNÜŞTÜRÜLMESİNDE MALİYET OPTİMİZASYONU İÇİN BİR MATEMATİKSEL MODEL ÖNERİSİ

Aslıhan KARAŞ ÇELİK, Feriştah ÖZÇELİK —73

Bölüm 7

GELENEKSEL MALİYET TAHMİN YÖNTEMLERİNDEN YAPAY ZEKÂ TABANLI MODELLERE GEÇİŞ

İlknur AKCABA, Nursena BAYGIN,

Işıl KARABEY AKSAKALLI —99

Bölüm 8

ÇOK UZUN ZİNCİRLİ DOYMAMIŞ YAĞ ASİTLERİ VE SAĞLIK ETKİLERİ

Seval ANDİÇ, Ayhan BAŞTÜRK—119

Bölüm 9

VİNÇ HALATLARI İÇİN MALZEME PERFORMANSININ FEM TABANLI ANALİZİ

Cihan YAYLACI —141

Bölüm 10

GIDA TEDARİK ZİNCİRİNDE YAPAY ZEKA DESTEKLİ UYGULAMALAR VE AKILLI SİSTEMLERLE ENTEGRASYONU

Ayşe Gülin ESER —153

Bölüm 11

AKILLI TRAFİK YÖNETİM SİSTEMLERİ VE ÜLKEMİZDE AKILLI TRAFİK SİSTEM UYGULAMALARININ DURUMU

M. Akif KUNT, Haluk GÜNEŞ —177

Bölüm 12

BULANIK MOORA YÖNTEMİ: ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME SÜREÇLERİNDE BULANIKLIKLA BAŞA ÇIKMAK

Müslüm ÖZTÜRK—189

Bölüm 13

TÜMÜYLE ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN ELEKTRİK MOTORLARI

Haluk GÜNEŞ , M. Akif KUNT, —219

Bölüm 1

İŞLETMELERDE DİJİTAL DÖNÜŞÜM

Öznur ÖZDİNÇ¹

¹ Öğr. Gör., Gaziantep Üniversitesi Naci Topçuoğlu Meslek Yüksekokulu Halıcılık Ve Kilimcilik Programı 0000-0002-6562-408X

GİRİŞ

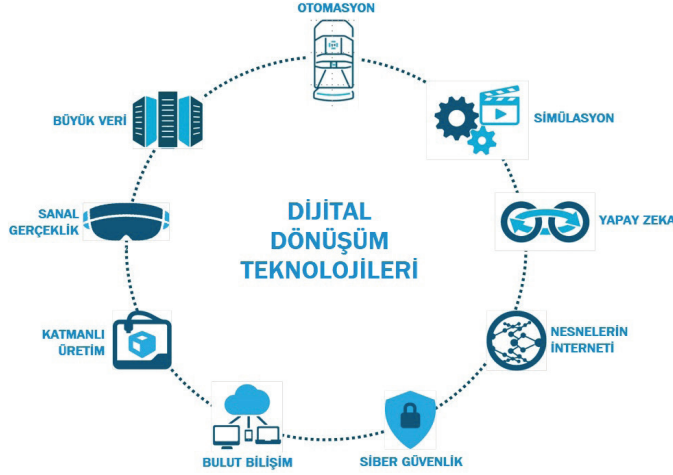
İnsanlık tarihinde toplumların ekonomik, sosyal ve kültürel gelişimleriyle beraber çalışma yaşamı da sürekli değişim içerisinde. Çalışma yaşamı sanayi devrimi ile birlikte köklü bir değişime uğramıştır.

Endüstri 4.0 olarak adlandırılan IV. Sanayi Devrimi bir dijital dönüşüm sürecidir. Dünyada meydana gelen hızlı değişimler, teknolojik gelişmeler, ekonomik krizler, savaşlar, pandemi ve bunlara bağlı olarak ulusal ve uluslararası rekabet kriterlerinin değişmesi üretim işletmelerinin işini zorlaştırmakta, işletmeleri sürekli öğrenme ve çözüm arayışı içerisinde olmaya zorlamaktadır. Üretim işletmeleri için bu çözüm araçlarından birisi de teknolojidir. Bu bağlamda teknoloji uyum sağlamak açısından hem sorunun kendisi, hem de verimlilik, inovasyon sürdürülebilirlik ve kalite gibi açılarından çözümün de kendisidir. Son yıllarda gelişen bilgi teknolojilerinin entegrasyonu üretim sektöründe önemli değişimlere neden olmuştur (Xie vd., 2024). Dijital sanayi devrimi olarak da nitelenen Endüstri 4.0; bilişim teknolojisi ile endüstrinin bir bütünü olarak tanımlanabilmektedir. Söz konusu bu süreçte siber fiziksel sistemler ile haberleşme sağlayan, operatöre ihtiyaç duyulmadan veri alışverişi yapabilen, sensörler ile algılayan, veri analizi yapabilen, yapay zekâ ile karar verebilen, 3d yazıcılar ile imalata yeni bir ufuk kazandıran bir sistem söz konusudur (Koda ve Çelebi, 2021). COVID-19 salgını, dünya çapında iş prosedürleri ve organizasyon kültürü üzerinde derin bir etkiye sahip olan dijital dönüşümü hızlandırmıştır. Bu dönüşüm geleneksel sınırları aşmış ve kuruluşların rekabet gücüne zorluğa sürüklemiştir (Melo vd., 2023). Bununla birlikte, işletmeler şu anda rekabet gücünü sürdürmek için önceden var olan iş prosedürlerini dijitalleştirerek dijital dönüşümü üstlenmenin aynı anda hem zorluğu hem de olasılığıyla karşı karşıya kalmıştır (Azevedo ve Almeida, 2021).

Dijitalleşme Endüstri 4.0'dan farklı bir kavram olarak üretimin ötesine geçmiş, müşteri deneyimi, iş modelleri, organizasyon kültürü gibi alanları kapsayarak farklılaşmıştır (Demirel ve Yaralı, 2023). Dijitalizasyonu ifade eden Endüstri 4.0'ın önceliği üretim süreçlerinin dönüşümüne odaklanmaktır. Dijital Dönüşüm ise pazarlama, satış, müşteri hizmetleri ve tüm proseslerin her yönüne uyum sağlarken daha geniş bir yelpazeyi de ele almaktadır (Üstündağ ve Çevikcan, 2017).

İşletmelerde dijital dönüşüm hakkında literatürde farklı tanımlar bulunmaktadır. Schwertner (2017) dijital dönüşüm kavramını; teknoloji kullanarak rekabet avantajı sağlamak ve yüksek üretkenlik elde etmek için, yeni iş modelleri, yeni prosesler ve yeni sistemler oluşturmak olarak belirtmiştir. Deloitte (2018) ise dijital dönüşümü, bir işletmenin perfor-

mansını ve etkileşimini önemli ölçüde artırmak için bilişim teknolojilerini kullanması olarak tanımlamıştır. Morakanyane vd., (2017) ise dijital dönüşümü, dijital teknolojilerin ve yeteneklerin gücüyle yeni iş modelleri, iş süreçleri ve müşteri deneyiminin değer yaratmasını sağlayan evrimsel bir süreç olduğunu belirtmiştir. Şekil 1’de dijital dönüşüm için gerekli teknolojiler gösterilmektedir.



Şekil 1. Dijital dönüşüm teknolojileri (<https://www.myk.gov.tr>)

Dijital dönüşüm, dijital teknolojileri iş operasyonlarına ve kurum kültürüne entegre ederek, kuruluşların işleyişini en temelden ve yeniden şekillendiren çok yönlü bir süreçtir. Bu dönüşüm sadece teknolojik olmayıp; yönetim, kültür ve müşteri katılımı ile sağlanan stratejik değişimleri gerektirir (Hadiansyah et al., 2024). Dijital dönüşüm, veri odaklı karar verme, yapay zekâ, bulut teknolojileri, nesnelerin interneti (IoT), makine öğrenimi gibi unsurları kapsayarak kurumların daha verimli, hızlı ve müşteri odaklı bir şekilde faaliyet göstermelerini sağlar (Kacı, Çelik ve Tekinkaya Kacı, 2025). Şekil 2’de dijital dönüşümün hedefleri yer almaktadır;



Şekil 2. Dijital dönüşümün hedefleri (www.myk.gov.tr)

Bu çalışmanın temel amacı, sistematik literatür inceleme yaklaşımını kullanarak küreselleşme ve bilişim teknolojisindeki değişimler neticesinde meydana gelen dijital dönüşüm kavramlarının, bileşenlerinin işletmeler açısından incelenmesidir. Bu kapsamda yapılan çalışma dijital dönüşüm için gerekli teknolojik yenilikleri, dijitalizasyonun sektöre getirdiği avantajları açıklayıp ve mevcut durumda dijital dönüşüm için SWOT analizi yapılarak sunulmuştur.

İŞLETMELERDE DİJİTAL DÖNÜŞÜM

Sanayi sektöründe her geçen gün dijitalleşmenin önemi biraz daha arttığı görülmektedir. Günümüz rekabet ortamında Türkiye'nin dünya ihracatından daha fazla pay alması ve daha güçlü rekabet edebilmesi için araştırma ve geliştirme faaliyetleri için yapılan yatırımların ve dijital dönüşüm teknolojilerinin üretimde kullanımının artmasını planlamaktadır (2023 Dijital Türkiye Yol Haritası, 2023). Üretim endüstrisinde faaliyet gösteren işletmeler, dijital dönüşüm süreçlerine hızla adapte olmak zorundadırlar. Söz konusu olan dijital dönüşüm ile birlikte konvansiyonel üretim yöntemleri modern teknolojiyle birleşerek işletmelerin daha verimli, esnek ve rekabetçi olmaları sağlanacaktır (Westerman vd., 2014).

İşletmelerde dijital dönüşüm unsurları Şekil 1'de belirtilmektedir. Dijital dönüşüm unsurları, bir işletmenin dijital dönüşümünün başarılı bir şekilde gerçekleşmesine ve işletmenin rekabet ortamında ayakta kalmasına imkân tanır.

Kurum ve işletmelerde dijital teknolojilerin gelişimi dört evreyi kapsamaktadır. Bu evreler (Klein, 2020):

- kişisel bilgisayar dönemi,
- internet dönemi,
- mobil sosyal medya dönemi
- nesnelerin interneti evresi şeklindedir.

Kişisel bilgisayar evresinde analog kayıtlar dijital ortamda işlenir hale getirilerek tüm süreçlerin dijital ortamda yürütülmesine başlanmıştır (Yankın, 2019). Bu evre ile birbirine benzeyen iş proseslerinin birleşimi sağlanarak verimlilik artışı sağlanmıştır (Klein, 2020). Dijital dönüşüm sürecinin ikinci evresi; internet dönemidir. Dijital dönüşüm sürecindeki en önemli gelişme; veri merkezlerinin kurularak ağ tabanlı teknolojilerin kullanılmaya başlamasıdır. İlk zamanları yalnızca bilgisayarlar ile kullanılırken günümüzde internet ile birlikte dijitalleştirme hızı da artmıştır (Yankın, 2019). Bu sürecin üçüncü evresi; mobil sosyal medya evresidir. Bu evre tamamen müşteri isteğine uygun ürün geliştirmeye yöneliktir, böylelikle sosyal ticaret iş modellerinin gelişmesine sebep olmuştur. Ayrıca mobil cihazlar ile birlikte işletmeler müşterilerine daha hızlı yanıt verebilmiştir (Klein, 2020).

Nesnelerin interneti (IoT) evresi, ağ ve sensör teknolojilerini birarada kullanılması ile “siber fiziksel sistemler” konsepti ortaya çıkmıştır. Bu evre sayesinde akıllı fabrika kavramı ortaya çıkmış ve dolayısıyla insansız veya en az insan ile üretimin gerçekleştirilmesi ilkesine imkan tanımıştır (Vermesan vd., 2017). Bu teknoloji için verilebilecek en güzel örnek; cep telefonları aracılığı ile elde edilecek kişisel bilgiler ve akıllı kavşak sistemleri üzerinden toplanan trafik ve araç yoğunluğu verileri sayılabilir (Khalil & Özdemir, 2018). Nesnelerin interneti (IoT) teknolojisi, tarımdan endüstriye ve enerji üretiminden dağıtımına kadar tüm alanlarda dijital dönüşüme imkân sağlamaktadır (Başar, 2023).

İŞLETMELERDE DİJİTAL DÖNÜŞÜMÜN FAYDALARI

Dijital dönüşüm, işletmelerin geleneksel modellerini yenilikçi iş modellerine dönüştürme ve yeniden düşünme sürecidir (Wang, 2022). Liderlik özelliklerinde, organizasyon yapılarında, süreçlerde, üretimde (Trenerry vd., 2021) ve yetenekli çalışanlarda çeşitli değişiklikler talep eden dijital araçların ve teknolojilerin entegre edilmesini gerektirir. Bu nedenle dijital dönüşüm, teknoloji ve insanların bir karışımını gerektirmektedir (Abbu vd., 2022). Ayrıca dijital dönüşüm, kuruluşları gelişmiş teknolojilerin kullanımına doğru kaydırmıştır (AlNuaimi vd., 2022). İşletmelerde dijital dönüşümün faydaları;

- İşletmelerin dijital dönüşüm süreçlerinde en önemli adımlardan birisi; tedarik zinciri yönetiminde yapılacak olan dijitalizasyondur. Üretim yapan işletmeler, tedarikçi ile ilişkisini daha iyi yönetmek ve malzeme akışını en uygun hale getirmek için dijital araçlar kullanabilirler. böylelikle stok maliyetleri düşer ve teslimat süreçleri iyileşir (Monczka vd., 2020).

- Dijital dönüşüm işletmelerdeki ürün geliştirme proseslerini de olumlu yönde etkilemektedir. Üretim yapan bu işletmeler, tasarım, prototip üretimi ve test süreçlerini dijitalleştirmek sureti ile ürünlerini daha hızlı bir şekilde pazara sunabilirler. Bu durumda üç boyutlu printerlar, sanal prototipleme yazılımları ve simülasyon araçları gibi teknolojiler kullanılarak ürün geliştirme süreçlerine olumlu katkı sağlayabilirler (Zhang vd., 2014).

- Dijital dönüşüm sayesinde işletmeler müşteri ilişkilerini de güçlendirebilir. Söz konusu işletmeler müşterilerle etkileşimi daha hızlı ve aktif kullanacağı için müşteri geri dönütlerini daha ivedi bir biçimde değerlendirecek müşterilere özel ürünler sunabilirler. Bu da müşteri memnuniyetini artırarak müşteride güven duygusunu artırır (Porter & Heppelman, 2014).

- Dijital dönüşüm ile birlikte üretimde randıman artışı, maliyetlerde azalış, büyüme, istihdam, insan kaynakları, eğitim, yatırım gibi uzun vadeli olumlu neticeler de meydana gelecektir (Şahin ve Yılmaz, 2021).

LİTERATÜR TARAMASI

Yılmaz, (2025) çalışmasında dijital dönüşüme ayak uyduramayan işletmelerin yok olma tehlikesiyle karşı karşıya olduğunu belirterek, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ve küresel rekabet gücüne ulaşmak için dijital teknolojilere yatırım yapmak gerektiğine değinmiştir.

Kaçır ve diğerleri (2025) yaptıkları çalışmada dijital dönüşümde başarıya ulaşmak için işletmelerin ilk stratejik adımının, dijitalleşmeye dair net bir vizyon ve strateji oluşturmak olduğunu belirtmiştir. İkinci adımın, teknoloji ve veriyi etkin bir şekilde kullanabilmek için altyapı ve yetkinliklerin geliştirilmesi, üçüncü adımda ise müşterilerin ihtiyaçları ve beklentilerini dikkate alarak dijital platformlar geliştirilmesi olduğuna değinmiştir. Bu kapsamda yapılan çalışmada dijital dönüşüm sürecinin izlenmesi ve sürekli olarak iyileştirilmesi gerektiğini belirtmiştir.

Xie ve diğerleri (2024) çalışmalarında imalat sanayisinde dijital teknolojinin uygulanması ile birlikte endüstriyel değişimin de olumlu etkilediğini saptamıştır.

Çalış Duman (2024) araştırmasında bir tekstil işletmesinin dijital dönüşümünde ürün ve üretim proseslerinde oluşan kalite değişiklikleri ve bunun sonucunda oluşan veriler incelenmiştir. Yapılan çalışmada elde edilen verilere göre, tekstil işletmesinde kalitede önemli iyileşmeler olduğu, hata oranları, fire ve zaman kaybı gibi faktörlerde azalmalar gerçekleştiği ve ekolojik ürünlerin üretildiği görülmüştür.

Sui ve diğerlerine (2024) göre imalat sanayisinde dijitalleşme ile talep tahmini, üretim planlama ve önleyici bakım konularında daha isabetli karar alabilir ve pazarda meydana gelecek değişikliklere daha kolay uyum sağlayarak rekabet gücünü arttırabilir olduğu belirtilmiştir.

Aksoy (2024) çalışmasında günümüzde dijital teknolojilerin modern iş ortamının önemli bir parçası haline geldiğini belirtmiştir. Ayrıca dijital dönüşüm konusunda işletmelerin, veri güvenliği ve veri gizliliği gibi endişeleri, zorlukları ve riskleri konusunda da hazırlıklı olmaları gerektiğini saptamıştır.

Che ve diğerleri (2023) çalışmasında dijital dönüşüm işletmeler için kalite iyileştirmesi açısından önemli bir itici güç olduğunu ve bunun yanı sıra ürün kalitesi ve rekabet avantajını korumaya çalışan işletmeler için ise elzem bir konu olduğunu vurgulamıştır.

Demirel ve Yaralı (2023) çalışmasında 7 üretim işletmesiyle görüşmeler yapmıştır. Çalışmanın sonucunda ise işletmelerin maliyetlerini düşürmek, rekabet avantajı kazanmak, çevrenin değişkenliğine uyum sağlayabilmek amacı ile dijital dönüşüm sürecine girmeleri gerektiğini ve böylelikle bu işletmelerin verimliliklerini arttırdıklarını, kaynak kullanımını etkin hale getirdiklerini saptamıştır.

Ammar ve diğerlerine (2022) göre otomasyona bağlı üretim ve yüksek teknoloji kullanımı işletmelerin iş yapış modellerini ve çalışma metodlarını etkileyeceğini savunmaktadır. Ayrıca üretim süreçlerine nesnelerin interneti, yapay zekâ, büyük veri, siber-fiziksel sistemler ve bulut bilişim, interaktif dijital standart işletim prosedürleri, interaktif eğitim platformları, elektronik kayıt defteri, yapay zeka tabanlı kalite kontrol, derin öğrenme, robotik, giyilebilir teknolojiler ve katmanlı üretim teknolojileri gibi teknolojilerin entegre edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

Gomez-Trujillo ve Gonzalez-Perez (2021), dijital dönüşümün sürdürülebilirlik için hem bir katalizör hem de bir öncü görevi olduğunu ileri sürmektedir. Buna bağlı olarak imalat işletmelerinin ekonomik, çevresel ve sosyal yönlerini etkili bir şekilde ele alarak gerekli dijital yeterliliklerini geliştirmeleri zorunlu olduğunu belirtmişlerdir.

Powell ve diğerleri (2021) yaptıkları çalışmada dijital teknolojilerin üretim süreçlerinde kullanılmasının hem ürün hem de süreç kalitesini arttırmak adına önemli olduğunu vurgulamışlardır.

Santolamazza ve diğerleri (2020) çalışmalarında dijital gölge, ikiz ve bulut tabanlı çalışmanın önemini belirterek, üretimde kalite kontrolün iyileştirilmesi ve sıfır hata için önemli olduğunu savunmuşlardır.

Berman ve Marshall (2019) dijital teknolojilerin, işletmelerin proseslerini kolaylaştırdığına, rutin görevlerin otomatikleşmesine ve gerçekleştirecek hataların azaltılmasına yardımcı olacağını savunmuşlardır. Ayrıca dijitalleşme ile maliyet tasarrufu ve üretkenliğin sağlanabileceğini belirtmişlerdir.

Marr (2019) yaptığı çalışmada dijital teknolojilerin işletmelerin yeni ürün ve hizmetler geliştirmesine, yeni pazarlar bulmasına ve yeni iş modellerini keşfetmesine olanak sunduğunu belirtmiştir.

Parviainen ve diğerlerine (2017) göre bilgi yoğun süreçler dijitalleştirilir ise maliyetlerin %90'a kadar düşürülebileceğini ve geri dönüş süreçlerinin birkaç kat iyileştirilebileceğini vurgulamışlardır. Dijitalleşmenin getirileri olan gerçek zamanlı raporlar ve gösterge panelleri kullanılarak yöneticilerin sorunları kritik hale gelmeden önce ele almaları ve buna bağlı olarak riskleri azaltabilecekleri belirtilmektedir.

Rogers (2016) çalışmada dijital teknolojiler ile imalat yapan işletmelerin iş süreçleri ve operasyonları optimize edilebildiğine ve böylelikle işletmelerde daha verimli çalışma yapılacağını, maliyetin azaltılacağını ve karlılık artışı olacağını savunmuştur.

HALI ENDÜSTRİSİNDE DİJİTAL DÖNÜŞÜM

İşletmelerin dijital dönüşüme başvurmasının nedenleri; iş vizyonunu ileriye taşımak, rekabetçi kalmak, piyasa koşullarını ve verimliliği artırmaktır. Dijital dönüşüm ile birlikte işletmeler rekabet güçlerini artırabilir ve birçok alanda yeni kazanımlar elde edebilirler. Dijital dönüşüm, işletme maliyetlerini düşürmeyi, ürün kalitesini iyileştirmeyi ve stratejik avantajlar elde etmeyi sağlamaktadır. Ayrıca dijital dönüşüm, işletmelerde üretkenliği ve verimliliği artırmak için büyük bir potansiyel sunar (Yılmaz, 2025). Günümüzde dijital teknolojilerin hızlı gelişimi ile birlikte, makine halısı üretimi yapan firmalarda da dijital dönüşüm yer almaya başlamıştır.

Dijital dönüşüm ile makine halısı endüstrisinde gerçekleşen yenilikler ve inovasyonlar şu şekilde sıralanabilir (www.maksimtrade.com);

1. Dijital tasarım ve üretim teknolojileri kullanılarak yapılan halı tasarımı hem daha hızlı hem de hatasız hale gelmektedir. Ayrıca daha çeşitli, esnek ve özelleştirilebilir üretim olanağı da sunmaktadır.
2. Dijital teknolojilerin kullanımı ile dokunma işlemi daha hassas ve detaylı bir şekilde kontrol edilebilir hale gelmiştir.
3. Dijital teknolojiler ile otomatikleşen sistemler, insan hatasını azaltmış ve bunun sonucunda süreçlerin daha verimli ve daha hızlı olmasını sağlamaktadır.
4. Dijital dönüşüm ile üretimde enerji tasarrufu sağlanmakta ve üretim proseslerinde verimlilik artışı ile birlikte maliyetler de düşmektedir.
5. Dijital teknolojinin kullanılması, üretim hattında oluşabilecek atıkları ve çevre kirliliğini azaltabilir.

Endüstri 4.0 ve bu bağlamda ortaya çıkan Dijital dönüşüm sürecinin işletmeler üzerindeki etkileri konusunda yapılan çalışmalar giderek artmaktadır. Bu çalışmada elde edilen bulgulara göre elde edilen bilgiler ışığında hazırlanan SWOT analizi aşağıda yer almaktadır.

Tablo 1. Dijital dönüşüm Swot analizi

GÜÇLÜ YÖNLER

- Güncel bilgilere anında ulaşım sağlanması,
- Zaman ve iş gücü bakımından hızlı çözümlerin alınması,
- Müşteri odaklılık,
- Fayda-Maliyet analizinde bu oranın yüksek elde edilmesi,
- Sosyal medyanın aktif kullanılması,
- Müşteri ile sağlıklı iletişimin kurulması,
- Örgüt kültürünü iyileştirmesi.

ZAYIF YÖNLER

- Yüksek maliyet
- Teknolojik zorlukların ortaya çıkması
- Bilgiye kolay ulaşıldığı için birbirine benzer ürünlerin ortaya çıkması
- Eğitimci tarafından verilen desteğin küçümsenmesi
- İşletmede dijital dönüşüm uygulamalarının önemini kavrayabilmiş idarecilerin olmaması,
- Dijital dönüşüm faaliyetlerinin üst yönetim tarafından benimsenmemesi,
- Dijitalleşme sürecine uyum için gerekli maddi kaynakların bulunmaması,
- Çalışma saatlerini ve iş yüklerini arttırması.

FIRSATLAR

- Küresel iş birliği:
- Dünya'daki yaşanan teknolojik gelişmeleri, etkinlikleri, çalışmalarını takip edebilme,
- Üretici ve tüketicilerle kolay ulaşılması
- Bilgiye, kaynağa, etkinliklere hızlı bir şekilde ulaşma/takip edebilme
- Yeni iş fırsatları ortaya çıkacağı (freelance vb.),
- Pandemi sonrası müşterilerin online alışveriş kullanımına daha yatkın olması,
- Her geçen gün daha fazla tüketicinin internet kullanmaya başlaması.

TEHDİTLER

- Dijital güvenlik tehditleri
- Bazı iş ve meslekleri ortadan kaldırma olasığının bulunması,
- Bilgiye kolay ulaşılması sonucunda kişilerin kendini geliştirmemesi,
- Gereksiz bilgi kirliliği ve doğru bilgiye ulaşmada yaşanan zorluk
- Dijital pazarlama faaliyetlerine erken başlamış çok sayıda büyük işletme olması
- Tüketicinin istek ve ihtiyaçlarının karmaşıklığı,
- Dijital pazarlara girişin rakipler için de kolay olması.

SONUÇ VE ÖNERİLER

İşletmelerde dijital dönüşüm; imalatın, iş yapma modellerinin ve insan kaynağının dönüşümüne sebep olmuştur. Bu teknolojiler üretim ve hizmet işletmelerinin operasyonel iyileştirmelerinde uygulanabildiği gibi, değişen müşteri taleplerine cevap vermek için de kullanılabilmektedir. Daha verimli ve daha az atık üreten üretim süreçleri, ekonomi dönüşünü destekleyerek, sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır.

Sonuç olarak şu tespiti yapmak yanlış olmayacaktır: Hızla dijitalleşen bir dünyada, dijital dönüşümün özümsemesi ve sürdürülebilirliği işletmeler için büyük fırsatlar yaratacaktır. Günümüzün hızla dijitalleşen dünyasında, işletmelerin sürdürülebilir bir rekabet avantajı elde edebilmesi için dijital dönüşüm süreçlerine uyum sağlamaları kritik hal almıştır.

KAYNAKÇA

- Abbu, H., Mugge, P., Gudergan, G., Hoeborn, G. and Kwiatkowski, A. (2022). measuring the human dimensions of digital leadership for successful digital transformation: digital leaders can use the authors' digital leadership scale to assess their own readiness and ability to accelerate digital transformation. *Research-Technology Management*, Vol. 65 No. 3, pp. 39-49, doi: 10.1080/ 08956308.2022.2048588.
- Aksoy, C. (2024). İşletmelerin dijital dönüşümü ve dijital liderlik yaklaşımı. *Kalite Ve Strateji Yönetimi Dergisi*, 4(1), 1-29, doi.org/10.56682/ksydergi.1364569
- AlNuaimi, BK, Singh, SK, Ren, S., Budhwar, P. ve Vorobyev, D. (2022). Dijital dönüşümde ustalaşmak: liderlik, çeviklik ve dijital strateji arasındaki bağlantı. *İşletme Araştırmaları Dergisi*, Cilt 145, ss. 636-648, doi: 10.1016/j.jbusres.2022.03.038.
- Ammar, M., Haleem, A., Javaid, M., Bahl, S., & Verma, A. S. (2022).Implementing Industry 4.0 technologies in self-healing materials and digitally managing the quality of manufacturing. *Materials Today: Proceedings*, 52, 2285-2294.
- Azevedo, A., & Almeida, A. (2021). Grasp the challenge of digital transition in smes—a training course geared towards decision-makers. *Education Sciences*, 11(4), 151.
- Başar, R. (2023). Nesnelerin interneti (IoT) ile güncel yaklaşımlar: İSKİ Akıllı Sayaç Örneği. International Antalya Scientific Research and Innovative Studies Congress-V, Temmuz-2023, Antalya-Türkiye, 167-177.
- Berman, S. J., & Marshall, A. (2019). Creating a digital culture: Rules of engagement for the digital age. Routledge.
- Che, T., Cai, J., Yang, R., & Lai, F. (2023). “Digital transformation drives product quality improvement: An organizational transparency Forecasting and Social Change, 197, 122888. perspective”. *Technological*
- Çalış Duman, M. (2024). Üretimde dijitalleşmenin kalite üzerine yansımaları: bir tekstil işletmesinden kanıtlar. *Giresun Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Dergisi*, 10(2), 354-376. <https://doi.org/10.46849/guiibd.1495777>
- Deloitte. (2018). Digital enablement turning your transformation into a successful journey.
- Demirel, E., & Yaralı, C. (2023). İmalat İşletmelerinin Dijitalleşme Süreçleri Üzerine Nitel Bir Çalışma. *Yönetim Ve Ekonomi Dergisi*21-41. <https://doi.org/10.18657/yonveek.1379397>
- 2023 Dijital Türkiye Yol Haritası, (2023). <https://www.ika.org.tr/assets/upload/dosyalar/dijital-turkiye-yol-haritasi-2023.pdf>
- Hadiansyah, Chandrarin, G., & Supriadi, B. (2024). Improved shipping company performance created by digital business transformation and corporate culture. *KnE Social Sciences*. <https://doi.org/10.18502/kss.v9i29.17234>
- Kacı, Ü., Çelik, S., Tekinkaya Kacı, Y. (2025). Kurumsal yönetimde dijital dönüşüm: python ile veri bilimi uygulamaları. *All Sciences Academy*. doi: org/10.5281/zenodo.15098368

- Khalil, E. A. & Özdemir, S. (2018). Nesnelerin internetine genel bir bakış: Kavram, özellikler, zorluklar ve fırsatlar. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(2), 311-326.
- Klein, M. (2020). İşletmelerin dijital dönüşüm senaryoları-kavramsal bir model önerisi. *Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi*, 19(74), 997-1019.
- Koda, Y., Çelebi, A. (2021). Endüstri 4.0 çerçevesinde katmanlı imalatla sensör uygulamaları. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 5 (1), 85-97. <https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.837635>
- Marr, B. (2019). Artificial intelligence in business: The rise of the machines. Springer.
- Melo, I. C., Alves Junior, P. N., Queiroz, G. A., Yushimito, W., & Pereira, J. (2023). Do we consider sustainability when we measure small and medium enterprises' (smes') performance passing through digital transformation?. *Sustainability*, 15(6), 4917.
- Monczka, R. M., Handfield, R. B., Giunipero, L. C., & Patterson, J. L. (2020). Purchasing and supply chain management. Cengage Learning.
- Morakanyane, R., Grace A. and O'Reilly P. (2017). Conceptualizing digital transformation in business organizations: a systematic review of literature, In Bled eConference, June 18 (21), 1 – 14.
- Parviainen, P., Tihinen, M., Kääriäinen, J., & Teppola, S. (2017). Tackling the digitalization challenge: how to benefit from digitalization in practice. *International Journal Of Information Systems And Project Management*, 5(1), 63-77.
- Porter, M. E., & Heppelmann, J. E. (2014). How smart, connected products are transforming competition. *Harvard Business Review*, 92(11), 64-88.
- Powell, D., Eleftheriadis, R., & Myklebust, O. (2021). "Digitally enhanced quality management for zero defect manufacturing". *Procedia CIRP*, 104, 1351-1354.
- Rogers, D. (2016). The digital transformation playbook. Rethink your business for the digital age. Columbia University Press.
- Santolamazza, A., Groth, C., Introna, V., Porziani, S., Scarpitta, F., Urso, G., ... & Biancolini, M. E. (2020). A Digital Shadow cloud-based application to enhance quality control in manufacturing". *IFAC-PapersOnLine*, 53(2), 10579-10584.
- Schwertner, K. (2017). Digital transformation of business. *Trakia Journal of Sciences*, 15(1):388-393.
- Sui, X., Jiao, S., Wang, Y., & Wang, H. (2024). Digital transformation and manufacturing company competitiveness. *Finance Research Letters*, 59, 104683.
- Şahin, D., Yılmaz, S. (2021). Endüstri 4.0 uygulamalarının sağlık kurumlarında insan kaynakları yönetimine etkilerinin değerlendirilmesi. *Uluslararası Sağlık Yönetimi ve Stratejileri Araştırma Dergisi*, 7 (1), 142-155. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/usaysad/issue/62190/930614>

- Trenerry, B., Chng, S., Wang, Y., Suhaila, Z.S., Lim, S.S., Lu, H.Y. and Oh, P.H. (2021). Preparing workplaces for digital transformation: an integrative review and framework of multi-level factors. *Frontiers in Psychology*, Vol. 12, p. 822, doi: 10.3389/fpsyg.2021.620766.
- Türkiye'nin Sanayi Devrimi "Dijital Türkiye" Yol Haritası,» T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2018.
- Üstündağ, A. ve Çevikcan, E. (2017). Endüstri 4.0: dijital dönüşümün yönetilmesi . Springer.
- Vermesan, O., Eisenhauer, M., Sundmaeker, H., Guillemin, P., Serrano, M., Tragos, E. Z., ... & Bahr, R. (2017). Internet of things cognitive transformation technology research trends and applications. *Cognitive Hyperconnected Digital Transformation*, 17-95
- Wang, G. (2022). Digital reframing: the design thinking of redesigning traditional products into innovative digital products. *Journal of Product Innovation Management*, Vol. 39 No. 1, pp. 95-118, doi: 10.1111/jpim.12605.
- Westerman, G., Bonnet, D., & McAfee, A. (2014). The nine elements of digital transformation. *MIT Sloan Management Review*, 55(3), 1-6.
- Xie, W., Zheng, D., Li, Z., Wang, Y., & Wang, L. (2024). Digital technology and manufacturing industrial change: Evidence from the Chinese manufacturing industry. *Computers & Industrial Engineering*, 187, 109825.
- Yankın, F. B. (2019). Dijital dönüşüm sürecinde çalışma yaşamı. *Trakya Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi E-Dergi*, 7(2), 1-38.
- Yılmaz, F. (2025). Digital Transformation in The Perspective of The United Nations 2030 sustainable development goals. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Girişimcilik Dergisi*, 8(16), 24-40. <https://doi.org/10.55830/tje.1581513>
- Zhang, L., Luo, Y., Tao, F., Li, B. H., Ren, L., Zhang, X., & Liu, Y. (2014). Cloud manufacturing: a new manufacturing paradigm. *Enterprise Information Systems*, 8(2), 167-187.
- <https://www.maksimtrade.com/dijital-teknolojinin-yeni-nesil-hali-uretimindeki-inovasyonlari/>
- <https://www.myk.gov.tr/tr/page/94>

Bölüm 2

ÇBAG TABANLI RÜZGÂR ÇİFTLİĞİNDE SSR ETKİSİNİ AZALTMAK İÇİN GSC VE RSC DEVRESİNDE ESK MODELLERİN GELİŞTİRİLMESİ

Mehmet Kenan DÖŞOĞLU¹, Mustafa DURSUN²

1 Prof. Dr., Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, kenandosoglu@duzce.edu.tr, ORCHID No: 0000-0001-8804-7070

2 Doç. Dr., Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, mustafadursun@duzce.edu.tr, ORCHID No: 0000-0001-9952-9358

Giriş

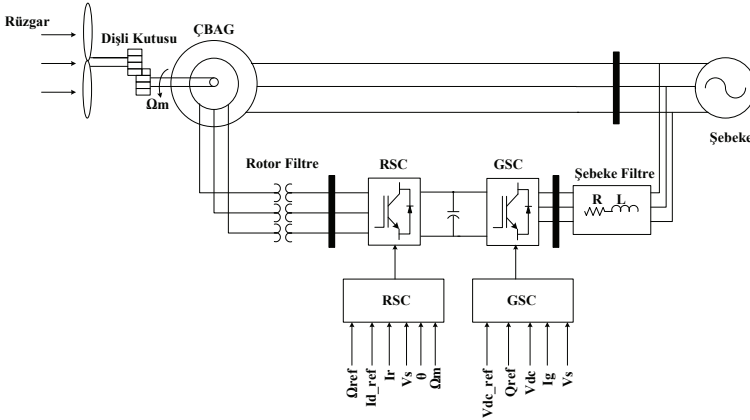
Günümüzde güç talebindeki artışlar ve güç sistemlerinin güç transfer limitlerinin kısıtlı hale gelmesinden dolayı yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye entegrasyonu popüler konulardan birisi olmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının da en önemlilerinden birisi olan rüzgâr enerjisi ile güç üretimi şebeke entegrasyonun sağlanması vasıtasıyla şebekenin çalışma koşullarında iyileşmeler görülmektedir. Ancak güç üretiminde kullanılan rüzgâr çiftliklerinin şebekeye uzak olması nedeniyle seri iletim sistemini gerektirmektedir. Seri iletim sistemi de ÇBAG'da Alt-Senkron Rezonans (SSR) problemlerini oluşturmaktadır (Verma, N., 2021). Seri kompanzasyon durumunda SSR olayları meydana geldiği için şebekeye bağlı ÇBAG tabanlı rüzgâr çiftliklerinde kararsızlık ve salınım durumlarını ortaya çıkarmaktadır. Bunun ortadan kaldırılması için literatürde farklı modeller tercih edilmektedir. ÇBAG tabanlı rüzgâr çiftliklerinde seri kompanzasyon sonucu meydana gelen kararsızlık durumlarını ortadan kaldırmak ve salınımların sönümlenmesi için farklı empedans modelleri geliştirilmektedir. Farklı empedans modelleri olarak empedans tabanlı Nyquist kararlılık kriteri, frekansa bağlı empedans modellemesi, lineer olmayan empedans kontrolleri ve karmaşık vektör teorisi tabanlı empedans kontrolü sayesinde kararlılık ve salınımlar açısından etkili sonuçlar elde edilmiştir (Miao, 2012, Ju., vd., 2012, Jiang, vd., 2017, Zhang, vd., 2019). ÇBAG'de geliştirilen empedans kontrolün yanısıra iletim hattına seri olarak bağlanan Esnek AC İletim Sistemi (FACTS) elemanları ile sistemde empedans kontrolü sağlanmaktadır. FACTS cihazlarından Statik Senkron Seri Kompanzatör (SSSC) ve Tristör Kontrollü Seri Kompanzatör (TCSC) iletim hattına seri bağlanarak ÇBAG tabanlı rüzgâr çiftliklerinde SSR durumları empedans tabanlı olarak kontrol edilmektedir (Piyasinghe, vd., 2014, Rohit, vd., 2023). ÇBAG tabanlı rüzgâr çiftliklerinde diğer FACTS elemanlarında Statik Senkron Kompanzatör kullanımı da mevcuttur. Farklı rüzgâr hızı ve seri kompanzasyon oranlarında sistemde reaktif güç ayarlanması STATCOM sayesinde gerçekleştirilmektedir. ÇBAG'da SSR olaylarını minimum yapmak için reaktif güç gereksinimi STATCOM'un lineer olmayan modellemesi ile etkili bir şekilde sağlanmaktadır. (Roy, vd., 2020, Li, vd., 2019). ÇBAG tabanlı rüzgâr çiftliğinde SSR etkisini minimum yapmak için sanal kontrol yaklaşımları tercih edilmektedir. Eylemsizlik durumu için sanal senkron generatör modellemesi ve iletim hattının kompanzasyon durumunun ayarlanmasında sanal direnç modelleri geliştirilmektedir (Gu, vd., 2019, Wu, vd., 2019). Şebekeye bağlı ÇBAG'da farklı rüzgâr hızlarında ve farklı seri kompanzasyon oranlarında kararlılığın sağlanması ve salınımların sönümlenmesi SSR durumunu tamamıyla kontrol etmek için bozunumları hızlıca takip edebilmek, önceden kestirebilmek ve sistemdeki istenen

performansı hızlı bir şekilde sağlayabilmek için geri adımlama kontrolü, kayan kip kontrol modeli ve aktif bozulma ret edici kontrol yapıları geliştirilmektedir. Tercih edilen bu modeller sayesinde etkili sonuçlar elde edilmektedir (Roy, vd., 2021, Jewel, vd., 2021, Xu, vd., 2019). ÇBAG'da SSR durumlarında sistemin kontrolünün sağlanmasında rezonans kontrol modeli geliştirilmektedir. Farklı rüzgâr hızı ve farklı seri kompanzasyon oranlarında rezonans kontrolünün GSC ve RSC devrelerinde en uygun yerleşim yerinin belirlenmesi olayı detaylı olarak incelenmiştir. Yapılan detaylı analiz sonucunda rezonans kontrolün sistem kararlılığını sağlamada ve salınımların sönümlenmesinde etkili olduğu ilgili çalışmalarda görülmüştür (Touti, vd., 2024). ÇBAG tabanlı rüzgâr çiftliklerini bağlayan seri kompanze edilmiş bir sistemde SSR etkisi asenkron generatorün olumsuz etkilerini ortaya çıkarmaktadır. Bu olumsuz etkileri minimum yapmak için sönümleme kontrol döngüsüyle birleştirilmiş iki serbestlik derecesi (2DOF) kontrol stratejisi geliştirilmektedir. Farklı çalışma koşullarında geliştirilen modelin kararlılık yönünden başarılı olduğu görülmektedir (Huang, vd., 2014, Bodapatla vd., 2024). ÇBAG'da sistem kararlılığın ve salınım sönümlemesinin hızlı olması, kullanımın basit olması ve düşük maliyetli olması için ESK modelleri geliştirilmektedir. GSC ve RSC devresinde farklı stratejiler ile geliştirilen ESK modellerin rüzgâr hızı ve seri kompanzasyona bağlı farklı çalışma koşulları altında iyi sonuçlar verdiği görülmektedir (Abdeen, vd., 2022, Leon, vd., 2015).

Bu çalışmada ÇBAG'da SSR olaylarının etkisini hızlı bir şekilde ortadan kaldırmak için en ekonomik çözümlemelerden olan ESK modelin hem GSC hem de RSC devresinde geliştirilmesi amaçlanmıştır. GSC devresinde açısız hız tabanlı ESK modeli geliştirilirken, RSC devresinde aktif güç tabanlı ESK modelleri geliştirilmiştir. Analizler için sabit rüzgâr hızı ve farklı seri kompanzasyon oranları kullanılmıştır. Rüzgâr hızının 8 m/s olduğu ve seri kompanzasyon oranlarının % 30, % 40 ve % 50 olduğu durumlar detaylı olarak karşılaştırılmıştır. ESK modelin kullanılmadığı, ESK modelin GSC devresinde kullanıldığı, ESK modelin RSC devresinde kullanıldığı ve ESK modelin hem GSC'de hem de RSC'de kullanıldığı durumlar incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde ESK modelin hem GSC'de hem de RSC'de kullanıldığı durumların diğer durumlara göre kararlılık ve salınımların sönümlemesi açısından daha iyi sonuçlar vermiştir.

ÇBAG Modeli

ÇBAG sistemi, bir rüzgâr türbini, generatör, GSC ve RSC ile birlikte arka arkaya güç eviricileri içermekte ve transformatör üzerinden şebekeye bağlanmaktadır. Şebeke bağlantılı ÇBAG kontrol modeli Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Şebeke bağlantılı ÇBAG kontrol modeli

Kontrol sisteminin iki seviyesi vardır. Birincisi rüzgâr türbini kontrolü iken ikincisi ise evirici kontrolleridir. Rüzgâr seviyesi ölçülen rüzgâr hızına ve optimum güç hızı karakteristiği eğrisine dayanarak ÇBAG'ün rotor hızı için referans moment değeri üreten maksimum güç noktası takibi bölümüdür. Ayrıca rüzgâr türbininin çıkışı mekanik gücün eğim açısı ile kontrol edilir. İki seviyeli kontrol stratejisi sırasıyla anma hızının altında ve üstünde hem güç optimizasyonu hem de güç sınırlaması için kullanılmaktadır (Hansen, vd., 2004). Evirici kontrolü yani RSC ve GSC'nin kontrolleri aktif ve reaktif gücü ayırmaktadır.

Rüzgâr Türbini Aerodinamik Modeli

ÇBAG tabanlı rüzgâr türbinlerinde rüzgârdan gelen enerji kanatlar tarafından mekanik olarak yakalanmakta, sonrasında ÇBAG tarafından elektrik enerjisine dönüştürülmekte ve son olarak bu enerji elektrik şebekesine bağlanmaktadır (Lei, vd., 2006). Burada momentum teorisi rüzgâr türbininin davranışını incelemek için kullanılmaktadır. Bazı ideal varsayımlar altında rüzgârdan elde edilen güç ifadesi denklem 1'de gösterilmiştir.

$$P_t = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_w^3 C_p \quad (1)$$

Burada ρ hava yoğunluğu, R rüzgâr türbininin kanat çapı, V_w rüzgâr hızı ve C_p rüzgâr türbininin rüzgârın kinetik enerjisinin mekanik enerjiye dönüştürülmesindeki etkinliğini olarak tanımlanan boyutsuz bir para-

metredir. Belirli bir rüzgâr türbini için bu katsayı rüzgâr hızının, rüzgâr türbininin dönme hızının (Ω_t) ve eğim açısının (β) bir fonksiyonudur. C_p genellikle uç hız oranının λ bir fonksiyonu $C_p=f(\lambda, \beta)$ olarak hesaplanmaktadır. Uç hız oranının elde edilişi denklem 2’de verilmiştir.

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{V_w} \quad (2)$$

Teorik olarak C_p ’nin maksimum değeri Betz kanunu ile belirlenmektedir. Bu çalışmada C_p ’nin değeri 0.4412 ve optimum uç hız oranı 7.2 olarak belirlenmiştir.

Türbin Kontrol

Rüzgâr türbininin genel kontrol modeli Şekil 1’de gösterilmektedir. Rüzgâr türbini için çıkış mekanik momenti denklem 3’deki gibi elde edilmektedir.

$$T_m = \frac{1}{2} \rho A R^3 V_w^2 C_t \quad (3)$$

Burada ρ hava yoğunludur (kg.m^3), A kanat tarama alanı (m^2), R rüzgâr türbininin rotor açısı (m), ve V_w rüzgâr hızıdır (m/s). C_p kanat eğim açısı β ’nin ve uç hız oranının (λ) bir fonksiyonu olan kanatın güç katsayısıdır. Bu ifadeler denklem 4 ve denklem 5’de gösterilmiştir.

$$C_p = k_1 \left(\frac{k_2}{\lambda_i} - k_3 \beta - k_4 \beta^2 - k_5 \right) e^{-\left(\frac{k_7}{\lambda_i} \right)} \quad (4)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\lambda + k_8} \quad (5)$$

Bunlara bağlı olarak uç hız oranı ifadesi denklem 6’da gösterilmiştir.

$$\lambda_{\text{opt}} = \frac{\Omega_m R}{V_w} \quad (6)$$

Burada Ω_m mekanik açısal hızdır.

ÇBAG vektör kontrol

ÇBAG'ın vektör kontrolü d-q referans çatı çerçevesinde gerçekleştirilmektedir. GSC kontrol yapısı iç akım kontrol döngüsüne ve dış moment veya hız kontrol döngüsüne sahiptir. ÇBAG'ın elektromanyetik momenti ve reaktif gücü hesaplaması d-ekseninde stator akısını hizalayarak referans olarak senkronize dönen d-q referans çerçevesi içerisinde kontrol edilmektedir (Kasem, vd., 2008, Pena, vd., 1996, Lopez, vd., 2007). Senkron referans çerçevesinde d-q eksen gerilim ifadeleri denklem 7'de gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} v_{dr} &= R_r i_{dr} + \sigma L_r \frac{d}{dt} i_{dr} - \omega_r \sigma L_r i_{qr} + \frac{L_m}{L_s} \frac{d}{dt} |\vec{\Psi}_s| \\ v_{qr} &= R_r i_{qr} + \sigma L_r \frac{d}{dt} i_{qr} + \omega_r \sigma L_r i_{dr} + \omega_r \frac{L_m}{L_s} |\vec{\Psi}_s| \end{aligned} \quad (7)$$

Burada, v_{dr} , v_{qr} ve i_{dr} , i_{qr} sırasıyla rotor d-q eksen gerilimleri ve akımlarıdır. R_r rotor direncini, L_r rotor endüktansını, ω_r rotor açısal hızını, L_m mıknatıslanma endüktansını, L_s stator endüktansı ve $\vec{\Psi}_s$ stator akısını temsil etmektedir. σ ise kaçak faktörüdür.

Mevcut kontrol döngüleri ve akı açısı hesaplaması incelendikten sonra ÇBAG'da bütün kontrol sistemleri oluşturulabilmektedir. Referans çerçevesinin d eksen stator akı uzay vektörü ile aynı hizada olduğundan d-q çerçevesindeki moment ifadesi denklem 8'de gibi basitleştirilmektedir.

$$T_{em} = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_s} (\Psi_{qs} i_{dr} - \Psi_{ds} i_{qr}) \Rightarrow T_{em} = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_s} |\vec{\Psi}_s| i_{qr} \Rightarrow T_{em} = K_T i_{qr} \quad (8)$$

Denklem 8'de T_{em} elektriksel momentini p ise çift kutup sayısını ifade etmektedir. Denklemden q rotor akımı bileşeninin moment ile orantılı olduğu görülmektedir. Başka bir ifade ile q eksen rotor akımı ile moment kontrolü sağlanabilmektedir. Buna bağlı olarak makina hızı kontrol edilebilmektedir. Benzer şekilde d-q çerçevesindeki stator reaktif güç ifadesini geliştirerek d eksen rotor akımının kontrol edilebileceği ortaya çıkmaktadır. stator reaktif güç ifadesi denklem 9'da gösterilmiştir.

$$Q_s = \frac{3}{2} (v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs}) \Rightarrow Q_s = -\frac{3}{2} \omega_s \frac{L_m}{L_s} |\vec{\Psi}_s| \left(i_{dr} - \frac{|\vec{\Psi}_s|}{L_m} \right) \Rightarrow Q_s = K_Q \left(i_{dr} - \frac{|\vec{\Psi}_s|}{L_m} \right) \quad (9)$$

Her iki rotor akımı d-q bileşeninin bağımsız olarak moment ve stator reaktif gücünü kontrol istediğimiz gibi kontrol edebiliriz.

SSR

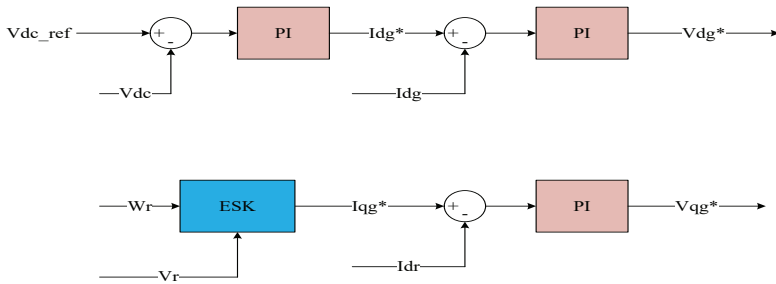
SSR rüzgâr santralının elektrik şebekesiyle bir veya daha fazla doğal frekansı değiştirdiği durumdur. Kapasitif seri kompanzasyonlu bir güç sisteminde şebekenin şu şekilde hesaplanan bir doğal frekansı vardır: $f_n = f_s \sqrt{X_c/X_L}$, burada f_n ve f_s sırasıyla doğal frekans ve senkron frekanstır. X_L pu cinsinden hat reaktansıdır ve X_c hattın seri kapasitör reaktansıdır. Kompanzasyon yüzdesi (K) hat reaktansının yüzdesidir (Fan, vd., 2010). f_n 'ye göre kayma s_n aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$s_n = \frac{f_n - f_r}{f_n}$$

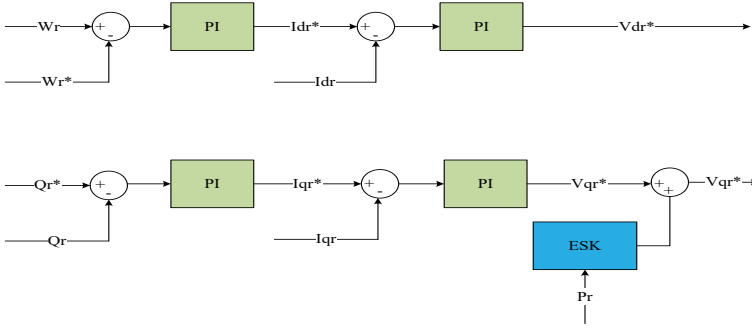
Burada f_r rotor frekansdır (Hz). f_n , f_r 'den düşük olduğu için s_n negatiftir. Bu nedenle rotor eşdeğer direnci alt senkron frekansında negatiftir. Başka bir ifadeyle $R_{r,s} = R_r/s_n$ negatiftir. Bu direncin genliği şebeke ve generatör endüvisinin toplam dirençlerinden dolayı artarsa sistemin toplam direnci (R_{sys}) alt senkron frekansta negatif olacaktır. Bundan dolayı sistemin toplam akımının ikinci kısmı pozitif güçle üstel bir fonksiyona sahip olacaktır. Bu nedenle hat akımı üstel olarak artacaktır. Bu durumua asenkron generatör etkisi denmektedir. Bunun yanısıra stator akımında rezonans frekansa sahip bir bileşen oluşacak ve rotor akımında bu bileşeni tamamlayıcı frekans ($f_s - f_n$) belirleyecektir (Fateh, vd., 2020).

ÇBAG'da GSC ve RSC'de ESK Modelin Geliştirilmesi

ÇBAG'de ESK modelin geliştirilmesi hem GSC hem RSC devresinde gerçekleştirilmiştir. Hibrit olarak geliştirilen ESK modelin yapısı şekil 2 ve şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 2. GSC devresindeki ESK modelin kullanımı

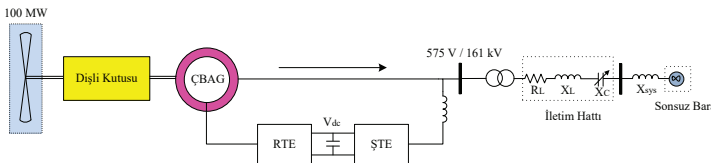


Şekil 3. RSC devresindeki ESK modelin kullanımı

Şekil 2’de gösterilen GSC devresinde ESK modelde girişler rotor açısal hız değeri ve rotor çıkışındaki terminal değerleridir. Bu kısımda geliştirilen referans rotor açısal hız değerleri 1.25 p.u olarak sabit verilmiştir. Rotor açısal hız değeri ve referans olarak verilen rotor açısal hız değerlerinin farkı açı değeri olarak belirlenmektedir. Elde edilen bu açı değeri bir kazanç katsayısı ile çarpılmaktadır. Bu kazanç değeri -250 olarak belirlenmiştir. Bu hesaplanan değer bir sınırlandırıcı bloğa girmiştir. Sınırlandırıcı bloğun alt ve üst limit değerleri -0.1 ile 0.1 arasındadır. Burada elde edilen değer toplama işlemine girmektedir. Şekil 2’de faz kilitleme döngüsü gerilimi ile referans gerilim arasındaki fark alınmaktadır. Burada ki toplama ve çıkarma işlemleri elde edilen sonuç bir Oransal Integral (PI) denetleyicisine girmektedir. PI denetleyici çıkışı ile GSC devresindeki I_{q_ref} değeri elde edilmektedir. Şekil 3’te gösterilen RSC devresinde kullanılan ESK modelin girişi aktif güçtür. Aktif güç değeri bir K katsayısı ile çarpılarak Lead-Lag transfer fonksiyonlarına girmektedir. Lead-Lag çıkışında iki tane filtre kullanılmıştır. Bu filtreler 2. derece düşük geçiren filtre ve 2. derece yüksek geçiren filtre kısımlarıdır. Yüksek geçiren filtre çıkış kısmı q eksen evirici rotor gerilimine girmektedir. Burada q eksen evirici rotor gerilimine bağlı olarak hesaplamalar kısmında kullanılmaktadır. Bu ESK modelinde d eksen evirici rotor geriliminde herhangi bir işlem yapılmamaktadır.

Benzetim Çalışması

Benzetim çalışması modellemesi şekil 4’te verilmiştir.

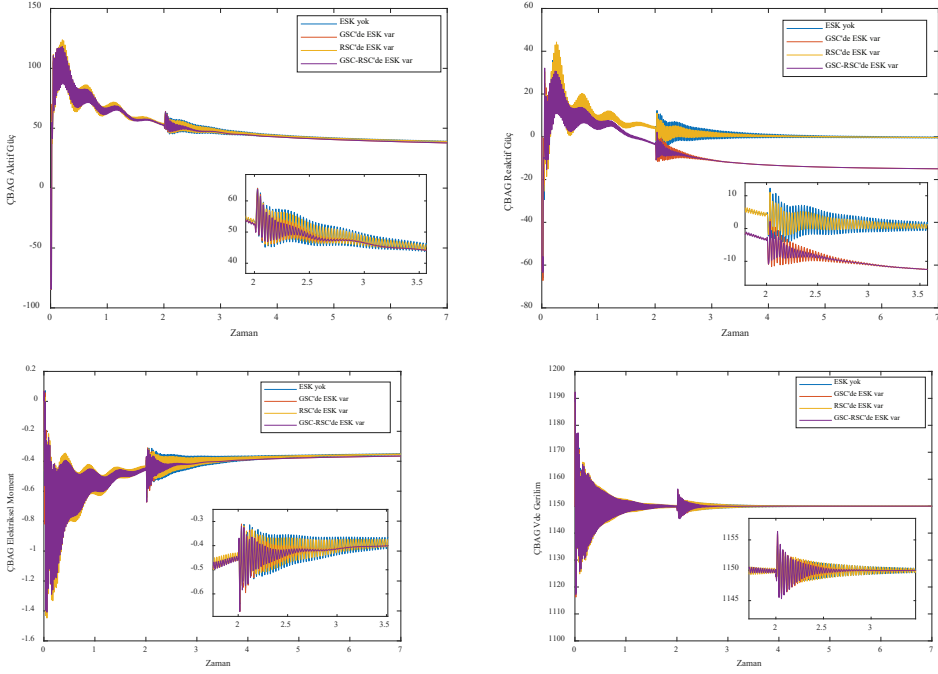


Şekil 4. Benzetim çalışması modellemesi

Benzetim çalışmasında 66 adet rüzgâr türbini kullanılmıştır. Rüzgâr çiftliğinin toplam gücü 100 MW'dır. Rüzgâr türbininde kullanılan ÇBAG'lardaki çıkış gerilimi 575 V'tur. ÇBAG'ların çıkış gerilimi 161 kV'luk şebekeye bağlanmaktadır. Bunun için yükseltici transformatör kullanılmıştır. Transformatörün gücü 100 MVA'dır. Transformatör bağlantısı primeri üçgen ve sekonderi yıldızdır. Şebeke tarafında seri kompanzasyonu oluşturmak için kondansatör bağlanmıştır. Benzetim çalışmasında kondansatör sistemde %30, %40 ve %50 oranında seri kompanzasyon oluşturmaktadır. Kondansatör devreye kesici sayesinde bağlanmaktadır. Kondansatörün sisteme bağlandığında 3 faz arızası meydana gelmektedir. Sistemdeki 3 faz arızanın devreye girip çıkması 2 ile 2.1 saniyeler arasındadır. Bu çalışmada sistemde farklı seri kompanzasyon oranlarında ve ÇBAG'da farklı rüzgâr hızlarının analizleri incelenmiştir. Rüzgâr hızı sabit 8 m/s olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada ESK modelin kullanılmadığı, ESK modelin GSC devresinde kullanıldığı, ESK modelin RSC devresinde kullanıldığı ve ESK modelin hem GSC'de hem de RSC'de kullanıldığı durumları detaylı olarak incelenmiştir. Çalışmada ÇBAG'daki aktif güç, reaktif güç, elektriksel moment ve DC bara gerilim parametreleri değerlendirilmiştir.

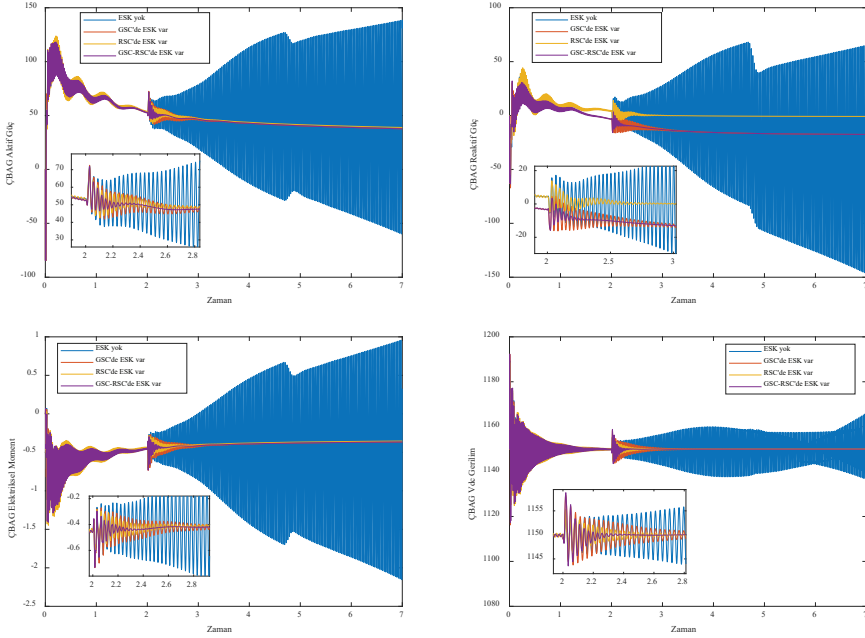
Benzetim Çalışması Sonuçları

Bu çalışmada rüzgâr hızını sabit 8 m/s olarak 3 farklı analiz incelenmiştir. İlk analizde kompanzasyon oranı %30 olarak belirlenirken, ikinci analizde kompanzasyon oranı %40 olarak belirlenmiştir. Üçüncü analizde ise kompanzasyon oranı %50 olarak alınmıştır. ESK modelin kullanılmadığı, ESK modelin GSC devresinde kullanıldığı, ESK modelin RSC devresinde kullanıldığı ve ESK modelin hem GSC'de hem de RSC'de kullanıldığı durumları detaylı olarak incelenmiştir. Birinci analizden elde edilen sonuçlar şekil 5'te detaylı olarak gösterilmiştir.



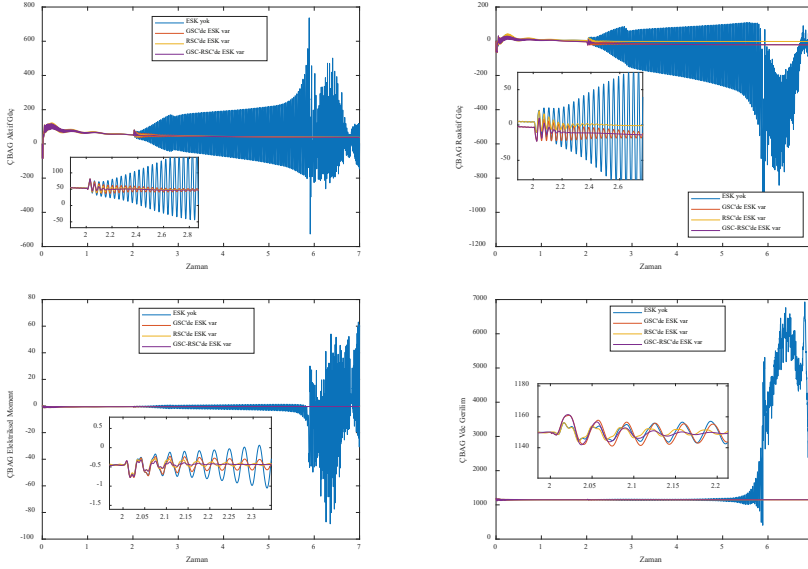
Şekil 5. 8 m/s rüzgâr hızı ve %30 seri kompanzasyondaki elde edilen sonuçlar

Rüzgâr hızının 8 m/s olduğu durumda ve seri kompanzasyon oranının % 30 olduğu durumdaki analizlerde ESK modelin kullanılmadığı durumda sistemin uzun zamanda aktif güç, reaktif güç, elektriksel moment ve DC bara gerilimlerindeki değişimlerdeki salınımların sönümlendiği görülmektedir. Sistemde ESK modelin GSC devresinde kullanıldığı, ESK modelin RSC devresinde kullanıldığı ve ESK modelin hem GSC'de hem de RSC'de kullanıldığı durumlarda sistemin hızlı bir şekilde kararlı hale geldikleri görülmektedir. Ancak şekil 5 grafikleri detaylı bir şekilde incelendiğinde yakınsama durumları göz önüne alındığı zaman salınımların hızlıca sönümlenmesinde ve sistemin kısa sürede kararlı hale gelmesinde en iyi sonuç veren ESK modelin hem GSC'de hem de RSC'de kullanıldığı durum olurken, en az iyi sonuç veren durum ESK modelin GSC devresinde kullanıldığı durum olmuştur. İkinci analizde rüzgâr hızının 8 m/s olduğu durumda, seri kompanzasyon oranının % 40 olduğu durumdur. İkinci analiz sonucu elde edilen sonuçlar şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. 8 m/s rüzgâr hızı ve %40 seri kompanzasyondaki elde edilen sonuçlar

Rüzgâr hızının 8 m/s olduğu durumda ve seri kompanzasyon oranının % 40 olduğu durumda EKS modelin kullanılmadığı durumda sistemdeki kararsızlığın ve salınımların giderek büyüdüğü görülmektedir. Aktif güç, reaktif güç, elektriksel moment ve DC bara gerilimindeki değişimlerde ESK modelin RSC devresinde kullanıldığı ve ESK modelin hem GSC'de hem de RSC'de kullanıldığı durumlarda etkili bir şekilde sistem kararlılığının sağlandığı ve salınımların sönümlendiği 3 faz arızasında görülmektedir. Sistemin en kararlı yapıya sahip olduğu ve salınımların en iyi şekilde sönümlendiği durum ESK modelin hem GSC'de hem de RSC'de tercih edilmesi ile elde edilirken, Sistemin en az kararlı yapıya sahip olduğu ve salınımların en az iyi şekilde sönümlendiği durum Sistemde ESK modelin GSC devresinde tercih edilmesi ile elde edilmiştir. Üçüncü analizde rüzgâr hızının 8 m/s olduğu durumda, seri kompanzasyon oranının % 50 olduğu durumdur. Üçüncü analizden elde edilen sonuçlar şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. 8 m/s rüzgâr hızı ve %50 seri kompanzasyondaki elde edilen sonuçlar

Üçüncü analizde rüzgâr hızının 8 m/s olduğu durumda ve seri kompanzasyon oranının % 50 olduğu durumda ESK modelin kullanılmadığı durumda sistemin birinci ve ikinci analizlere göre daha kötü sonuç verdiği görülmüştür. Sistemin hem kararsızlık hem de salınımların sönümlenmesi açısından kötü sonuçlar ile karşı karşıya kalınmıştır. 3 faz arızası sonucunda sistemde ESK modelin GSC devresinde kullanıldığı, ESK modelin RSC devresinde kullanıldığı, ESK modelin hem GSC'de hem de RSC'de kullanıldığı durumlarda sistemin hızlı bir şekilde kararlı hale geldiği ve aktif güç, reaktif güç, elektriksel moment ile DC bara gerilimlerdeki değişimlerinde oluşan salınımların hızlı bir şekilde sönümlendiği görülmüştür. Üçüncü analizde rüzgâr hızının 8 m/s olduğu durumda ve seri kompanzasyon oranının % 50 olduğu durumda yapılan karşılaştırmalar sonucunda en iyi sonucun ESK modelin hem GSC'de hem de RSC'de kullanıldığı durumlarda elde edildiği görülürken, üçüncü analizde yapılan karşılaştırmalar sonucunda en az iyi sonucun ESK modelin GSC'de kullanıldığı durumda elde edildiği görülmüştür.

Sonuç

Şebeke bağlı olarak çalışan ÇBAG tabanlı rüzgâr çiftliğinde seri kompanzasyon sonucu meydana gelen SSR olayları detaylı olarak ele alınmıştır. Sabit rüzgâr hızı ve farklı seri kompanzasyon oranlarında aktif güç, reaktif güç, elektriksel moment ile DC bara gerilimlerindeki değişimleri detaylı olarak incelenmiştir. Bu parametrelerdeki değişimlerde ESK modelin kullanılmadığı durumda % 30 seri kompanzasyon oranında sistemin en az etkilendiği görülürken, % 40 ve % 50 seri kompanzasyon oranlarında sistemin daha çok etkilendiği görülmüştür. Rüzgâr hızının 8 m/s sabit olduğu durumda ve seri kompanzasyon oranlarının % 30, % 40 ve % 50 olduğu durumlarda yapılan karşılaştırmalarda ESK modelin GSC devresinde kullanıldığı, ESK modelin RSC devresinde kullanıldığı, ESK modelin hem GSC’de hem de RSC’de kullanıldığı durumlarda iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Bunların özetlenmesinde en etkili bir şekilde sistem kararlılığını hızlı olarak ve 3 faz arızası sonucu meydana gelen salınımların en hızlı şekilde sönümlenmesini sağlayan durum ESK modelin hem GSC’de hem de RSC’de kullanıldığı durum olmuştur. Sistem kararlılığının ve salınımların daha uzun sürede sönümlenmesini sağlayan durum ESK modelin GSC’de kullanılması ile elde edilmiştir. Yapılan bu çalışma ESK modellerin farklı yaklaşımlar ile geliştirilebileceği ve farklı senaryolar ile modellemelerin oluşturulabilmesine zemin hazırlamaktadır. Bunun yanı sıra ESK modelinin SSR analizlerinde farklı hibrit modellerin empedans tabanlı olarak geliştirilebilmesine de öncü olacaktır.

Kaynakça

- Verma, N. (2021, December). SSR Stability Analysis and Modeling for DFIG Connected to Series Compensated Transmission Line. In *PREPARE@ u^{*} | IEI Conferences*.
- Miao, Z. (2012). Impedance-model-based SSR analysis for type 3 wind generator and series-compensated network. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 27(4), 984-991.
- Ju, P., Sun, B., Shahidehpour, M., & Pan, X. (2020). Impedance modeling and analysis for DFIG-based wind farm in SSO studies. *IEEE Access*, 8, 158380-158390.
- Jiang, H., You, J., Liu, H., Ning, W., & Wu, L. (2017, July). Impedance characteristics of DFIGs considering the impacts of DFIG numbers and locations and its application on SSR analysis. In *2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting* (pp. 1-8). IEEE.
- Zhang, X., Zhang, Y., Fang, R., & Xu, D. (2019). Impedance modeling and SSR analysis of DFIG using complex vector theory. *IEEE Access*, 7, 155860-155870.
- Piyasinghe, L., Miao, Z., Khazaei, J., & Fan, L. (2014). Impedance model-based SSR analysis for TCSC compensated type-3 wind energy delivery systems. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 6(1), 179-187.
- Rohit, C., Darji, P., & Jariwala, H. R. (2023). A preordainment approach for design of auxiliary damping controller and SSSC tuning to enhance SSR mode stability in DFIG based windfarm. *Smart Science*, 11(3), 605-628.
- Roy, T. K., Ghosh, S. K., Anower, M. S., Mahmud, M. A., Kumar, R., & Saxena, A. (2020, December). Mitigation of SSR in series-compensated DFIG-based wind farms with STATCOMs using a nonlinear backstepping control scheme. In *2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)* (pp. 1-6). IEEE.
- Li, N., Wang, L., Yang, H., & Ma, H. (2019, August). Stability analysis for SSR of DFIG-based wind farm considering STATCOM capacity constraint. In *2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)* (pp. 1-6). IEEE.
- Gu, K., Wu, F., Zhang, X. P., Ju, P., Zhou, H., Luo, J., & Li, J. (2019). SSR analysis of DFIG-based wind farm with VSM control strategy. *IEEE Access*, 7, 118702-118711.
- Wu, K., Meng, Y., Pan, X., Zou, Y., Ye, R., & Xue, J. (2019, October). A combined SSR damping strategy based on virtual resistance method and SSR damping controller in dfig-based wind farm. In *2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP)* (pp. 1451-1455). IEEE.

- Roy, T. K., & Mahmud, M. A. (2021, October). Hybrid robust adaptive backstepping sliding mode controller design for mitigating SSR in series-compensated DFIG-based wind generation systems. In *2021 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)* (pp. 1-6). IEEE.
- Jewel, A. S., Roy, T. K., & Rani, T. (2021, December). Power reaching law based double-integral sliding mode controller for mitigating ssr problems in dfig based wind farms. In *2021 IEEE International Women in Engineering (WIE) Conference on Electrical and Computer Engineering (WIECON-ECE)* (pp. 133-136). IEEE.
- Xu, Y., & Zhao, S. (2019). Mitigation of subsynchronous resonance in series-compensated DFIG wind farm using active disturbance rejection control. *IEEE Access*, 7, 68812-68822.
- Touti, E., Abdeen, M., El-Dabah, M. A., Kraiem, H., Agwa, A., Alanazi, A., & Alanazi, T. I. (2024). Sub-Synchronous Oscillation Mitigation for Series-Compensated DFIG-Based Wind Farm Using Resonant Controller. *IEEE Access*.
- Huang, P. H., El Moursi, M. S., Xiao, W., & Kirtley, J. L. (2014). Subsynchronous resonance mitigation for series-compensated DFIG-based wind farm by using two-degree-of-freedom control strategy. *IEEE Transactions on Power Systems*, 30(3), 1442-1454.
- Bodapatla, S. K., Sarma, P. M., & Gaddam, M. (2024). A Robust UDE-Based 2DOF Controller for Mitigating Sub-Synchronous Control Interaction in Wind Power Plants. *Electric Power Components and Systems*, 52(4), 610-628.
- Abdeen, M., Li, H., Mohamed, M. A. E. H., Kamel, S., Khan, B., & Chai, Z. (2022). Sub-synchronous interaction damping controller for a series-compensated DFIG-based wind farm. *IET Renewable Power Generation*, 16(5), 933-944.
- Leon, A. E. (2015). Integration of DFIG-based wind farms into series-compensated transmission systems. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 7(2), 451-460.
- Hansen, A. D., Sørensen, P., Iov, F., & Blaabjerg, F. (2004). Control of variable speed wind turbines with doubly-fed induction generators. *Wind Engineering*, 28(4), 411-432.
- Lei, Y., Mullane, A., Lightbody, G., & Yacamini, R. (2006). Modeling of the wind turbine with a doubly fed induction generator for grid integration studies. *IEEE transactions on energy conversion*, 21(1), 257-264.
- Kasem, A. H., El-Saadany, E. F., El-Tamaly, H. H., & Wahab, M. A. A. (2008). An improved fault ride-through strategy for doubly fed induction generator-based wind turbines. *IET Renewable Power Generation*, 2(4), 201-214.
- Pena, R., Clare, J. C., & Asher, G. M. (1996). Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation. *IEE Proceedings-Electric power applications*, 143(3), 231-241.

- Lopez, J., Sanchis, P., Roboam, X., & Marroyo, L. (2007). Dynamic behavior of the doubly fed induction generator during three-phase voltage dips. *IEEE Transactions on Energy conversion*, 22(3), 709-717.
- Fan, L., Kavasseri, R., Miao, Z. L., & Zhu, C. (2010). Modeling of DFIG-based wind farms for SSR analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25(4), 2073-2082.
- Fateh, D., Birjandi, A. A. M., & Guerrero, J. M. (2020). A subsynchronous resonance prevention for DFIG-based wind farms. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 28(5), 2670-2685.

Bölüm 3

MÜHENDİSLİKTE BİYOMİMETİK: DOĞADAN İLHAM ALAN YAPISAL MALZEMELERİN TASARIMI VE ÜRETİMİ

Tevfik Oğuzhan ERGÜDER¹, Caner BULUT²

1 Dr. Öğr. Üyesi, Kafkas Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, oguzhan.erguder@kafkas.edu.tr, 0000-0002-8876-6152

2 Dr. Öğr. Üyesi, Iğdır Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Bölümü, Otomotiv Teknolojisi, caner.bulut@igdir.edu.tr, 0000-0001-5421-300X

1. Giriş

Gelişmiş mühendislik sistemleri için yüksek performanslı, hafif, dayanıklı ve çevre dostu malzemelerin geliştirilmesi, modern malzeme biliminin temel hedeflerinden biridir. Ancak bu hedeflere ulaşmak, geleneksel mühendislik yaklaşımlarında sıkça karşılaşılan karmaşık üretim süreçleri, yüksek enerji tüketimi ve çevresel etkiler gibi önemli sınırlamalar nedeniyle zorlaşmaktadır (Vincent et al. 2006; Meyers et al. 2008). Ayrıca, ileri düzeyde mekanik, termal, optik ve elektriksel özelliklerin tek bir malzemede bir araya getirilmesi, geleneksel üretim teknikleriyle oldukça maliyetli ve sınırlıdır. Bu noktada doğa, milyarlarca yıllık evrimsel süreçler sonucunda geliştirdiği son derece işlevsel ve verimli yapılarla mühendisliğe ilham veren benzersiz bir model sunmaktadır. Biyomimetik, doğadaki yapı, süreç ve işlevleri taklit ederek mühendislik uygulamalarına aktarmayı amaçlayan disiplinler arası bir yaklaşımdır (Bhushan 2009). Bu yaklaşım yalnızca doğadaki yapıların fiziksel özelliklerini taklit etmeyi değil aynı zamanda bu yapıların üretim süreçlerini de model almayı içermektedir. Doğada sınırlı sayıda element ve basit organik bileşikler kullanılarak çok çeşitli çevresel koşullara dayanıklı, yüksek performanslı yapılar üretilmekte ve bu da mühendislik açısından sürdürülebilir üretim tekniklerine ışık tutmaktadır. Özellikle düşük sıcaklık ve basınçta çevre dostu yollarla sentezlenen biyomalzemeler malzeme bilimi açısından yeni fırsatlar sunmaktadır. Son yıllarda biyomimetik yaklaşımlar, katmanlı üretim teknolojileri (3D baskı), nanoteknoloji, kompozit malzeme mühendisliği ve mekanik tasarım gibi alanlarla bütünleşerek daha karmaşık ve işlevsel çözümlerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Biyolojik yapıların mühendislik sistemlerine entegrasyonu yalnızca malzeme özelliklerinin geliştirilmesiyle sınırlı kalmayıp aynı zamanda enerji verimliliği, çevresel etki ve üretim süreçlerinin optimizasyonu gibi çok yönlü kazanımlarda sağlamaktadır (Buehler 2008). Bu kitap bölümü, biyomimetik yaklaşımın yapısal malzemeler özelinde mühendislikteki rolünü ele alacak, doğadaki seçkin yapıların nasıl modellenip sentezlenebileceğini ve bu yapıların modern mühendislik uygulamalarındaki yerini inceleyecektir. Ayrıca biyomimetik sistemlerin üretiminde karşılaşılan temel zorluklar ve gelecekteki araştırma perspektifleri de değerlendirilecektir.

2. Biyomimetik Kavramı ve Temel Prensipler

Biyomimetik, doğada gözlemlenen yapı, işlev ve süreçlerin bilimsel olarak incelenerek mühendislik, tasarım ve teknoloji alanlarında uygulanmasını hedefleyen disiplinler arası bir yaklaşımdır. Yunanca *bios* (yaşam) ve *mimesis* (taklit) kelimelerinden türeyen biyomimetik, canlı organizmaların evrimsel süreçler boyunca geliştirdiği yüksek verimli çözümleri mühendisliğe uyarlamayı amaçlamaktadır (Benyus 1997; Vin-

cent et al. 2006). Bu yaklaşım, yalnızca doğadaki formların kopyalanmasından ibaret olmayıp aynı zamanda doğadaki işlevsel stratejilerin üretim mekanizmalarının ve sistem bütünlüklerinin anlaşılmasını ve yeniden yorumlanmasını da içermektedir (Bhushan 2009). Doğa; sınırlı kaynaklarla, düşük enerjiyle ve minimum atıkla işlevsel yapılar üretme konusunda olağanüstü bir başarıya sahiptir. Örneğin, örümcek ağı hem hafif hem de çelikten daha dayanıklı liflere sahiptir; lotusun yaprakları suyu itici yüzeyiyle kendi kendini temizleyebilir; kemik ve deniz kabukları, yüksek dayanım ve kendini yenileme kapasitesine sahip biyokompozit karaktere sahip bazı örneklerdendir (Barthlott and Neinhuis 1997; Fratzl and Weinkamer 2007). Bu ve benzeri doğal sistemlerin mühendislik problemlerine ilham kaynağı olması biyomimetik yaklaşımın temelini oluşturmaktadır.

Biyomimetik yaklaşım üç temel prensibe dayanır: biçimsel taklit (form mimicry), işlevsel taklit (function mimicry) ve süreçsel taklit (process mimicry). Biçimsel taklit, doğadaki yapıların geometrik özelliklerinin modellenmesini ifade ederken; işlevsel taklit, bu yapıların sahip olduğu mekanik, termal veya optik işlevlerin mühendislik sistemlerine uyarlanmasını içermektedir. Süreçsel taklit ise doğadaki üretim mekanizmalarının, örneğin düşük sıcaklıkta sentezleme veya kendini yenileme gibi süreçlerin mühendislik uygulamalarında yeniden yapılandırılmasını kapsamaktadır (Bar-Cohen 2005; Gebeshuber et al. 2009). Bu bağlamda biyomimetik, yalnızca yeni malzeme ve yapıların geliştirilmesiyle sınırlı kalmayıp sürdürülebilirlik, enerji verimliliği, çevresel uyumluluk gibi günümüz mühendisliğinin temel sorunlarına da çözüm üretmektedir (Pawlyn 2019). Biyomimetik düşünce, tasarım süreçlerinde yenilikçiliği teşvik ederken aynı zamanda doğayla daha uyumlu teknolojilerin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

3. Doğadaki Öne Çıkan Yapısal Malzemeler ve Özellikleri

Doğadaki birçok yapısal malzeme türü, yalnızca kimyasal bileşimleriyle değil aynı zamanda çok ölçekli (nano, mikro, makro) ve hiyerarşik mimarileriyle mühendislik uygulamaları için eşsiz örnekler sunabilmektedir. Bu yapısal malzemeler genellikle bir arada bulunması zor olan sertlik, esneklik, hafiflik ve kırılma tokluğu gibi özellikleri uyumlu biçimde bir araya getirebilir (Fratzl and Weinkamer 2007). Şekil 1'de biyomimetik ile ilgili farklı tasarımlara ait bir görsel verilmiştir.

Sedef, midye ve istiridye gibi yumuşakçaların kabuklarında bulunan, tuğla-harç benzeri mikroyapıya sahip biyolojik bir kompozittir. Yaklaşık %95 aragonit (CaCO_3) ve %5 organik matriksten oluşan bu yapı, yüksek kırılma tokluğu sayesinde ilham verici bir doğa örneğidir (Jackson et al. 1988). Bu yapı, sertlik ve sünekliğin bir arada bulunmasına olanak tanımaktadır.

Örümcek ağı ipeği, çelikten daha yüksek özgül mukavemete ve olağanüstü elastikiyete sahiptir. Bu özellik, protein bazlı yapıların kontrollü bir biçimde hizalanması ve kristal-amorf bölgelerin optimum dağılımından kaynaklanır (Meyers et al. 2008).

Köpek balığı derisi, mikroskobik plakoid pullardan oluşur. Bu yapılar, yüzeydeki akış direncini azaltarak yüzeyde türbülansı minimize eder. Bu prensip, özellikle yüzücü mayoları ve deniz taşıtlarının kaplamalarında uygulanmıştır (Meyers et al. 2008).

Lotus yaprağı, süperhidrofobik özelliğiyle bilinmektedir. Mikronano ölçekli yüzey pürüzlülüğü sayesinde su damlaları yaprağın yüzeyinden kolayca kayabilmektedir. Bu “lotus etkisi”, kendi kendini temizleyen boya, cam ve tekstil ürünlerinin geliştirilmesine öncülük etmiştir (Wegst et al. 2015).

Bouligand yapısı, helezonik lif mimarisiyle karakterize edilir. Bu yapı, örneğin karides pençelerinde ve böcek kabuklarında görülür. Liflerin her katmanında belirli bir açıyla döndürülmesiyle çatlakların yön değiştirmesi sağlanır ve bu sayede enerji yayılımı artırılır. Bu mekanizma darbe dayanımını ciddi şekilde yükseltir (Meyers et al. 2008).

Kertenkele ayakları, özellikle gecko türlerinde mikroskobik kıllar ile kaplıdır. Bu yapılar, van der Waals kuvvetleri sayesinde düz yüzeylere güçlü şekilde tutunmayı sağlamaktadır. Bu prensip, yapışkan yüzeyli robotik eller ve tırmanabilen robotlar için ilham kaynağı olmuştur (Autumn et al. 2002).

Salvinia etkisi, salvinia molesta bitkisinin su altında dahi kuru kalabilen yüzeyiyle bilinmektedir. Yüzeydeki tüy benzeri yapılarda sıkışan hava kabarcıkları suyun temasını engellemektedir. Bu özellik, gemi gövdelerinde sürtünme azaltıcı ve antifouling kaplamalar için potansiyel taşımaktadır (Wegst et al. 2015; Sun et al. 2025).

Balık pulları, özellikle arapaima gigas gibi türlerde görüldüğü üzere birbirinin üzerine binen sert ve esnek katmanlardan oluşur. Bu yapı hem esneklik sağlar hem de darbelere karşı yüksek direnç sunmaktadır. Günümüzde esnek zırh sistemleri bu prensipten esinlenilerek geliştirilmektedir (Connors et al. 2019).

Bal peteği yapısı, arılar tarafından inşa edilen altıgen geometriye sahip doğal bir düzendir. Malzeme tüketimini minimumda tutarken maksimum hacimsel verim ve yük taşıma kapasitesi sağlar. Bu yapı, havacılık ve otomotiv sektörlerinde hafif ve dayanıklı panellerin tasarımında sıklıkla kullanılmaktadır (Wegst et al. 2015; Duran et al. 2024; Duran and Çiçek 2025; Shi et al. 2025).

Kaplumbağa kabuğu, dışta sert ve rijit katmanlar ile içte esnek doku yapısının birleşiminden oluşur. Bu yapı, darbe enerjisini dağıtarak canlıyı korumaktadır. Bu çok katmanlı yapı, travmaya dirençli zırh sistemlerinde model olarak alınmaktadır (Meyers et al. 2008).



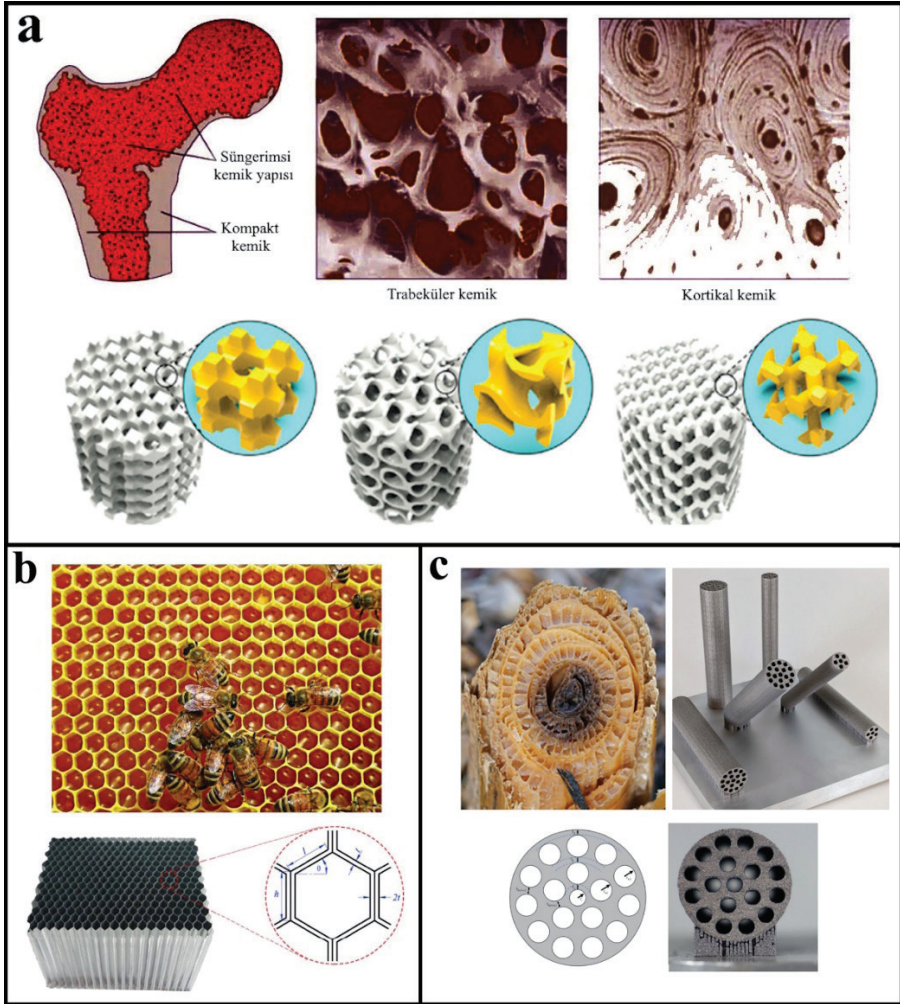
Şekil 1. 3D baskının biyomimetik ile bütünleştirilmesi ve 3D baskı teknolojisinin kategorileri (Yang et al. 2018).

Bu örnekler, doğanın yalnızca ilham verici değil aynı zamanda mühendislik problemlerine doğrudan çözüm sunabilecek yapılar sunduğunu göstermektedir. Günümüzde bu yapıların çoğu 3D baskı, freeze-casting, lif yönlendirme gibi ileri üretim teknikleriyle sentetik olarak taklit edilebilmektedir.

4. Biyomimetik Malzemelerin Üretim Stratejileri

Biyomimetik malzemelerin üretim stratejileri, doğadaki karmaşık yapıların mühendislik sistemlerine aktarılmasını hedefler. Bu süreç, sadece bu yapıların analizini değil, aynı zamanda uygun üretim yöntemleriyle yeniden inşasını da içerir. Biyomimetik üretim yöntemleri, doğadaki

yapıların geometrisini ve oluşum süreçlerini taklit ederek mühendislikte yeniden inşa edilmesini sağlar. Bu üretim yöntemleri genel olarak iki temel sınıfa ayrılır: yukarıdan aşağıya (top-down) ve aşağıdan yukarıya (bottom-up) yaklaşımlar (Yaraghi and Kisailus 2018). Top-down yöntemlerde, doğadaki mimari parçalanarak alt bileşenleri üzerinden yapay yapı kurulmaya çalışılır. Örneğin, dondurarak yönlendirme (freeze-casting) yöntemi, su veya çözücü bazlı süspansiyonların kontrollü biçimde dondurulması ve ardından buzlu uzaklaştırma yoluyla poroz yapıların elde edilmesini sağlar. Bu yöntemle sedef, kemik ve tahta gibi doğal yapıların taklidi yapılabilir (Munch et al. 2008; Li et al. 2024). Bottom-up yöntemlerde ise, doğadaki gibi yapı taşları moleküler düzeyden itibaren bir araya getirilerek nihai yapı oluşturulur. Kendiliğinden montaj (self-assembly) bu yaklaşımın bir örneğidir. Su bazlı ortamlarda belirli iyonik, hidrofobik ya da elektrostatik kuvvetlerle moleküllerin kendiliğinden organize olması sağlanarak çok fonksiyonlu yapılar üretilebilir. DNA origami, protein bazlı yüzeyler ve mikro kapsüller bu teknikle sentezlenebilir (Podsiadlo et al. 2007). Katmanlı üretim teknolojileri, biyomimetik yapılara en yakın geometrilerin üretimini sağlayan yenilikçi yöntemlerden biridir. Özellikle çok ölçekli yapılar, bal peteği örgüleri, bouligand spiralleri gibi kompleks mimariler 3D yazıcılarla üretilebilmektedir (Yan et al. 2021). Bu yöntem, biyomimetik tasarımlar için özelleştirilebilirlik sağlamaktadır. Manyetik alan destekli döküm (MASC), seramik veya mineral parçacıkların manyetik alan altında yönlendirilerek döküm sırasında istenen yapının oluşturulmasını sağlar. Bu teknikle dış minesini taklidi yapılarda olduğu gibi yüksek yönlendirme hassasiyetine sahip kompozit yapılar üretilebilir (Le Ferrand et al. 2015). Kesme kuvveti ile yönlendirme (shear-induced alignment), katmanlı üretim sırasında ekstrüzyonla oluşan kesme kuvvetlerinin mikro ve nano parçacıkların belirli yönde hizalanmasına neden olmasını ifade etmektedir. Özellikle karbon fiber, grafen ve seramik bazlı benzeri takviye parçacıkları bu yöntemle baskı sırasında hizalanarak anizotropik mekanik özelliklere sahip kompozitlerin üretimini mümkün kılabilir (Yaraghi and Kisailus 2018). Electrospinning, nanofiber üretimi için kullanılan bir tekniktir ve örümcek ipeği gibi ince, uzun ve hizalanmış fiber yapıların elde edilmesine olanak tanımaktadır. Bu teknikle lif yönelimi kontrol edilebilir ve biyomimetik lifli dokular sentezlenebilir. Damar taklit eden kanallar, kas lifleri veya doku iskeleleri bu yöntemle üretilebilmektedir (Visser et al. 2022). Şekil 2’de farklı biyomimetik tasarımların görseli sunulmuştur.



Şekil 2. Çalışmalarda yapılan farklı biyomimetik örnekler (du Plessis et al. 2022; Lu et al. 2023; Röver et al. 2024)

Bu bağlamda, biyomimetik üretim stratejileri; doğadaki yapıların ve süreçlerin mühendislik sistemlerine uyarlanmasını mümkün kılarak, yenilikçi malzemelerin ve yapıların geliştirilmesine zemin hazırlar. Bu stratejiler, yalnızca doğal organizasyonların geometrik özelliklerini değil, aynı zamanda oluşum süreçlerini de taklit etme potansiyeline sahiptir.

5. Biyomimetik Tasarımın Zorlukları ve Sınırlamaları

Biyomimetik tasarım, doğadaki karmaşık ve yüksek performanslı yapıların mühendislik sistemlerine aktarılması sürecinde önemli avantajlar sağlasa da çeşitli zorluklar ve sınırlamalarla karşılaşılmaktadır. Bu

zorlukların başında ölçeklenebilirlik ve üretim maliyetleri gelmektedir. Doğadan esinlenen yapılar genellikle nano ve mikro ölçekte çok karmaşık mimarilere sahiptir. Bu yapıların laboratuvar ortamında veya küçük ölçeklerde başarılı şekilde üretilmesi mümkün olsa da endüstriyel ölçekte seri üretime geçirilmesi hem teknik hem de ekonomik açıdan zorluklar içermektedir (Bhushan 2009). Özellikle çok katmanlı ve çok malzemeli biyomimetik yapıların büyük boyutlarda üretimi mevcut üretim teknolojilerinin sınırlarını zorlamakta ve maliyetleri artırmaktadır (Deville 2008).

Bir diğer önemli sınırlama ise biyolojik yapıların karmaşıklığının tam anlamıyla taklit edilmesinin güç olmasıdır. Doğadaki organizmalar milyonlarca yıl süren evrim süreçleri sonucunda optimize olmuş, çok işlevli ve dinamik yapılara sahiptir. Bu yapıların sadece geometrik formlarının değil aynı zamanda mekanik, kimyasal ve biyolojik fonksiyonlarının bütüncül şekilde yeniden imalatı büyük bir mühendislik problemidir. Özellikle mekanik dayanım, esneklik ve biyoyumluluk gibi çoklu özelliklerin bir arada sağlanması malzeme bilimi ve üretim tekniklerinde ciddi yenilikler gerektirmektedir (Tang et al. 2003).

Ayrıca, biyomimetik tasarım sürecinde malzeme özelliklerinin çok yönlü entegrasyonu zorunludur. Doğal yapılar genellikle sert ve esnek malzemelerin hassas kombinasyonlarından oluşur. Örneğin kemik hem sert mineral fazı hem de esnek organik matrisi içermektedir. Bu tür karma malzemelerin sentezlenmesi ve arayüzlerin güvenilir şekilde oluşturulması biyomimetik üretim yöntemlerinin başarısını doğrudan etkilemektedir (Whitesides and Grzybowski 2002). Üretim sürecinde malzeme fazlarının uyumu ve uzun vadeli performansı sağlamak için ileri seviye karakterizasyon ve optimizasyon yöntemleri gereklidir (Miriyeve et al. 2017). Dolayısıyla, biyomimetik tasarım alanında ilerleme sağlamak için hem üretim teknolojilerinin geliştirilmesi hem de disiplinler arası çalışmaların artırılması gerekmektedir. Bu sayede doğanın karmaşık yapılarını daha etkin ve ekonomik şekilde taklit etmek mümkün olacaktır.

6. Gelecek Perspektifleri ve Araştırma Yönelimleri

Biyomimetik malzeme ve tasarım alanında geleceğe yönelik araştırmalar özellikle yapay zeka (YZ) ve hesaplamalı modelleme tekniklerinin entegrasyonu ile şekillenmektedir. YZ, karmaşık biyolojik yapıların modellenmesi ve optimize edilmesinde güçlü bir araç olarak öne çıkmakta, biyomimetik tasarım süreçlerinin hızlanmasını ve doğruluk oranının artmasını sağlamaktadır (Miriyeve et al. 2017). Hesaplamalı modelleme sayesinde, doğadaki çok ölçekli ve çok fonksiyonlu yapıların simülasyonu mümkün olmakta ve bu da üretim stratejilerinin daha etkin biçimde

planlanmasına olanak tanımaktadır (Bhushan 2009).

Sürdürülebilirlik, biyomimetik araştırmaların bir diğer önemli yönüdür. Doğadan ilham alan malzemeler genellikle çevre dostu, enerji verimli ve biyobozunur özelliklere sahiptir. Gelecekte biyomimetik çözümler, sürdürülebilir malzemelerin geliştirilmesi ve endüstriyel uygulamalarda yaygınlaşması için kritik bir rol üstlenecektir (Deville 2008). Bu bağlamda, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen biyopolimerler ve geri dönüştürülebilir kompozitler gibi malzemelerin kullanımı araştırılmaktadır. Ayrıca biyomimetik alanındaki ilerlemeler, disiplinler arası iş birliklerinin yoğunlaşmasına bağlıdır. Malzeme bilimi, biyoloji, bilgisayar mühendisliği, kimya ve makina mühendisliği gibi farklı disiplinlerin ortak çalışması doğadaki karmaşık-kompleks sistemlerin taklidinde yenilikçi ve bütüncül yaklaşımlar sunmaktadır (Whitesides and Grzybowski 2002). Bu tür iş birlikleri yeni üretim yöntemlerinin geliştirilmesi ve biyomimetik malzemelerin gerçek dünyadaki uygulamalarının artırılması açısından büyük önem taşımaktadır.

Biyomimetik malzemelerin ve üretim stratejilerinin gelişimi mühendislikte doğadan ilham alan yenilikçi çözümler sunarak hem performans hem de sürdürülebilirlik açısından önemli katkılar sağlamaktadır. Ancak bu alanda karşılaşılan zorlukların üstesinden gelmek için yapay zeka ve hesaplamalı modelleme gibi ileri teknolojilerin entegrasyonu büyük potansiyel taşımaktadır. Sürdürülebilir malzemeler ve çevre dostu üretim tekniklerinin geliştirilmesi biyomimetik tasarımın gelecekteki temel hedeflerinden biri olacaktır. Disiplinler arası iş birliklerinin artırılması ise bu hedeflere ulaşmada kritik bir rol oynayacaktır. Sonuç olarak biyomimetik araştırmaların multidisipliner ve yenilikçi yaklaşımlarla ilerlemesi, malzeme bilimi ve mühendisliğin sınırlarını genişleterek daha etkin ve çevre dostu çözümler geliştirilmesini mümkün kılacaktır.

Kaynakça

- Autumn, K., Sitti, M., Liang, Y. A., Peattie, A. M., Hansen, W. R., Sponberg, S., Kenny, T. W., Fearing, R., Israelachvili, J. N. and Full, R. J. 2002. Evidence for van der Waals adhesion in gecko setae. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(19), 12252–12256.
- Bar-Cohen, Y. 2005. *Biomimetics: biologically inspired technologies*. CRC press.
- Barthlott, W. and Neinhuis, C. 1997. Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces. *Planta*, 202(1), 1–8.
- Benyus, J. M. 1997. *Biomimicry: Innovation inspired by nature* (Vol. 688136915). Morrow New York.
- Bhushan, B. 2009. Biomimetics: Lessons from Nature - an overview. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 367(1893), 1445–1486.
- Buehler, M. J. 2008. Nanomechanics of collagen fibrils under varying cross-link densities: Atomistic and continuum studies. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 1(1), 59–67.
- Connors, M., Yang, T., Hosny, A., Deng, Z., Yazdandoost, F., Massaadi, H., Earnisse, D., Mirzaeifar, R., Dean, M. N., Weaver, J. C., Ortiz, C. and Li, L. 2019. Bioinspired design of flexible armor based on chiton scales. *Nature Communications*, 10(1), 5413.
- Deville, S. 2008. Freeze-casting of porous ceramics: a review of current achievements and issues. *Advanced Engineering Materials*, 10(3), 155–169.
- du Plessis, A., Razavi, N., Benedetti, M., Murchio, S., Leary, M., Watson, M., Bhate, D. and Berto, F. 2022. Properties and applications of additively manufactured metallic cellular materials: A review. *Progress in Materials Science*, 125, 100918.
- Duran, S. and Çiçek, H. 2025. Production of honeycomb-patterned hybrid Ti₂AlN/TiNi films and examination of Mechanical, Tribological, Adhesion and Fatigue properties. *Surfaces and Interfaces*, 56, 105549.
- Duran, S., Çiçek, H., Korkmaz, İ. H. and Efeoğlu, İ. 2024. Application of honeycomb pattern to Ti₂AlN MAX phase films by plasma etching. *Applied Physics A*, 130(5), 272.
- Fratzl, P. and Weinkamer, R. 2007. Nature's hierarchical materials. *Progress in materials Science*, 52(8), 1263–1334.
- Gebeshuber, I. C., Gruber, P. and Drack, M. 2009. A gaze into the crystal ball: biomimetics in the year 2059. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 223(12), 2899–2918.
- Jackson, A. P., Vincent, J. F. V and Turner, R. M. 1988. The mechanical design of nacre. *Proceedings of the Royal society of London. Series B. Biological sciences*, 234(1277), 415–440.
- Le Ferrand, H., Bouville, F., Niebel, T. P. and Studart, A. R. 2015. Magnetically assisted slip casting of bioinspired heterogeneous composites. *Nature*

- materials, 14(11), 1172–1179.
- Li, M., Dai, X., Wang, M. and Bai, H. 2024. Bioinspired Macroporous Materials of MXene Nanosheets: Ice-Templated Assembly and Multifunctional Applications. *Small Methods*, 8(4), 1–12.
- Lu, Q., Diao, J., Wang, Y., Feng, J., Zeng, F., Yang, Y., Kuang, Y., Zhao, N. and Wang, Y. 2023. 3D printed pore morphology mediates bone marrow stem cell behaviors via RhoA/ROCK2 signaling pathway for accelerating bone regeneration. *Bioactive Materials*, 26, 413–424.
- Meyers, M. A., Chen, P.-Y., Lin, A. Y.-M. and Seki, Y. 2008. Biological materials: Structure and mechanical properties. *Progress in Materials Science*, 53(1), 1–206.
- Miriyev, A., Stack, K. and Lipson, H. 2017. Soft material for soft actuators. *Nature communications*, 8(1), 596.
- Munch, E., Launey, M. E., Alsem, D. H., Saiz, E., Tomsia, A. P. and Ritchie, R. O. 2008. Tough, bio-inspired hybrid materials. *Science*, 322(5907), 1516–1520.
- Pawlyn, M. 2019. *Biomimicry in architecture*. Riba Publishing.
- Podsiadlo, P., Kaushik, A. K., Arruda, E. M., Waas, A. M., Shim, B. S., Xu, J., Nandivada, H., Pumplun, B. G., Lahann, J., Ramamoorthy, A. and Kotov, N. A. 2007. Ultrastrong and Stiff Layered Polymer Nanocomposites. *Science*, 318(5847), 80–83.
- Röver, T., Fuchs, C., Asami, K. and Emmelmann, C. 2024. Dimensioning of Biomimetic Beams under Bending for Additively Manufactured Structural Components. *Biomimetics*.
- Shi, S., Han, H., Yang, B., Zhou, X., Chen, B. and Sun, Z. 2025. Compression performance of a bio-inspired locally densified aluminum honeycomb structure. *Thin-Walled Structures*, 209, 112927.
- Sun, H., Zhu, Y. and Bing, W. 2025. Research on underwater air layer retention and antifouling ability of *Salvinia*-inspired biomimetic materials. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 253, 114728.
- Tang, Z., Kotov, N. A., Magonov, S. and Ozturk, B. 2003. Nanostructured artificial nacre. *Nature materials*, 2(6), 413–418.
- Vincent, J. F. V., Bogatyreva, O. A., Bogatyrev, N. R., Bowyer, A. and Pahl, A.-K. 2006. Biomimetics: its practice and theory. *Journal of the Royal Society Interface*, 3(9), 471–482.
- Visser, D., Bakhshi, H., Rogg, K., Fuhrmann, E., Wieland, F., Schenke-Layland, K., Meyer, W. and Hartmann, H. 2022. Green Chemistry for Biomimetic Materials: Synthesis and Electrospinning of High-Molecular-Weight Polycarbonate-Based Nonisocyanate Polyurethanes. *ACS Omega*, 7(44), 39772–39781.
- Wegst, U. G. K., Bai, H., Saiz, E., Tomsia, A. P. and Ritchie, R. O. 2015. Bioinspired structural materials. *Nature materials*, 14(1), 23–36.
- Whitesides, G. M. and Grzybowski, B. 2002. Self-assembly at all scales. *Science*, 295(5564), 2418–2421.

- Yan, X., Bethers, B., Chen, H., Xiao, S., Lin, S., Tran, B., Jiang, L. and Yang, Y. 2021. Recent Advancements in Biomimetic 3D Printing Materials With Enhanced Mechanical Properties. *Frontiers in Materials*, Volume 8-. <https://www.frontiersin.org/journals/materials/articles/10.3389/fmats.2021.518886> from retrieved.
- Yang, Y., Song, X., Li, X., Chen, Z., Zhou, C., Zhou, Q. and Chen, Y. 2018. Recent Progress in Biomimetic Additive Manufacturing Technology: From Materials to Functional Structures. *Advanced Materials*, 30(36), 1706539.
- Yaraghi, N. A. and Kisailus, D. 2018. Biomimetic Structural Materials: Inspiration from Design and Assembly. *Annual Review of Physical Chemistry*, 69, 23–57.

Bölüm 4

ORTOPEDİK İMPLANTLAR İÇİN MALZEME PERFORMANSININ SİSTEMATİK DEĞERLENDİRMESİ

Cihan YAYLACI¹

¹ Öğretim Görevlisi Doktor Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Havza Meslek Yüksekokulu
Orcid No: 0000-0002-5510-3686

GİRİŞ

Ortopedik cerrahide kullanılan biyomalzeme seçimi, yalnızca mekanik yeterlilikle değil, aynı zamanda malzemenin biyolojik ortamla etkileşimiyle de şekillenen çok boyutlu bir karardır. Özellikle Ti-6Al-4V gibi titanyum alaşımları, yük taşıyan implant uygulamalarında “altın standart” olarak değerlendirilmekte olup, bu üstünlüklerini sadece mekanik dayanımlarıyla değil, aynı zamanda fizyolojik koşullarda kararlı kalan pasif oksit yüzey katmanlarıyla da pekiştirmektedir. Bu derleme, titanyum alaşımları, polietetereterketon (PEEK), ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) ve 316L paslanmaz çelik gibi yaygın implant malzemelerinin, insan vücudunun karmaşık biyomekanik ve biyokimyasal ortamındaki davranışlarını sistematik olarak incelemektedir.

2000–2024 yılları arasında yayımlanmış klinik çalışmalar ve laboratuvar temelli araştırmalar ışığında, söz konusu malzemeler; korozyon direnci, kimyasal stabilite ve biyouyumluluk yönünden karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Titanyum alaşımları, yüksek korozyon direnci ve osseointegrasyon potansiyeliyle öne çıkmakla birlikte, alüminyum ve vanadyum iyonlarının salınımı biyolojik açıdan halen sorgulanmaktadır. PEEK ve UHMWPE gibi yüksek performanslı polimerler, esneklik ve aşınma direnci bakımından avantaj sağlasa da, uzun dönemli oksidatif bozunma riskleri nedeniyle dikkatle izlenmektedir. 316L paslanmaz çelik ise ekonomikliğı nedeniyle tercih edilse de, biyouyumluluk ve korozyon direnci açısından görece sınırlı bir performans sergilemektedir.

Güncel veriler göstermektedir ki, yalnızca malzemenin temel fiziko-kimyasal özellikleri değil; aynı zamanda yüzey mühendisliği teknikleri ve hibrit yapılandırmalar da implant performansını doğrudan etkilemektedir. Özellikle bağışıklık yanıtının yönetimi ve konak doku ile fonksiyonel bütünleşme açısından geliştirilen yüzey modifikasyonları, geleneksel malzeme sınırlarını aşma potansiyeline sahiptir. Dolayısıyla implant başarımı, tek bir “üstün” malzeme seçimine indirgenemez; uygunluk, spesifik klinik bağlamın anatomik, biyomekanik ve hasta temelli gereksinimleri doğrultusunda belirlenmelidir.

Her yıl, dünyanın dört bir yanında milyonlarca insan, kazalar, hastalıklar ve askeri yaralanmaları nedeniyle oluşan kemik kırıkları ve hasarlarından mustariptir. Bazen tedavilerde kırık veya hasarlı kemiklerin değiştirilmesi, profesyonel bir uzman tarafından ameliyat gerektirir. Bazı ortopedik implantlar, yani bacaklar, dizler, kalçalar, ayak bilekleri veya eklem protezleri kalıcıdır ve uzun süre boyunca arızalanmadan işlevlerini yerine getirmeleri gerekir.

Biyomalzemeler günümüzde çok önemlidir. Son birkaç on yılda tıp ve malzeme teknolojisindeki atılımlar, her türlü kullanım için tasarlanmış bir sürü yeni biyomalzemeye yol açtı (Park, 2012). Uzmanlar, 2030 yılına kadar kalça ve diz protezi ameliyatlarında büyük bir sıçrama olacağını; kalçalar için %137 ve dizler için 2005 rakamlarına kıyasla tam %601 artış olacağını öngörmektedir (S. Kurtz, Ong, Lau, Mowat, & Halpern, 2007). Daha fazla insanın daha iyi implantlara ihtiyaç duymasıyla, kullandığımız malzemelerin ve prosedürlerin kalitesini artırmak için gerçek bir baskı yaratmaktadır (Kaur & Singh, 2019).

İnsan vücudundaki uzun vadeli ortopedik implant malzemeleri dört temel gereksinimi karşılamalıdır (Abd-elrhman, Gepreel, Abdel-Moniem, & Kobayashi, 2016; Geetha, Singh, Asokamani, & Gogia, 2009). Bunlar mekanik özellikler, biyouyumluluk, osseointegrasyon ve korozyondur. Bu malzemelerinin seçiminde birincil endişe biyouyumluluktur. Çünkü bu ekipmanlar bozulmadan uzun süreler boyunca fizyolojik ortama dayanmalıdır (Geetha et al., 2009). Ayrıca, mukavemet, esneklik ve yorulma direnci gibi mekanik özellikler protez cihazının dayanıklılığını sağlamak için çok önemlidir (Narushima & Niinomi, 2019).

Ortopedik implantlar metal, biyoseramik, biyopolimer veya kompozit biyomalzemelerden yapılabilir (Ejnisman, Gobbato, de França Camargo, & Zancul, 2021). Bu implantların ciddi mekanik strese dayanması gerektiğinden, cerrahlar hastalara sağlam destek sağlamak, daha çabuk hareket etmelerini sağlamak ve komplikasyonları uzak tutmak için genellikle metal olanları tercih ederler (Attarilar et al., 2020). Günümüzde yaygın kullanılan ana malzemeler 316L paslanmaz çelik, kobalt-krom (Co-Cr) alaşımları ve Ti-6Al-4V gibi titanyum bazlı alaşımlardır (Abd-Elaziem, Darwish, Hamada, & Daoush, 2024). Metal implantlar kırıkları onarmak, omurga füzyonu, eklem değiştirme veya tümörlerden kaynaklanan kemik kusurlarını kapatmak gibi şeyler için oldukça yaygındır, ancak bunları yapmanın eski usul yolları, her hastanın ihtiyaçlarına göre uyarlamaya gelince genellikle yetersiz kalmaktadır (Chen, Li, Zhang, Wu, & Liu, 2020; Velásquez-García & Kornbluth, 2021). Ancak titanyum alaşımları iyi bir mukavemet ve ağırlık oranına sahiptirler. Paslanmaz çelik veya Co-Cr alaşımlarından çok daha iyi korozyona direnç gösterirler.

Yüksek performanslı bir polimer olan polietereeterketon (PEEK), etkiileyici mekanik mukavemeti, biyouyumluluğu ve sitotoksitesizliği sayesinde Ti-6Al-4V gibi titanyum alaşımlarına umut verici bir alternatiftir (Das, Medeo, Sapkal, Anukula, & Ravindran, 2025). PEEK, nörofasiyal ve kraniyofasiyal rekonstrüktif cerrahilerin yanı sıra kraniyoplastide de yaygın olarak kullanılır (Lommen et al., 2022). Toksik olmayan, yüksek performanslı bir termoplastik olan PEEK, termoformlama yoluyla tek-

rar tekrar sterilize edilebilir ve şekillendirilebilir; bu da onu tıbbi uygulamalar için tercih edilen bir malzeme haline getirir (Mbogori, Vaish, Vaishya, Haleem, & Javaid, 2022). Özellikle PEEK, yüksek termal kararlılık, tokluk, sertlik, sürünme direnci, kolay işlenebilirlik, kendi kendini yağlama ve aşınma direnci sunar (Ma et al., 2021). Mekanik özellikleri, karbon fiber (CF), cam fiber (GF) veya baryum sülfat ($BaSO_4$) gibi malzemeler eklenerek belirli ihtiyaçlara göre uyarlanabilir (Sobieraj, Kurtz, & Rimnac, 2009). Biyolojik avantajları sayesinde, uygun maliyetli, kişiselleştirilmiş ve gelişmiş tasarım olanakları sunan 3 boyutlu yazdırılmış implantlar için PEEK kullanımına olan ilgi artmaktadır (Haleem & Javaid, 2019). Ancak PEEK'in sınırlı mekanik mukavemet ve işleme zorlukları gibi bazı dezavantajları vardır. Bunlar, gelişmiş kompozitler oluşturmak için karbon fiber, biyoaktif cam (BG) veya hidroksiapatit (HA) gibi malzemelerle harmanlanarak ele alınabilir (Ma et al., 2021). Diğer sorunlar arasında PEEK biyomalzemelerinin yüksek hidrofobik yüzeyi, kimyasal ve biyolojik ataletidir (Nieminen et al., 2008). Bu durum genellikle zayıf osseointegrasyona ve implantın sınırlı ilk fiksasyonuna ve uzun vadeli stabilitesine neden olur. Çünkü konak kemik dokusuyla kemiksel bağ oluşturamaz (Devine et al., 2013; J. H. Lee et al., 2013; Walsh, Bertollo, Christou, Schaffner, & Mobbs, 2015). Biyoinert yapısı ve hidrofilik yüzeyi ayrıca protein emilimini ve hücre yapışmasını engeller (Noiset, Schneider, & Marchand-Brynaert, 1999). PEEK implantlarının hücre bağlanmasını, osteogenik işlevini ve hatta enfeksiyon direncini iyileştirmek klinik gelişmeler için çok önemlidir. UHMWPE, Ziegler-Natta işlemi kullanılarak çeşitli küçük moleküller tarafından oluşturulan etilenin (C_2H_4) kovalent olarak bağlanmış bir homopolimeridir (S. M. Kurtz, 2009). Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE), son derece yüksek moleküler ağırlığı nedeniyle enjeksiyon kalıplama veya ekstrüzyon gibi geleneksel yöntemlerle işlenmesi zor bir malzemedir (Patil, Njuguna, & Kandasubramanian, 2020).

Bu çalışma, yaygın ortopedik implantların kimyasal özelliklerini, korozyon direncini ve biyouyumluluğunu değerlendirmek için mevcut araştırmalardan elde edilen içgörülerini derler. Bu faktörlerin implantların performansını ve uzun vadeli güvenilirliğini nasıl etkilediğini araştırır.

MALZEMELER VE YÖNTEMLER

Çalışma Seçim Kriterleri

Bu çalışmada, 2000'den 2024'e kadar olan hakemli makaleleri, klinik deneyleri ve laboratuvar deneylerini ele alındı. Titanyum alaşımları, polimerler (PEEK, UHMWPE) ve protezlerde kullanılan 316L paslanmaz çelik gibi materyallere odaklanıldı. Kimyasal ve mekanik özelliklerini,

korozyona ve aşınmaya karşı nasıl dayandıklarını ve vücut dostu olduklarını derinlemesine inceleyerek, bunları kafa kafaya karşılaştırarak anlayışı artırmayı amaçlıyor.

Veri Toplama ve Analizi

Verileri sistematik olarak toplamak için PubMed, Scopus, Web of Science ve ScienceDirect gibi önemli veri tabanları tarandı. Her çalışma, element yapısı, oksidasyon direnci ve korozyon oranları hakkında ayrıntıları çıkarmak için ayrı ayrı seçildi.

SONUÇLAR

Kimyasal Özellikler ve Biyouyumluluk

Titanyum Alaşımları: Titanyum için en önemli alaşım elementleri alüminyum (Al), vanadyum (V), niyobyum (Nb), molibden (Mo), zirkonyum (Zr) ve tantal (Ta)'dır. Vanadyumun vücut üzerinde hem olumlu hem de olumsuz etkileri olabilir. Vanadyum, titanyum bazlı alaşımlarda en sık kullanılan alaşım elementlerinden biridir. Vanadyumun toksik etkileri, Ti-6Al-4V kullanımıyla ilgili endişelere neden olmaktadır (Moretti et al., 2012). Vanadyumun daha biyouyumlu bir elementle değiştirilmesi yönünde girişimlerde bulunmaktadır. Alüminyumun insan vücudunda çok az işlevi vardır. Yüksek dozlarda toksiktir. Alüminyum birçok hastalıkla ilişkilendirilebilir. Belirli koşullar altında nörotoksositeye neden olabilir. Fareler üzerinde yapılan bir araştırmada alüminyuma maruz kalmanın motor fonksiyonlarında bozulmaya yol açabileceği ortaya çıktı (Shaw & Petrik, 2009). Sıçanlara yerleştirilen titanyum, niyobyum, tantal, hafniyum ve renyum, hem yumuşak hem de sert dokularda yüksek biyouyumluluk ve osteogenez gösterdi (Matsuno, Yokoyama, Watari, Uo, & Kawasaki, 2001). Alaşım elementlerinin seçimi ve işlem türü titanyum alaşımlarının mikro yapı evriminde ve mekanik özelliklerinde önemli bir rol oynamaktadır.

Titanyum alaşımları, klinik çalışmalarda ortalama biyouyumluluk oranı %95–98 biyouyumluluk sergilemiştir. Yüzeyde oluşan titanyum oksit tabakası, korozyonu engeller ve mükemmel doku entegrasyonunu teşvik eder. Çalışmalar, %90'dan fazla hastanın klinik ortamda olumlu doku yanıtları gösterdiğini ve düşük reddetme oranlarına sahip olduğunu ortaya koymuştur (S. M. Kurtz, 2012, 2019; Moharil, Reche, Durge, & Moharil, 2023). Ti biyouyumluluğu; eylemsizliği, mukavemet-ağırlık oranı, esnekliği, osseointegrasyona yardımcı olan protein adsorpsiyonu, aktif osseointegrasyonu, düşük iyon salınımı, immünojenite eksikliği ve manyetik olmayan doğasından kaynaklanır (Abd-Elaziem et al., 2024). Bu nitelikler, Ti alaşımlarını implantlar için paslanmaz çelik ve Cr-Co alaşımlarına

tercih edilir hale getirir. Manyetik rezonans görüntüleme (MRI) taramaları gibi tanısal görüntüleme teknikleriyle uyumluluk sağlar.

Polimerler (PEEK ve UHMWPE): PEEK, 90 MPa ile 140 MPa arasında çekme dayanımına sahip olup, geleneksel polietilene göre aşınma direnci 10 kat daha yüksek mekanik performans sergilemiştir. UHMWPE, kalça ve diz protezlerinde yaygın olarak kullanılır ve 0.05–0.1 mm/yıl arasında aşınma oranlarına sahip olup, mekanik stres nedeniyle yılda %2–3 oranında bozulma göstermektedir. Bu bozulma, eklem protezlerinde inflamatuvar yanıtlarla ilişkili olup, zamanla cihaz başarısızlıklarına neden olmaktadır (Baena, Wu, & Peng, 2015; Edidin, Rimnac, Goldberg, & Kurtz, 2001; Sawae, 2009).

PEEK'in biyoyumluluğu %93, UHMWPE'in biyoyumluluğu ise %85 olarak bildirilmiştir ve her iki malzeme de klinik çalışmalarda düşük reddetme oranları göstermektedir (Baena et al., 2015; Shahemi, Liza, Abbas, & Merican, 2018). PEEK, titanyum ve bakırın tavşanlarda yapılan deneyde kemik bağışıklık tepkisini karşılaştırıldığında, tüm materyallerin bağışıklık aktivasyonu ve kemik rezorpsiyon inhibisyonu gösterdiğini buldular (Trindade et al., 2018).

PEEK kendi başına yeterli biyoaktif özelliğe sahip değildir, ancak bu durum, PEEK kompozitlerini daha yararlanabilir hale getirmek için HA, biyoaktif cam (BG) ve Trikalsiyum Fosfat (TCP) gibi geleneksel olarak bilinen biyoaktif malzemelerin eklenmesiyle iyileştirilir (Ma et al., 2021).

Yüksek moleküler ağırlığı nedeniyle UHMWPE sıfır erime akış indeksine sahiptir ve bu da işlenmesini zorlaştırır. İşlenebilirliğini iyileştirmek için plastikleştirici olarak diğer polimerler eklenebilir. Klinik performansını artırmanın yaygın yolları arasında takviye, kaplama, yüzey modifikasyonu ve oksidantlar eklemek yer alır (Subhedar, Padmanabhan, Agrawal, & Singh, 2023).

Paslanmaz Çelik (316L): Paslanmaz çelik (316L), biyoyumluluk oranları %80–85 arasında değişmiştir, çalışmalar nikel içeriği nedeniyle alerjik reaksiyonları göstermektedir. Paslanmaz çelik için korozyon oranları, klorür zengini ortamlarda 0.05–0.1 µm/yıl arasında bildirilmiş ve bu da yerel korozyon ve çukurlaşmaya yol açarak zamanla mekanik arızaya neden olabilir (Kiradzhyska & Mantcheva, 2019; Nuss & von Rechenberg, 2008). Paslanmaz çeliğin yaklaşık 600–800 MPa arasında yüksek çekme dayanımı olmasına rağmen, korozyon direnci titanyum alaşımlarına kıyasla daha zayıftır.

KOROZYON DİRENCİ

Titanyum Alaşımları: Titanyum alaşımları, klinik ve deneysel çalışmalarda $0.05 \mu\text{m/yıl}$ 'den düşük korozyon oranları göstererek üstün korozyon direncine sahip olmuştur. Kararlı bir oksit tabakasının oluşması, malzemenin vücudun asidik ortamında bozulmasına karşı büyük ölçüde direncini artırmaktadır (Kuphasuk et al., 2001; Wang et al., 2015). Aynı test koşulları altında iki fazlı mikro yapıya sahip Ti-6Al-7Nb alaşımlarının aşınma direncinin Ti-6Al-4V'den daha düşük olduğu bulunmuştur (Fellah et al., 2014).

Polimerler (PEEK ve UHMWPE): Geleneksel korozyona duyarlı olmasalar da PEEK ve UHMWPE mekanik stres altında kimyasal bozulmaya yatkındır. Özellikle UHMWPE, aşınma nedeniyle bozulmaya uğrayarak aşınma artışı oluşturur ve bu da eklem protezlerinde inflamasyon ve osteoliz gelişmesine yol açar (Bhoi et al., 2022; Li et al., 2025). UHMWPE'ye E Vitamini ekleyerek ve malzemeyi radyasyonla çapraz bağlayarak, aşınma özelliklerini artırabilir ve osteoliz ve aseptik gevşemeyi durdurabilirsiniz (Hemmilä et al., 2021; Saravanan, Melk, & Emami, 2021). PEEK malzemeleri, özellikle CF takviyeli PEEK kompozit malzemeler, mükemmel sürtünme ve aşınma özelliklerine sahiptir (W. T. Lee et al., 2012).

Paslanmaz Çelik: Paslanmaz çelik, korozyon direnci açısından orta seviyede performans gösterdi, korozyon oranları $0.05-0.1 \mu\text{m/yıl}$ arasında değişti. Paslanmaz çelik, daha az talepkar korozyon direnci gerektiren uygulamalar için uygun olsa da, klorür iyonlarına maruz kaldığında insan vücudundaki korozif ortamlarda performansı zayıflar (Haynes, Crotti, & Haywood, 2000; Reclaru, Ziegenhagen, Eschler, Blatter, & Lemaître, 2006).

MEKANİK ÖZELLİKLER

Titanyum Alaşımları: Yaygın olarak kullanılan bir titanyum alaşımı olan Ti-6Al-4V, 900 ila 1.100 MPa arasında değişen çekme dayanımı ve 700 MPa'ya kadar yorulma dayanımı göstererek, tekrarlanan strese karşı sağlam bir direnç ve sürdürülebilir mekanik bütünlük göstermektedir (Niinomi, 1998; Tong, Bowen, Persson, & Plummer, 2017). Ti-6Al-4V'nin çekme mukavemeti, çözelti işlemi ile $\sim 1100 \text{ MPa}$ 'ya çıkarılabilir (Donachie, 2000). Ancak, polimerlere kıyasla daha az esnektir, bu da onları yüksek esneklik gerektiren uygulamalarda daha az uygun hale getirmektedir.

Polimerler (PEEK ve UHMWPE): PEEK, kortikal kemiğe (7-30 GPa) ve süngerimsi kemiğe (0,01-10 GPa) daha yakın olan 3,6 GPa'lık bir elastisite modülüne sahiptir, bu da implantasyon bölgesinin etrafındaki kemikte stres kalkanının etkisini azaltır (Kizuki, Matsushita, & Kokubo,

2015; S. M. Kurtz & Devine, 2007).PEEK modülü, farklı lif uzunlukları ve yönelimlerine sahip karbon fiber takviyeli (CFR) kompozitler hazırlanarak kortikal kemiğe daha yakın bir şekilde değiştirilebilir (S. M. Kurtz, 2012). UHMWPE, daha zayıf olsa da (30 MPa çekme dayanımı) aşınma direncinde mükemmeldir, aşınma oranları genellikle 0.05 mm/yıl'den daha düşüktür. UHMWPE'nin en büyük zorluğu, aşınma nedeniyle bozulmaya yatkın olması ve zamanla eklem protezlerinde cihaz başarısızlıklarına yol açmasıdır (Haleem & Javaid, 2019; Liu, He, Gao, & Jiao, 2021).

Paslanmaz Çelik: 316L gibi paslanmaz çelik alaşımları, 600 ila 800 MPa arasında değişen çekme dayanımları sergiler. Ancak yorulma dirençleri titanyum alaşımlarından daha düşüktür ve bu da onları yük taşıyan protez uygulamalarında uzun vadeli kullanım için daha az uygun hale getirir. (Niinomi, 2007; Okazaki, 2012; Wheeler & James, 1971).

TARTIŞMA

Bu analiz, protez uygulamalarında titanyum alaşımlarının, polimerlerin (PEEK, UHMWPE) ve paslanmaz çeliğin belirgin avantajlarını ve sınırlamalarını vurgulamaktadır. Titanyum alaşımları, özellikle Ti-6Al-4V, üstün mekanik mukavemet ve korozyon direnci sunar ve bunları eklem protezleri ve diş implantları gibi yük taşıyan uygulamalar için ideal hale getirir. Yüksek maliyetlerine ve sınırlı esnekliklerine rağmen, yüksek mukavemet ve uzun vadeli stabilite gerektiren kritik uygulamalar için tercih edilen seçenek olmaya devam etmektedirler.

PEEK gibi polimerler, mukavemet, esneklik ve aşınma direncinin mükemmel bir dengesini sağlayarak bunları omurga implantları ve eklem protezleri için uygun hale getirir. Ancak, özellikle UHMWPE için mekanik stres altında uzun vadeli bozulma, aşınma nedeniyle iltihaplanmaya ve cihaz arızasına yol açabileceğinden endişe verici olmaya devam etmektedir. Polimer kompozitler ve biyoaktif kaplamalardaki gelişmeler, bu malzemelerin performansını ve uzun ömürlülüğünü artırabilir.

Paslanmaz çelik, daha uygun maliyetli ve mekanik olarak sağlam olmasına rağmen, korozyon direnci ve biyouyumluluk açısından sınırlamalara sahiptir. Bununla birlikte, yüzey işlemleri ve kaplamalar bu özellikleri iyileştirerek, daha zorlu protez uygulamalarında kullanılmasını sağlayabilir.

SONUÇ

Sonuç olarak, protez malzemesinin seçimi cihazın belirli uygulamasına ve performans gereksinimlerine bağlıdır. Titanyum alaşımları, özellikle Ti-6Al-4V, mekanik mukavemet, korozyon direnci ve biyouyumluluğun mükemmel bir kombinasyonunu sunarak onları en iyi seçim haline getirir. PEEK ve UHMWPE gibi polimerler, aşınma direnci ve esneklikleri nedeniyle umut vericidir, ancak uzun vadeli bozulmaları hala bir zorluktur. Paslanmaz çelik daha bütçe dostu ve sağlamdır, ancak korozyona direnme veya vücutla iyi geçinme konusunda o kadar iyi değildir, bu da onu ağır yükler altında dayanması gereken implantlar için daha az ideal hale getirir. Hibrit malzemeler ve yüzey işlemleri üzerine devam eden araştırmalar, farklı ihtiyaçlar için protezleri nasıl seçtiğimiz ve tasarladığımız konusunda sınırları zorlamaya devam edecektir.

KAYNAKLAR

- Abd-Elaziem, W., Darwish, M. A., Hamada, A., & Daoush, W. M. (2024). Titanium-Based alloys and composites for orthopedic implants Applications: A comprehensive review. *Materials & Design*, 112850.
- Abd-elrhman, Y., Gepreel, M. A.-H., Abdel-Moniem, A., & Kobayashi, S. (2016). Compatibility assessment of new V-free low-cost Ti-4.7 Mo-4.5 Fe alloy for some biomedical applications. *Materials & Design*, 97, 445-453.
- Attarilar, S., Ebrahimi, M., Djavanroodi, F., Fu, Y., Wang, L., & Yang, J. (2020). 3D printing technologies in metallic implants: a thematic review on the techniques and procedures. *International Journal of Bioprinting*, 7(1), 306.
- Baena, J. C., Wu, J., & Peng, Z. (2015). Wear performance of UHMWPE and reinforced UHMWPE composites in arthroplasty applications: a review. *Lubricants*, 3(2), 413-436.
- Bhoi, S., Prasad, A., Kumar, A., Sarkar, R. B., Mahto, B., Meena, C. S., & Pandey, C. (2022). Experimental study to evaluate the wear performance of UHMWPE and XLPE material for orthopedics application. *Bioengineering*, 9(11), 676.
- Chen, Y., Li, W., Zhang, C., Wu, Z., & Liu, J. (2020). Recent developments of biomaterials for additive manufacturing of bone scaffolds. *Advanced Healthcare Materials*, 9(23), 2000724.
- Das, S., Medeo, T., Sapkal, P. S., Anukula, H., & Ravindran, P. (2025). A comparative study on the radiological properties of PEEK and titanium alloy implant materials with extended HU CT imaging. *Radiation Physics and Chemistry*, 229, 112515.
- Devine, D. M., Hahn, J., Richards, R. G., Gruner, H., Wieling, R., & Pearce, S. G. (2013). Coating of carbon fiber-reinforced polyetheretherketone implants with titanium to improve bone apposition. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 101(4), 591-598.
- Donachie, M. J. (2000). *Titanium: a technical guide*: ASM international.
- Edidin, A., Rimnac, C., Goldberg, V., & Kurtz, S. (2001). Mechanical behavior, wear surface morphology, and clinical performance of UHMWPE acetabular components after 10 years of implantation. *Wear*, 250(1-12), 152-158.
- Ejnisman, L., Gobatto, B., de França Camargo, A. F., & Zancul, E. (2021). Three-dimensional printing in orthopedics: from the basics to surgical applications. *Current Reviews in Musculoskeletal Medicine*, 14, 1-8.
- Fellah, M., Labaiz, M., Assala, O., Dekhil, L., Taleb, A., Rezag, H., & Iost, A. (2014). Tribological behavior of Ti-6Al-4V and Ti-6Al-7Nb alloys for total hip prosthesis. *Advances in Tribology*, 2014(1), 451387.
- Geetha, M., Singh, A. K., Asokamani, R., & Gogia, A. K. (2009). Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants—a review. *Progress in materials science*, 54(3), 397-425.

- Haleem, A., & Javaid, M. (2019). Polyether ether ketone (PEEK) and its 3D printed implants applications in medical field: An overview. *Clinical Epidemiology and Global Health*, 7(4), 571-577.
- Haynes, D. R., Crotti, T. N., & Haywood, M. R. (2000). Corrosion of and changes in biological effects of cobalt chrome alloy and 316L stainless steel prosthetic particles with age. *Journal of Biomedical Materials Research: An Official Journal of The Society for Biomaterials and The Japanese Society for Biomaterials*, 49(2), 167-175.
- Hemmilä, M., Laaksonen, I., Matilainen, M., Eskelinen, A., Haapakoski, J., Puhto, A.-P., . . . Mäkelä, K. T. (2021). Implant survival of 2,723 vitamin E-infused highly crosslinked polyethylene liners in total hip arthroplasty: data from the Finnish Arthroplasty Register. *Acta orthopaedica*, 92(3), 316-322.
- Kaur, M., & Singh, K. (2019). Review on titanium and titanium based alloys as biomaterials for orthopaedic applications. *Materials Science and Engineering: C*, 102, 844-862.
- Kiradzhyska, D. D., & Mantcheva, R. D. (2019). Overview of biocompatible materials and their use in medicine. *Folia Med (Plovdiv)*, 61(1), 34-40.
- Kizuki, T., Matsushita, T., & Kokubo, T. (2015). Apatite-forming PEEK with TiO₂ surface layer coating. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 26, 1-9.
- Kuphasuk, C., Oshida, Y., Andres, C. J., Hovijitra, S. T., Barco, M. T., & Brown, D. T. (2001). Electrochemical corrosion of titanium and titanium-based alloys. *The Journal of prosthetic dentistry*, 85(2), 195-202.
- Kurtz, S., Ong, K., Lau, E., Mowat, F., & Halpern, M. (2007). Projections of primary and revision hip and knee arthroplasty in the United States from 2005 to 2030. *Jbjs*, 89(4), 780-785.
- Kurtz, S. M. (2009). A primer on UHMWPE. In *UHMWPE biomaterials handbook* (pp. 1-6): Elsevier.
- Kurtz, S. M. (2012). An overview of PEEK biomaterials. *PEEK biomaterials handbook*, 1-7.
- Kurtz, S. M. (2019). *PEEK biomaterials handbook*: William Andrew.
- Kurtz, S. M., & Devine, J. N. (2007). PEEK biomaterials in trauma, orthopedic, and spinal implants. *Biomaterials*, 28(32), 4845-4869.
- Lee, J. H., Jang, H. L., Lee, K. M., Baek, H.-R., Jin, K., Hong, K. S., . . . Lee, H.-K. (2013). In vitro and in vivo evaluation of the bioactivity of hydroxyapatite-coated polyetheretherketone biocomposites created by cold spray technology. *Acta biomaterialia*, 9(4), 6177-6187.
- Lee, W. T., Koak, J. Y., Lim, Y. J., Kim, S. K., Kwon, H. B., & Kim, M. J. (2012). Stress shielding and fatigue limits of poly-ether-ether-ketone dental implants. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 100(4), 1044-1052.
- Li, S., Tang, L., Pu, J., Wang, J., Fan, C., Li, Z., & Song, J. (2025). Continuous Hyaluronic Acid Supply by a UHMWPE/PEEK Interlocking Scaffold for Metatarsophalangeal Joint Prosthesis Lubricating Applications. *ACS*

Applied Materials & Interfaces.

- Liu, F., He, Y., Gao, Z., & Jiao, D. (2021). Enhanced computational modelling of UHMWPE wear in total hip joint replacements: The role of frictional work and contact pressure. *Wear*, 482, 203985.
- Lommen, J., Schorn, L., Sproll, C., Haussmann, J., Kübler, N. R., Budach, W., . . . Tamaskovics, B. (2022). Reduction of CT artifacts using polyetheretherketone (PEEK), polyetherketoneketone (PEKK), polyphenylsulfone (PPSU), and polyethylene (PE) reconstruction plates in oral oncology. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 80(7), 1272-1283.
- Ma, H., Suonan, A., Zhou, J., Yuan, Q., Liu, L., Zhao, X., . . . Zhang, Y.-g. (2021). PEEK (Polyether-ether-ketone) and its composite materials in orthopedic implantation. *Arabian Journal of Chemistry*, 14(3), 102977.
- Matsuno, H., Yokoyama, A., Watari, F., Uo, M., & Kawasaki, T. (2001). Biocompatibility and osteogenesis of refractory metal implants, titanium, hafnium, niobium, tantalum and rhenium. *Biomaterials*, 22(11), 1253-1262.
- Mbogori, M., Vaish, A., Vaishya, R., Haleem, A., & Javaid, M. (2022). Poly-Ether-Ether-Ketone (PEEK) in orthopaedic practice-A current concept review. *Journal of Orthopaedic Reports*, 1(1), 3-7.
- Moharil, S., Reche, A., Durge, K., & Moharil, S. S. (2023). Polyetheretherketone (PEEK) as a biomaterial: an overview. *Cureus*, 15(8).
- Moretti, B., Pesce, V., Maccagnano, G., Vicenti, G., Lovreglio, P., Soleo, L., & Apostoli, P. (2012). Peripheral neuropathy after hip replacement failure: is vanadium the culprit? *The Lancet*, 379(9826), 1676.
- Narushima, T., & Niinomi, M. (2019). Metals for Biomedical Devices. In: Woodhead Publishing Series in Biomaterials.
- Nieminen, T., Kallela, I., Wuolijoki, E., Kainulainen, H., Hiidenheimo, I., & Rantala, I. (2008). Amorphous and crystalline polyetheretherketone: Mechanical properties and tissue reactions during a 3-year follow-up. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 84(2), 377-383.
- Niinomi, M. (1998). Mechanical properties of biomedical titanium alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 243(1-2), 231-236.
- Niinomi, M. (2007). Fatigue characteristics of metallic biomaterials. *International Journal of Fatigue*, 29(6), 992-1000.
- Noiset, O., Schneider, Y.-J., & Marchand-Brynaert, J. (1999). Fibronectin adsorption or/and covalent grafting on chemically modified PEEK film surfaces. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, 10(6), 657-677.
- Nuss, K. M., & von Rechenberg, B. (2008). Biocompatibility issues with modern implants in bone-a review for clinical orthopedics. *The open orthopaedics journal*, 2, 66.
- Okazaki, Y. (2012). Comparison of fatigue properties and fatigue crack growth rates of various implantable metals. *Materials*, 5(12), 2981-3005.
- Park, J. B. (2012). *Biomaterials science and engineering*: Springer Science & Business Media.

- Patil, N. A., Njuguna, J., & Kandasubramanian, B. (2020). UHMWPE for biomedical applications: Performance and functionalization. *European polymer journal*, 125, 109529.
- Reclaru, L., Ziegenhagen, R., Eschler, P.-Y., Blatter, A., & Lemaitre, J. (2006). Comparative corrosion study of “Ni-free” austenitic stainless steels in view of medical applications. *Acta biomaterialia*, 2(4), 433-444.
- Saravanan, P., Melk, L., & Emami, N. (2021). Mechanical and thermal properties of vitamin E-doped UHMWPE reinforced with hydroxyapatite. *Tribology-Materials, Surfaces & Interfaces*, 15(3), 193-200.
- Sawae, Y. (2009). Effects of physiological factors on wear of UHMWPE for joint prosthesis. In *Polymer Tribology* (pp. 195-226): World Scientific.
- Shahemi, N., Liza, S., Abbas, A., & Merican, A. (2018). Long-term wear failure analysis of uhmwpe acetabular cup in total hip replacement. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 87, 1-9.
- Shaw, C. A., & Petrik, M. S. (2009). Aluminum hydroxide injections lead to motor deficits and motor neuron degeneration. *Journal of inorganic biochemistry*, 103(11), 1555-1562.
- Sobieraj, M. C., Kurtz, S. M., & Rimnac, C. M. (2009). Notch sensitivity of PEEK in monotonic tension. *Biomaterials*, 30(33), 6485-6494.
- Subhedar, P., Padmanabhan, D., Agrawal, R., & Singh, G. (2023). A comprehensive review summarising the reinforcement of UHMWPE composite scaffolds as an artificial implant biomaterials. *Materials Today: Proceedings*.
- Tong, J., Bowen, C., Persson, J., & Plummer, A. (2017). Mechanical properties of titanium-based Ti-6Al-4V alloys manufactured by powder bed additive manufacture. *Materials Science and Technology*, 33(2), 138-148.
- Trindade, R., Albrektsson, T., Galli, S., Prgomet, Z., Tengvall, P., & Wennerberg, A. (2018). Bone immune response to materials, part I: Titanium, PEEK and copper in comparison to sham at 10 days in rabbit tibia. *Journal of clinical medicine*, 7(12), 526.
- Velásquez-García, L. F., & Kornbluth, Y. (2021). Biomedical applications of metal 3D printing. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 23(1), 307-338.
- Walsh, W. R., Bertollo, N., Christou, C., Schaffner, D., & Mobbs, R. J. (2015). Plasma-sprayed titanium coating to polyetheretherketone improves the bone-implant interface. *The Spine Journal*, 15(5), 1041-1049.
- Wang, H., Zhang, R., Yuan, Z., Shu, X., Liu, E., & Han, Z. (2015). A comparative study of the corrosion performance of titanium (Ti), titanium nitride (TiN), titanium dioxide (TiO₂) and nitrogen-doped titanium oxides (N-TiO₂), as coatings for biomedical applications. *Ceramics International*, 41(9), 11844-11851.
- Wheeler, K., & James, L. (1971). Fatigue behavior of type 316 stainless steel under simulated body conditions. *Journal of Biomedical Materials Research*, 5(3), 267-281.

Bölüm 5

TAŞ MASTİK ASFALT KAPLAMALARDA FİBER KULLANIMI

Hande VAROL MOROVA¹

¹ Arş. Gör. Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, handevarol@isparta.edu.tr ORCID: 0000-0002-3481-9925

1. GİRİŞ

Bitümlü sıcak karışım (BSK), dayanıklı yol kaplamaları inşa etmek için kullanılan en eski asfalt kaplama türlerinden biridir ve uzun yıllardır dünya genelinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda dünya genelinde büyük ölçekli yol yapım projeleri gerçekleştirilmiş olup, önümüzdeki yıllarda bu projelerin hız kesmeden devam etmesi beklenmektedir. Bu büyük ölçekli yol yapım projeleri, asfalt teknolojisinin sürekli olarak gelişmesini ve daha dayanıklı, uzun ömürlü kaplama türlerinin tercih edilmesini gerektirmektedir. Bu bağlamda, taş mastik asfalt (TMA) önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır (Babalghaith vd. 2022).

TMA, ilk olarak 1960'ların ortalarında Almanya ve İskandinavya'da geliştirilmiş bir tür boşluklu asfalt karışım olup, yüksek dayanıklılığı ve aşınma direnci nedeniyle özellikle ağır trafik yüklerine maruz kalan yollar için ideal bir seçenek haline gelmiştir. 1984 yılında ulusal standartları belirlenen TMA, zamanla Avrupa'nın geneline yayılmış ve birçok ülkede tercih edilen bir kaplama malzemesi olmuştur. TMA'nın en önemli özelliklerinden biri sert, sabit ve düşük izli bir yüzey yapısına sahip olmasıdır. Bu özellikleri sayesinde aşınmaya ve tekerlek izi hasarına karşı direnç gösterirken, aynı zamanda yüksek stabilite sağlayarak uzun ömürlü bir kaplama sunmaktadır. Gürültü seviyesini azaltma yeteneği ile şehir içi ve otoyol uygulamalarında sürüş konforunu artırırken, kayma direncini yükselterek güvenliği de artırmaktadır. Ayrıca, yağmurlu hava koşullarında su sıçratmayı minimize ederek sürücülerin görüş mesafesini iyileştirmektedir (Babalghaith vd. 2022).

2. TAŞ MASTİK ASFALT (TMA) KAPLAMALAR

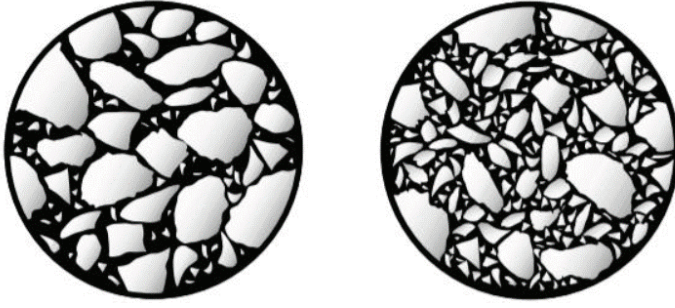
Bilim insanları, artan trafik yoğunluğunun asfalt kaplamalar üzerindeki olumsuz etkilerini en aza indirmek ve kaplamaların daha dayanıklı hale gelmesini sağlamak amacıyla bitümlü karışımların performans özelliklerini geliştirmek için yenilikçi yöntemler ve yapılar geliştirmiştir. Bu kapsamda TMA, yüksek dayanıklılığı ile öne çıkmaktadır. TMA, toplam agregası bileşimi açısından %70-80 oranında iri agregası, %6-7 bağlayıcı, %8-12 dolgu malzemesi ve yaklaşık %0.3-0.5 oranında elyaftan oluşmaktadır. İri agregaların yoğun kullanımı, karışım içinde doğal boşluklar oluştururken, bu boşluklar ince agregası, filler, polimer modifiye bitüm ve selülozik elyaftan oluşan mastik harç ile doldurulmaktadır (Naser vd., 2023). TMA, özellikle çivili lastiklerin neden olduğu tekerlek izlerine karşı dirençli olması nedeniyle birçok ülkede geliştirilmekte ve kullanılmaktadır. Yüksek iri agregası içeriği, dolgu oranı ve bitüm modifikasyonu sayesinde, bu karışımlar hem dayanıklılık hem de tekerlek izi direnci açısından yüksek performans sergilemektedir. Agregası derecelendirmesi, as-

faltın dayanıklılığını artırmak için yeterli esneklik, stabilite, işlenebilirlik ve belirli bir seviyede hava boşluğu sağlamalıdır (Babalghaith vd., 2022).

Türkiye’de TMA yapım çalışmaları 1998 yılında başlamış ve 1999 yılından itibaren yoğun trafik etkilerine karşı aşınma yüzeyi olarak kullanılmaya başlanarak özellikle yüksek performans gerektiren otoyollar, köprüler ve ağır taşıt trafiğine maruz kalan yollar için tercih edilmiştir. Bu süreç, asfalt kaplama teknolojisindeki yenilikleri ve gelişen mühendislik yöntemlerini içeren bir araştırma alanı haline gelmiştir. Günümüzde ise TMA ile ilgili yapım, üretim şartları ve limitleri, 2013 yılında oluşturulan Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ) içerisinde 408. Kısımda yer almaktadır (Aslan, 2018).

Yeni yöntemler ve tasarım detayları, bitümlü karışımların performansını artırmaya yönelik çalışmaların temelini oluşturmaktadır. Bununla birlikte, TMA karışımlarının tasarımı, üretimi ve uygulanması, geleneksel bitüm karışımlarına kıyasla daha yüksek maliyet gerektirmektedir. Bu maliyet artışının temel nedenlerinden biri, bitüm modifikasyonu ve üretim süreçlerinde yüksek sıcaklık gereksinimidir. Ayrıca, karışımın yayılma ve sıkıştırma aşamalarında bazı teknik zorluklarla karşılaşmaktadır. Bu tür asfalt kaplamalarının drenaj etkisini önlemek için selülozik elyaf kullanımı zorunlu hale gelmiş olup, bu da ek maliyet gereksinimi doğurmaktadır. Ancak tüm bu maliyet ve teknik zorluklara rağmen, TMA’nın sunduğu yüksek dayanıklılık, düşük deformasyon oranı ve uzun ömürlü kullanım avantajları, onu asfalt teknolojisinde önemli bir konuma taşımaktadır. Özellikle yüksek performans ve uzun vadeli ekonomik fayda hedefleyen projelerde, TMA’nın kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır (Evirgen vd., 2021).

TMA, iri agregalardan oluşan dayanıklı bir iskelet yapısı ve boşlukları dolduran mastik harcın birleşiminden meydana gelmektedir. Kaba agregalar yüksek dane teması ve iç kenetlenme özelliği sayesinde trafik yüklerini taşıma görevini üstlenirken, mastik harç boşlukları doldurarak yüksek bitüm oranı sayesinde kaplamanın dayanıklılığını artırmaktadır. TMA karışımındaki yüksek bitüm içeriği nedeniyle, bitümün veya bitüm+filler kombinasyonunun karışımından ayrışmasını önlemek amacıyla fiber katkılar eklenmektedir. Bu yapı, asfaltın uzun ömürlü ve aşınmaya karşı dirençli olmasını sağlayarak yüksek performans sunmaktadır (Kaşak, 2007). Şekil 1’de TMA ve BSK’ya ait yüzey görünümleri verilmiştir.



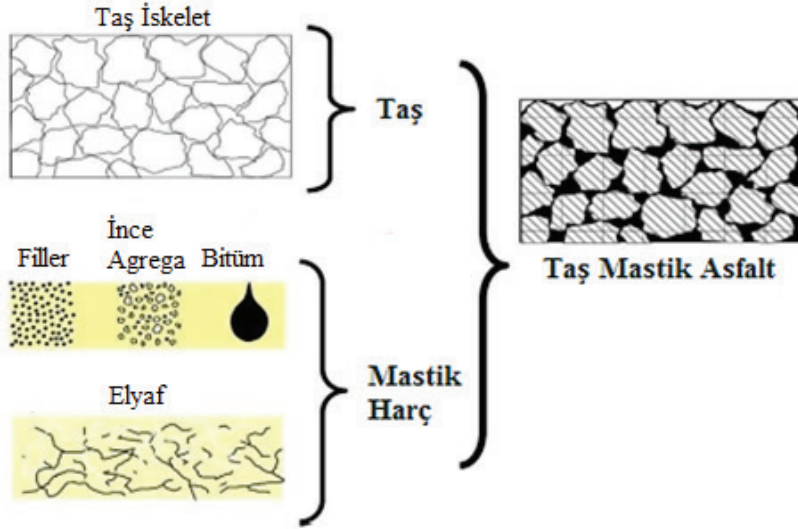
Şekil 1. TMA ve BSK yüzey dokuları (Kırbaş, 1999).

TMA, geleneksel yoğun dereceli asfalta göre birçok avantaja sahiptir. Özellikle yüksek bağlayıcı içeriği ve agrega iskeleti sayesinde, TMA yüzeyleri daha az kalıcı deformasyon ve iz oluşumu göstermektedir. Bu yapı, agregaların birbirine temas etmesini sağlayarak, karışımın sıcaklığa duyarlılığını azaltmakta ve yüksek sıcaklıklarda kalıcı deformasyona karşı direnç sağlamaktadır. Ayrıca, TMA'nın mekanik özellikleri agregadan agregaya temasa dayanır; bu da bağlayıcı varyasyonlarına karşı daha az duyarlılık ve daha istikrarlı performans anlamına gelmektedir. Yüksek bağlayıcı içeriği sayesinde, TMA daha yavaş yaşlanır ve geleneksel karışımlara göre %20'ye kadar daha uzun bir hizmet ömrü sunar. Esnekliği ve yorulmaya karşı direnci, geleneksel karışımlara göre 3-5 kat daha yüksek olup, düşük sıcaklık performansı ve aşınma direnci de üstündür. Pürüzlü yüzeyi sayesinde yüksek kayma direnci sağlar ve sürüş güvenliğini artırır. Geniş uygulama yelpazesi ile farklı iklim ve trafik koşullarına uyum sağlar. Mevcut tesis ve ekipmanlarla üretimi ve sıkıştırılması mümkün olup, uzun vadede ekonomik faydalar sağlar. Tüm bu özellikleriyle TMA, yol yapımında sürdürülebilir ve verimli bir seçenek sunmaktadır (Hainin vd., 2012).

Türkiye'de esnek üstyapılarda son dönemde artan deformasyon ve bozulmaları önlemek amacıyla, aşınma tabakasında kullanılan agregaların gradasyonu daha iri boyutlara çekilmiş ve bu doğrultuda kısa sürede TMA tasarımına geçiş yapılmıştır (Saedi, 2019).

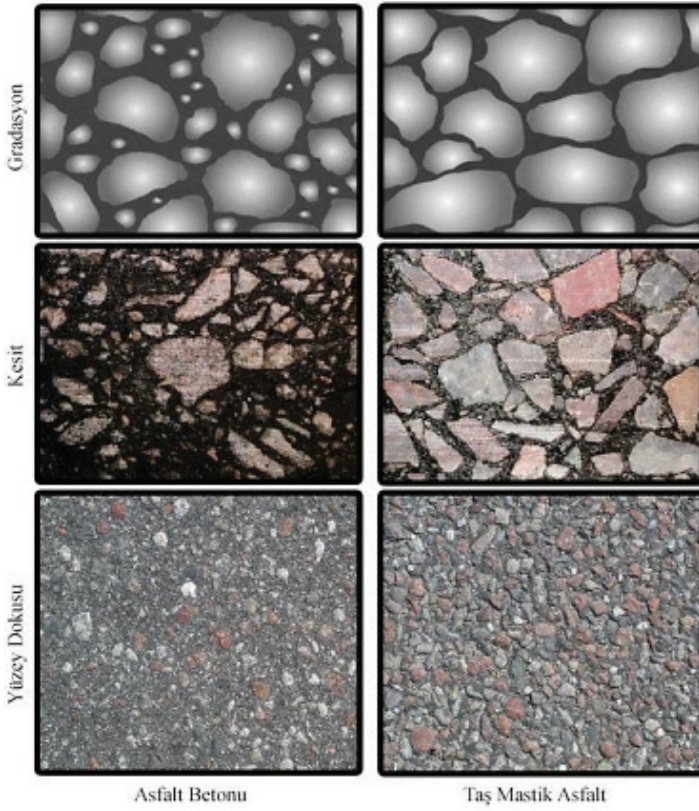
TMA, dolguları dolduran mastik harçlarıyla birleştirilmiş kaba agregadan oluşan bir agrega iskelet yapısından oluşan termal bir karışımdır. Mastik harç ince agrega, dolgu maddeleri, asfalt ve elyaf içermektedir. Bu karışımlarda stabil iri agregalar birbirleriyle temas etmek suretiyle kenetlenerek kullanılırlar. TMA karışımında boşluk miktarının fazla olmasından dolayı gerekli olan bitüm içeriği de fazladır. Yüksek bitüm içeriği TMA karışımlarının stabilitesini ve plastik deformasyona karşı dayanıklı-

lılığı arttırır. Ayrıca bitüm ve bitüm+dolguların karışımından sızmasını önlemek için lif katkıları da kullanılmaktadır (Orhan, 2012). TMA'nın yapısı Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. TMA Yapısı (Kırbaş, 1999).

TMA ile geleneksel asfalt betonu arasındaki yüzey dokusu farkı Şekil 3'te gösterilmiştir (Hughes ve Kandhal, 2002).

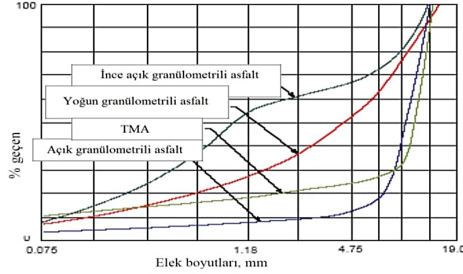


Şekil 3. Asfalt betonu (solda) ve TMA (sağda) yapısal farklılıkları (Temren, 2009).

TMA'da kaba agregalar arasında meydana gelen boşluklar mastik harç denilen ince agregalar, filler, bitüm veya modifiye bitüm ile bitümün akmasını engelleyen fiber veya diğer katkı maddeleri ile doldurulmaktadır. TMA karışımlarında bitüm oranı yüksektir. Karışımda bitüm oranının yüksek olmasının karışım için hem iyi hem kötü etkileri olmaktadır. Bitümün fazlalığı karışımın durabilitesi açısından olumlu iken bitümün süzülmesi bakımından da olumsuz etkisi olmaktadır. Bu kusma problemin önüne geçmek için TMA karışımına ek olarak selülozik fiber (elyaf) ilave edilmektedir (Orhan, 2012).

TMA, agregaların teması ile dayanım ve bağlayıcı harcıyla da durabilitenin sağlanmasına dayalı, sağlam ve stabil bir karışımdır. Asfalt karışımların tipik granülometri eğrileri Şekil 4'te gösterilmiştir.

Taş Mastik Asfalt (SMA: Stone Mastic Asphalt), taş-taşa kontak ile dayanımın ve zengin bağlayıcı harcıyla da durabilitenin sağlanmasına dayalı, sağlam, stabil ve tekerlek izi oturmasına dayanıklı bir karışımdır. Asfalt karışımların tipik granülometri eğrileri ise Şekil 2'de gösterilmektedir [2].



Şekil 2. Asfalt karışımların tipik granülometri eğrileri [2]

Şekil 4. Asfalt karışımları tipik granülometri eğrileri (Temren, 2009).

2.1. Taş Mastik Asfalt Kaplamalarda Kullanılan Malzemeler

TMA üretiminde, kullanılan agregaların ve fillerin kalitesi, nihai ürünün performansını doğrudan etkilemektedir. Kaba agregalar, kırmataş, kırma çakıl veya bunların bileşimlerinden oluşmalı; temiz, sert ve dayanıklı olmalıdır. Aşınma tabakasında kullanılacak kaba agregalar ise, granit, bazalt veya diğer yüksek kaliteli magmatik kayaların kırılmasından elde edilen agregalardan oluşmalıdır. İnce agregalar da sert ve dayanıklı kırmataş, kırma çakıl veya bunların bileşiminden seçilmelidir. Mineral filler olarak taş tozu veya sönmüş kireç kullanılmaktadır. TMA üretiminde polimer modifiye bitüm tercih edilirken, karışımdaki bitümün drenajını önlemek için elyaf katkısı eklenmektedir. Elyaf stabilizatör, selüloz veya mineral elyaf olarak belirtilmiştir (KTŞ, 2013).

TMA karışımlarının yüksek bağlayıcı içeriği ve boşluklu yapısı nedeniyle, üretim, nakliye ve serim aşamalarında bitümün agregalardan süzülmesi olumsuz bir durumdur. Bu süzülme önlemek için selüloz elyaf, mineral elyaf veya polimer katkıları kullanılmaktadır. Özellikle selüloz veya mineral esaslı elyaflar, bitümün agregalardan süzülmesini azaltmada tercih edilmektedir (Özdaş, 2021).

TMA karışımlarda, aşınma tabakasında elyaf oranları genellikle %0.3 ile %1 arasında değişirken, binder tabakasında bu oranlar %0.2 ile %0.8 arasında kullanılmaktadır. KTŞ'de belirtilen selülozik ve mineral fiber özellikleri Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir (KTŞ, 2013).

Tablo 1.Mineral Elyaf Özellikleri (KTŞ, 2013).

Fiber Uzunluğu (maksimum)	6 mm
No.40 (0.425 mm) elekten geçen	%95 (min.)
No.200 (0.075 mm) elekten geçen	%65 (min.)

Tablo 2.Selüloz Elyaf Özellikleri (KTŞ, 2013).

Kül Muhtevası	%18±%5
PH	7.5±%1
Yağ Absorbsiyonu	Elyaf Ağırlığının 5±1 katı
Nem Absorbsiyonu	Ağırlıkça %5

2.2. Taş Mastik Asfalt Tasarım Kriterleri

TMA gradasyonu, mineral agregası ve filler dahil olmak üzere en az dört farklı dane grubunun belirli oranlarda karıştırılmasıyla oluşturulmaktadır. Bitümlü malzemelerle karıştırıldığında, bu agregası karışımı dengeli ve uyumlu bir yapı sergiler. Aşınma tabakası için agregası gradasyonu Tablo 3'e göre, binder tabakası için agregası gradasyonu ise Tablo 4'e uygun olmalıdır (KTŞ, 2013).

Tablo 3.TMA Aşınma Gradasyonu ve Tolerans Sınırları (KTŞ, 2013).

Elek Boyutu		TMA TİP-1		TMA TİP-2	Tolerans Limitleri
		A	B		
İn, No	mm	Geçen %	Geçen %	Geçen %	%
3/4"	19	100	100		
1/2"	12.5	90-100	90-100	100	± 4
3/8"	9.5	50-75	50-67	90-100	± 4
No.4	4.75	25-40	25-35	25-45	± 3
No.10	2.00	20-30	20-30	20-30	± 3
No.40	0.425	12-22	12-22	12-22	± 3
No.80	0.180	9-17	9-17	9-17	± 3
No.200	0.075	8-12	8-12	8-12	± 2

Tablo 4.TMA Binder Gradasyonu ve Tolerans Sınırları (KTŞ, 2013).

Elek Boyutu		TMA Binder	Tolerans Limitleri
İn, No	mm	Geçen %	%
1"	25.0	100	
3/4"	19.0	92-100	±4
1/2"	12.5	73-83	±4
3/8"	9.5	56-66	±4
No.4	4.75	32-42	±3

No.10	2.00	25-30	± 3
No.40	0.425	14-20	± 3
No.80	0.180	9-15	± 3
No.200	0.075	7-11	± 2

TMA karışımı hazırlanırken Marshall numuneleri, her iki yüzeyine 50 darbe uygulanarak hazırlanmalıdır Farklı bir yöntem belirtilmedikçe, karışım tasarımı için Marshall Karışım Tasarım Yöntemi kullanılmalıdır. Karışım dizayn değerleri Tablo 5'te verilen limitlere uygun olmalıdır (KTŞ, 2013).

Tablo 5. TMA Dizayn Kriterleri (KTŞ, 2013).

Özellikler		Şartname Limitleri		Deney Standardı
		TMA Aşınma	TMA Binder	
Briket Yapımında Uygulanacak Darbe Sayısı		50	50	TS EN 12697-30
Hava Boşlukları, (%)		2-4	3-4	TS EN 12697-8
Sıcak İklim Bölgelerinde Hava Boşlukları, (%)		3-4		
Agregalar Arası Boşluk (VMA), (%) min.	TİP -1	16	13	TS EN 12697-8
	TİP -2	17		
Bitümlü bağlayıcı, (%) min.	TİP -1	5.8	5.2	TS EN 12697-1
	TİP -2	6.5		
İndirekt Çekme Mukavemeti (İÇM) Oranı, min. %		80	80	AASHTO T 283
Tekerlek İzinde Oturma (30.000 devirde, 60°C'de), (%) maks.		6	6	TS EN 12697-22
Elyaf Miktarı, %		0.3 - 1.0	0.2 - 0.8	
Schellenberger Bitüm Süzülme Deneyi, (%) maks.		0.3	0.3	TS EN 12697-18
Not: Tabakalar arası yapışma dayanımı TS EN 12697-48'e göre yapılabilir.				

TMA karışım dizaynında hava boşluğu, agregalar arası boşluk, indirekt çekme mukavemeti, tekerlek izinde oturma ve Schellenberg bitüm süzülme deneyi gibi parametreler dikkate alınmaktadır. Her bir kriter için belirlenen limit değerler deney standartlarıyla birlikte verilmiş olup bu kriterler TS EN ve AASHTO standartlarına uygun olarak TMA karışımının kalitesini artırmayı ve dayanımı sağlamayı hedeflemektedir.

3. TAŞ MASTİK KARIŞIMLARDA FİBER KULLANIMI

Fiberlerin birçok tipi asfalt kaplama karışımlarında kullanımı uygundur. Selüloz ve mineral fiberler TMA, açık gradasyonlu ve poroz karışımlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Fiberlerin her türü ve formu asfalt karışımlarda kullanılmaktadır. En yaygın fiberler selüloz, mineral ve polimer fiberlerdir (Aslan, 2020).

Asfaltın genellikle basınçta güçlü çekmede zayıf olduğu saptanmıştır. Çekme mukavemeti yüksek fiber kullanımı bir karışımın çekme mukavemetinin artmasına katkı sağlamaktadır. Teoride güçlü fiberler gerilmeleri üzerine alarak nispeten zayıf asfalt üzerinde ki gerilmeyi azaltır. Gerilmeleri etkili bir şekilde dağıtmak için fiber ve asfalt karışımı arasındaki adezyon iyi olmalıdır. Fiberlerdeki daha büyük yüzey alanı bu adezyona yardım edebilmektedir. Buna ek olarak, gerilim yoğunluğundan kaçınmak amacıyla fiberler karışım içerisinde uniform olarak dağılmış olmalıdır (Aslan, 2020).

TMA karışımlarda bitüm oranı %6-7 civarında olduğundan ve sıcaklığı 160-170°C gibi yüksek sıcaklıklara çıkmasından dolayı agregalar arasında bulunan bitüm akmaya başlamaktadır. Bitümün akması ise asfalt kaplamalarında istenmeyen bir sonuçtur. Bitümün akmasıyla kaplamanın iç dayanımında bir azalma oluşmaktadır. Zamanla bu azalmayla tabakanın yaşlanmaya karşı direncini azaltmaktadır. Bu nedenle bitümün agregadan ayrılarak akmasını engellemek amacıyla TMA kaplamalarında fiber kullanılmaktadır (Hamburg, 1985). Selülozik fiber, pürüzlü ve üç boyutlu yapısı sebebiyle iyi bir asfalt taşıyıcıdır. Ayrıca bitümün viskozitesini arttırdığından, yüksek sıcaklıklarda karışımın deformasyonlara karşı direncini de artırmaktadır.

Asfaltın genellikle basınçta güçlü çekmede zayıf olduğu saptanmıştır. Çekme mukavemeti yüksek fiber kullanımı karışımın çekme mukavemetinin artmasına katkı sağlamaktadır. Teoride güçlü fiberler gerilmeleri üzerine alarak nispeten zayıf asfalt üzerinde ki gerilmeyi azaltmayı amaçlamaktadır. Gerilmeleri etkili bir şekilde dağıtmak için fiber ve asfalt karışımı arasındaki adezyon iyi olmalıdır. Fiberlerdeki daha büyük yüzey alanı bu adezyona yardım edebilmektedir. Buna ek olarak, gerilim yoğunluğundan kaçınmak amacıyla fiberler karışım içerisinde uniform olarak dağılmış olmalıdır (Busching vd., 1970). Uniform olarak dağılmayan fiberler bitümün akmasına sebep olacaktır.

TMA'da yaygın olarak kullanılan geleneksel elyaflar pahalı olması nedeniyle kaplama maliyetlerini arttırmaktadırlar. Yaygın olarak kullanılan çeşitli katkı maddelerinin yerine daha düşük maliyetli elyafların kullanımıyla ilgili literatürde çeşitli çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalar

aşağıda özetlenmektedir (Özdaş, 2021).

Yadykina vd. (2015), poliamid elyafın kimyasal yapısının, organik bağlayıcılarla yüksek düzeyde etkileşime girmesine olanak sağladığını ve bu durumun TMA kalitesi üzerinde olumlu bir etki yarattığını ifade etmiştir.

Aslan (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, kenevir bitkisi-nden elde edilen liflerin TMA karışımlarında kullanımı ile bitümün süzülme performansı incelenmiştir. Karışımlar, %1, %2, %3, %4 ve %5 oranlarında kenevir lifi eklenerek hazırlanmış ve bu numunelere Schellenberger süzülme testi uygulanmıştır. Ayrıca, lif uzunluğunun karışım özelliklerine etkisini değerlendirebilmek amacıyla 2 mm, 3 mm, 6 mm ve 12 mm boyutlarında kesilmiş kenevir lifleri kullanılmıştır. Marshall tasarım yöntemiyle hazırlanan numunelerin Marshall stabilite ve akma değerleri ölçülerek, doğal kenevir lifi içeren karışımlar selülozik fiber içerenlerle karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular, özellikle %1, %2 ve %3 oranlarında doğal kenevir lifinin, süzülme açısından selülozik fibere göre daha yüksek bir performans sergilediğini göstermiştir.

Evirgen vd. (2021), ağır trafik yükleri sonucunda meydana gelen bozulmalar arasında tekerlek izi kaynaklı ondülasyonların en önemli problemlerden biri olduğunu belirtmiş ve bu tür deformasyonlara karşı TMA kaplamaların tercih edildiğini ifade etmiştir. TMA karışımların yüksek agrega kilitlenmesi, güçlü agrega-bitüm etkileşimi ve yüksek bitüm içeriği sayesinde bu tür sorunlara karşı dayanım sağladığını vurgulamışlardır. Uygulamalarda genellikle polimer modifiye bitüm veya asfalt modifikasyonuna tabi tutulmuş selülozik lif katkılarının kullanıldığı belirtilmiştir. Söz konusu çalışmada ise, iki aşamalı bitüm modifikasyonu yerine, cam ve polipropilen elyafların doğrudan kuru karışıma ilave edilmesiyle karışım modifikasyonunun uygulanabilirliği araştırılmıştır. %0.6 ve %0.8 oranlarında cam ve polipropilen elyaf içeren numunelerle yapılan deneylerde; süzülme direnci, esneklik modülü ve suya karşı hassasiyeti temsil eden dolaylı çekme dayanımı değerlerinde iyileşmeler tespit edilmiştir.

Öner ve Özdaş (2022), yaptıkları çalışmada TMA karışımlarının, agregalar arasındaki yüksek boşluk oranı nedeniyle fazla miktarda bağlayıcıya ihtiyaç duyduğunu ve bunun da bitümün agregalardan süzülmesine neden olabileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca, geleneksel mineral ve selülozik elyafların yüksek maliyeti nedeniyle kaplama maliyetlerinin arttığına dikkat çekmişlerdir. Bu doğrultuda, çalışmada selüloz elyaf yerine tekstil fabrikalarında atık olarak ortaya çıkan tekstil atıklarının kullanım potansiyeli değerlendirilmiş; elde edilen bulgular, bu atıkların TMA karışımlarında geleneksel elyaflara ekonomik ve işlevsel bir alternatif olarak

kullanılabileceğini göstermiştir.

Rasekh vd. (2022), çalışmalarında TMA kaplamalarda mineral elyaflar arasında yer alan bazalt elyafın kullanım potansiyelini değerlendirmişlerdir. Farklı boyutlardaki bazalt elyaflar, hem tek başına hem de TMA karışımlarda yaygın olarak kullanılan selülozik elyaflarla birlikte kullanılarak, bitüm süzülme performansı üzerindeki etkileri ile tekerlek izi dayanımındaki değişimler incelenmiştir. Elyafların bitüm tutma kapasitelerini belirlemek amacıyla Schellenberger süzülme deneyleri gerçekleştirilmiş ve tüm numunelerin şartnameye uygun sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Ayrıca, optimum bitüm oranı ile hazırlanan numunelere uygulanan Hamburg Tekerlek İzi deneyi sonucunda, en fazla deformasyonun %0.2 oranında 12 mm uzunluğunda bazalt elyaf içeren karışımlarda; en düşük deformasyonun ise %0.3 oranında 12 mm bazalt elyaf ve %0.2 oranında selüloz elyaf içeren numunelerde meydana geldiği belirlenmiştir. Bu sonuçlar, bazalt ve selülozik elyaf kombinasyonunun tekerlek izi dayanımını artırmada etkili olabileceğini göstermiştir.

Naser vd. (2023), çalışmalarında atık kağıt lifleri ve çimento fırın tozunu (CKD) TMA karışımlarında stabilizatör olarak kullanmayı amaçlamışlardır. Atık kağıt ve CKD, %0.2 ile %1 arasında değişen oranlarla kullanılmıştır. Çalışmanın ilerleyen aşamalarında, hava boşlukları, yoğunluk, Dolaylı Çekme Dayanımı (ITS) ve Marshall Stabilesi gibi parametreler analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, özellikle yoğunluk ve hava boşluklarında iyileşme sağladığını ortaya koymuştur. Ayrıca, Marshall Stabilesinde %33'lük bir artış ve ITS'de %37'lik bir iyileşme gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra, Marshall akma, Çekme Dayanımı Oranı (TSR) ve kayma direncinde de belirgin iyileşmeler kaydedilmiştir. Çalışma, atık kağıdın uygun şekilde işlenip CKD ile kombinlendiğinde, TMA karışımlarında etkili bir şekilde kullanılabileceğini ve bu karışımların üstün hacimsel ve mekanik özellikler sergileyebileceğini göstermektedir.

Rodríguez vd. (2024), Peru tekstil endüstrisinde kalan pamuk liflerini kullanarak üretilen TMA karışımlarının performansını değerlendirmiş ve bu sektörün çevre kirliliği üzerindeki etkilerini ele almışlardır. Çalışmada, %0.3 ticari lif ve %6 asfalt içeren bir referans TMA karışımı hazırlanmıştır. Ardından, bu lif, aynı oranlarda tekstil lifi ile değiştirilmiştir. Performans testleri, ticari lifte %82 olan TSR değerinin, tekstil lifinde %95 olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, tekstil lifi yüksek sıcaklıklarda daha iyi bir dinamik modül performansı sergilemiştir. Çalışmanın sonucunda, atık Peru pamuk liflerinin TMA karışımlarında ticari liflerin yerini etkin bir şekilde alabileceği ve en uygun miktarın %0.2 olduğu ifade edilmiştir.

SONUÇ

TMA, yol kaplamalarında yüksek performansı, dayanıklılığı ve uzun servis ömrü ile öne çıkmakta olup özellikle ağır taşıt trafiğine sahip yollar için tercih sebebidir. TMA, iri agrega ve mastik harçtan oluşmakta olup ince agrega, bitüm ve fiber karışımından oluşan bu mastik harç, TMA'yı diğer kaplama türlerinden ayırmaktadır. Mastik harç yapısında bulunan fiber sayesinde hem stabilizasyon sağlanarak bitümün agregadan akması engellenmekte hem de uzun vadede oluşabilecek hasarlar en aza inmektedir.

TMA kaplamaların en önemli özelliklerinden biri yüksek kayma sürtünme direncine sahip olmalarıdır. Bu özellik sürüş güvenliğini de önemli derecede arttırmaktadır. Yol yüzeyinin pürüzlü yapısı sayesinde araçlar yola daha iyi tutunmakta, kayma riski de büyük ölçüde azalmaktadır. TMA kaplamaların agrega bileşiminden dolayı oluşan mikro ve makro pürüzlülük araç lastikleri ile kaplama arasındaki sürtünmeyi arttırarak yol tutuşunu kuvvetlendirmektedir. Aynı zamanda TMA'nın boşluklu yapısı sayesinde yol yüzeyinde su birikmesi engellenmektedir. Özellikle yoğun yağış alan bölgelerde lastiklerin su üzerinde kayması TMA kaplama tercihi ile büyük ölçüde azaltılmaktadır.

TMA kaplamalar aynı zamanda trafik kaynaklı gürültüyü azaltma özelliğine de sahiptir. Kaplama yapısında bulunan boşluklar sayesinde lastiklerin yol yüzeyine temasıyla oluşan gürültü absorbe edilerek çevresel bir konfor sağlanmaktadır. Geleneksel kaplamalarda gürültü bariyerleri ile çözüm sağlanmakta iken TMA kaplamaların doğal yapısı sayesinde ek maliyet gerektirmeden sorun çözülmektedir. Böylelikle hem ekonomik hem de çevresel bir alternatif olmaktadır.

TMA'nın sunduğu tüm bu avantajlardan maksimum düzeyde faydalanabilmek için, malzeme seçimi titizlikle yapılmalı ve uygulama süreci dikkatli bir şekilde planlanmalıdır. Doğru agrega, bitüm ve fiber seçimi, uygun bir karışım tasarımı kaplama performansında etkin rol oynamaktadır. Ayrıca serim ve sıkıştırma işlemleri de uygun şekilde yürütülmelidir.

TMA, yoğun trafik altında üstün performans göstererek çevresel koşulları gözetken modern bir kaplama türüdür. Gelişen malzeme özellikleri ve yenilikçi üretim yöntemleri ile TMA kaplamaların daha da iyi bir noktaya gelmesi beklenmektedir. TMA kaplamalar sürdürülebilir ve uzun ömürlü yollar için iyi bir alternatif olmaya devam edecektir.

KAYNAKÇA

- Aslan, M. (2018). *Mastik Asfalt Üretiminde Pomza, Perlit ve Ahlat Taşı Agregasının Kullanılabilirliği*, Yüksek Lisans Tezi, Bitlis Eren Üniversitesi ve Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bitlis.
- Aslan, İ. (2020). *Taş Mastik Asfalt Kaplamalarda Doğal Kenevir Lifinin Selülozik Fiber Yerine Kullanılabilirliğinin Araştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi, Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Babalghaith, A. M., Koting, S., Sulong, N. H. R., Khan, M. Z. H., Milad, A., Yusoff, N. I. M., & Mohamed, A. H. B. N. (2022). A systematic review of the utilization of waste materials as aggregate replacement in stone matrix asphalt mixes. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(24), 35557-35582.
- Busching, H.W., Elliott, E.H., Reyneveld, N.G., (1970) "A State-of-the-Art Survey of Reinforced Asphalt Paving," Proceedings of the Annual Meeting of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 39, pp. 766-798.
- Evirgen, B., Cetin, A., Karslıoğlu, A., & Tuncan, A. (2021). An evaluation of the usability of glass and polypropylene fibers in SMA mixtures. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(3), 318-328.
- Hainin, R., Reshi, W. F., & Niroumand, H. (2012). The importance of stone mastic asphalt in construction. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17(49), 56-74.
- Hamburg, A.G., (1985). Long Term Experience with Split Mastic Asphalt in the Federal Republic of Germany, Euro Bitumen Symposium.
- Hughes C.S. ve Kandhal P.S., (2002), Designing and Constructing SMA Mixtures State-of-the-Practice, Florida: Quality Improvement Series 122, 1-43.
- Karayolları Genel Müdürlüğü. "Karayolu Teknik Şartnamesi (KTŞ)". Ankara, 2013
- Kaşak S. (2007). *Taş Mastik Asfalt Karışımında Katkı Maddesi Olarak Fiber Yerine Diatomit'in Uygulanabilirliğinin Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Kırbaş, H., (1999), Asfalt Kaplamalarda Bozulma Sebepleri ve Oluşan Yüzeysel Soyulmalar ile Çatlakların Modern Malzemelerle Onarım Yöntemleri, Kütahya: Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, 3-5.
- Naser, S. S. M., Seyedi, M., & Al-Busaltan, S. (2023). Enhancing Stone Mastic Asphalt through the integration of waste paper and Cement Kiln Dust. *J. Civ. Hydraul. Eng*, 1(1), 23-37.
- Orhan, F. (2012). Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları. *Karayolları Genel Müdürlüğü*. Araştırma Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü Ankara.

- Öner, J., & Özdaş, F. (2022). Taş Mastik Asfalt Karışımlarında Tekstil Atığı Kullanımının Araştırılması. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5(2), 522-533.
- Özdaş, F. (2021). *Tekstil Nihai Atıklarının Asfalt Kaplamalarda Kullanılması*. Yüksek Lisans Tezi, Uşak Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Uşak.
- Rasekh, M. A., Zengin, D., & Haldenbilen, S. (2022). Taş Mastik Asfalt Kaplamalarda Mineral Elyaf Kullanılabilirliğinin Araştırılması (Master's thesis, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Rodríguez, W., Rivera, J., Sevillano, M., & Torres, T. (2024). Performance evaluation of Stone Mastic Asphalt (SMA) mixtures with textile waste fibres. *Construction and Building Materials*, 455, 139125.
- Saedi, S. (2019). Polimerik katkıların (FRP, Viatop premium ve SBS) taş mastik asfalt kaplamaların mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırılması.
- Temren, Z. (2009). Taş Mastik Asfalt Dizaynı, Üretimi ve Uygulamaları. *Türkiye Asfalt Mühendisleri Derneği*, Ankara, 35 s.
- Yadykina, V., Tobolenko, S., Trautvain, A., & Zhukova, A. (2015). The influence of stabilizing additives on physical and mechanical properties of stone mastic asphalt concrete. *Procedia Engineering*, 117, 376-381.

Bölüm 6

MANUEL MONTAJ HATLARININ İŞ BİRLİKÇİ SİSTEMLERE DÖNÜŞTÜRÜLMESİNDE MALİYET OPTİMİZASYONU İÇİN BİR MATEMATİKSEL MODEL ÖNERİSİ

Aslıhan KARAŞ ÇELİK¹, Feriştah ÖZÇELİK²

1 Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği, ORCID: 0000-0002-7317-447X

2 Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği, ORCID: 0000-0003-0329-203X

1. Giriş

Endüstri 4.0'ın etkinliğiyle birlikte robotların üretim sistemlerinde kullanımı artmış, hatasız üretim yapılması ve insan sağlığı açısından risk taşıyan görevlerin otomatikleştirilmesi mümkün hale gelmiştir. Bu avantajlar, özellikle tekrarlı görevlerin yürütüldüğü montaj hatlarında robotların yaygın olarak kullanılmasını teşvik etmiştir. Ancak, makinelerin, insanların sahip olduğu esneklik ve içgüdüden yoksun olması nedeniyle tamamen insansız üretim sistemlerinin yakın gelecekte tam anlamıyla gerçekleştirilmesi mümkün görülmemektedir. Bu noktada, Endüstri 5.0'ın ortaya koyduğu insan-robot iş birliği vizyonunun devreye girmekte ve üretim sistemlerinde insan merkeze alan, insanların ve robotların birlikte çalışabildiği iş birliği yapılar ön plana çıkmaktadır. İnsanın ve makinesin aynı ortamda çalışmasına olanak tanıyan bu yaklaşım, işgören etkililiklerinin daha verimli tasarlanmasını sağlamaktadır. Bu doğrultuda, işçiler, geleneksel robotlar ve iş birliği robotlar (kobotlar) ile donatılmış montaj hatları giderek daha fazla araştırmanın konusu haline gelmiştir.

İnsan-robot iş birliğine dayalı montaj hatlarının modellenmesi, farklı işgören türlerinin aynı sistemlerde görev aldığı yapılan dikkate almayı gerektirmektedir. Son yıllarda, insan-robot iş birliği ile montaj hattı dengeleme (IR-MHD) problemi odaklanan akademik çalışmaların sayısında belirgin bir artış gözlemlenmektedir.

IR-MHD literatüründe maliyet optimizasyonuna yönelik çalışmalar önemli bir yer tutmaktadır. Bu alandaki öncü çalışmalardan birini gerçekleştiren Dalle Mura ve Dini (2019), montaj hattı maliyetini, yüksek teknik becerili işçi sayısını ve enerji yükü faktörünü optimize eden bir genetik algoritma geliştirmiştir. Li vd. (2021), farklı robot türlerinin satın alma maliyetleri dikkate alarak çevrim süresiyle birlikte toplam robot maliyetini eşzamanlı olarak eniştiklenmeyi amaçlamış ve bir matematiksel modele ek olarak bir göçmen kuşlar algoritması önermiştir. Tian vd. (2024a), yarı vasıflı işçilerin ve kobotların birlikte görev aldığı bir senaryoda çevrim süresiyle birlikte kobot maliyetini optimize eden çok amaçlı bir model ve bir evrimsel algoritma geliştirmiştir.

Ergonomik kriterler altında maliyet optimizasyonunu esas alan Weckenborg ve Spengler (2019), çevrim başına düşen maliyeti optimize etmek için bir matematiksel model sunmuş, işçilerin enerji tüketimini

sağlayan ergonomik kısıtları da modele dahil etmiştir. Dalle Mura ve Dini (2022), iş rotasyonunu dikkate alarak toplam işçilerin ve ekipman maliyetinin ve işçiler arasındaki enerji yükü değişkenliğinin optimize edilmesine odaklanmıştır. Bekdemir ve Öz Mehmet Taşan (2024), işçilerin enerji tüketim limitlerini aşmaları durumunda dinlenme sürelerini göz önünde bulundurarak çevrim başına maliyet optimizasyonunu gerçekleştirmiştir. Nourehammedi vd. (2024a) ise çevrim süresiyle birlikte enerji maliyetinin enküçüklenmesini sağlayan bir e-kısıt yaklaşımı önermiştir.

Karma modellenli üretim bağlamında Yapıcılar vd. (2020), toplam yatırım ve işletme maliyetlerini enküçükleyen bir model sunarken, Rabhani vd. (2020) ise dört taraflı karma modellenli montaj hatlarında toplam maliyetin ve istasyon sayısının enküçüklenmesi üzerine çalışmıştır. Dalle Mura ve Dini (2023), karma modellenli montaj hatlarında hat kumulu maliyetini, işçilerin enerji yükü farklığına ve gürültü seviyesini birlikte enküçüklemeyi amaçlamak ve çözüm için bir genetik algoritma önermiştir. Nourehammedi vd. (2024b), diız ve U-tipi montaj hatlarında istasyon sayısı, çevrim süresini ve enerji maliyetini optimize etmeyi amaçlayan üç farklı İR-MHD problemini ele almak, karma tam sayılı doğrusal modeller geliştirmiştir. Chatima ve Khotasenee (2022), paralel U-tipi hatlarda enerji tüketimi ve sosyal sorumlulukla ilişkilendirilen maliyet ölçütlerini eniyilemek için bir evrimsel algoritma sunmuştur.

Samouei ve Ashayeri (2019), karma modellenli hatlarda talep belirsizliğini ele alarak toplam maliyeti enküçüklemeyi amaçlamıştır. Slama vd. (2023), işlem sürelerinin rasal olduğu durumda istasyon maliyetleri ile çevrim süresi aşımından kaynaklanan ek maliyetleri enküçüklemek amacıyla stokastik bir karma tam sayılı programlama modeli geliştirmiştir. Zhang vd. (2024), karma modellenli bulanık İR-MHD problemini incelemiştir. Yazarlar, işlem süresi belirsizliklerini aralık tip-2 bulanık kümelerle modelleyerek montaj maliyeti, iş istasyonu sayısı, boş kalma süreleri ve enerji tüketimi arasında ödünleşme sağlayan bir anı algoritması geliştirmiştir.

Hatların ilk kez dengelemesini konu alan İR-MHD problemi, iş birliği sistemlerin kurulum aşımından endüstriyel uygulayıcılara rehberlik etmektedir. Bununla birlikte, sanayi uygulamalarında mevcut hatların tamamen ortadan kaldırılarak yeni sistemlerin kurulmamasına,

iş birliği teknolojilerin mevcut yapıları entegre edilmesi daha yaygın olarak görülmektedir (Sadıkfaruk vd., 2016; Malik ve Bilberg, 2019; Tian vd., 2024b).

Literatürde, manuel hatların iş birliği yapaya geçiş süreci sebebiyle yeniden dengelemesini konu alan yalnızca bir çalışma bulunmaktadır. Karay, Çelik ve Özçelik (2025) çalışmada, hatların iş gücü değişimi bazında yeniden yapılandırılma sürecine odaklanılmay ve insan-robot iş birliği ile montaj hattı yeniden dengeleme (İR-MHYD) problemi önerilmiştir. Çevrim süresinin enküçülenmesi amacıyla bütçe, ilk hat benzerliği ve ergonomik risk kısıtlarını içeren bir matematiksel model ve yapay arı kolonisi algoritması tabanlı bir yaklaşım geliştirilmiştir.

Bu çalışmada, manuel montaj hatlarına iş birliği sistemlere dönüştürülmesi sürecinde sabit çevrim süresi altında toplam maliyetin enküçülenerek hattın yeniden dengelemesini amaçlayan İR-MHYD problemi ilk kez ele alınmaktadır. Çalışma kapsamında, problemin çözümü için bir matematiksel model geliştirilmiştir. Önerilen model, toplam işgören maliyeti ile görevlerin yeniden atanmasından kaynaklanan taşıma maliyetinin toplamını optimize etmeyi amaçlamaktadır. Ele alınan problem, klasik hat dengeleme ve yeniden dengeleme kısıtlarına ek olarak görev-işgören uygunluğun ve ergonomik risk kısıtlarını da içermektedir.

Bu çalışma dört ana bölüme ayrılmıştır. İlk bölümde, ele alınan problem tanımlanmakta ve önerilen matematiksel modelleme yaklaşımı sunulmaktadır. Üçüncü bölümde, geliştirilen modelin geçerliliğini test etmek amacıyla türetilen problemler üzerinde elde edilen bulgulara yer verilmektedir. Dördüncü ve son bölümde ise çalışmanın genel bir değerlendirilmesi yapılmakta ve elde edilen sonuçlar doğrultusunda çıkarımlar sunulmaktadır.

2. Ele Alınan Problem ve Önerilen Matematiksel Model

Ele alınan problem, başlangıçta yalnızca insan iş gücüyle faaliyet gösteren montaj hatlarına, robot ve kobot teknolojilerinin üretime entegre edilmesi hedefi doğrultusunda yeniden yapılandırılmasını kapsamaktadır. Başlangıç durumunda montaj hattı, belirli bir çevrim

süresi ve işçi maliyetleri dikkate alınarak dengelenmiştir. Bir işletmenin iş gücünü kremen otomatikleştirmek ve çalışanların maruz kalacağı ergonomik riskleri belirli bir düzeyin altında tutmak amacıyla robot ve kobot kullanımının gündeme getirildiği ele alınmaktadır. Bu dönüştürme doğrultusunda, bazı istasyonlarda yalnızca bir işçi veya bir robotun görev alması, bazı istasyonlarda ise bir işçi ile bir kobotun birlikte çalışması planlanmaktadır. Bu farklı yapıların uygulanabilmesi için montaj hattının belirli bir çevrim süresi altında yeniden dengelenmesi gerekmektedir.

Talep değişikliğinin hat dengesine olan etkisini analiz edilebilmek amacıyla çevrim süresinin ilk denge durumuna göre azaldığı, değişmediği ve arttığı olmak üzere üç farklı senaryo ele alınmıştır. Her görev için işçi, robot ve işçi-kobot iş birliği olmak üzere üç farklı işgören alternatifi tanımlanmıştır. Problem kapsamında, hatta atanan işgörenlerin maliyetleri ile yeniden dengeleme süresi nedeniyle görevlerin farklı istasyonlara taşınmasından doğan taşıma maliyetlerinin toplamının enküçülenmesi amaçlanmaktadır. Dikkate alınan varsayımlar aşağıda özetlenmiştir:

- Montaj hattı düz yapadadır ve yalnızca tek model ürün üretilmektedir.
- Görevler arasındaki öncelik ilişkileri önceden bilinmektedir.
- Hattın başlangıç dengesi üç seviyeye ayrılan işçiler ile sağlanmıştır.
- Her görev ve işgören, uygun olduğu sürece herhangi bir istasyona atanabilir.
- Her görev yalnızca bir istasyona ve bir işgören alternatifine atanabilir.
- Her istasyona yalnızca bir işçi, yalnızca bir robot veya bir işçi ile bir kobot birlikte atanabilir.
- Aynı istasyona hem robot hem kobot atanması mümkün değildir.
- İşçi ve kobot aynı istasyonda birlikte atandığında, bu işgörenler tüm görevleri iş birliği halinde birlikte gerçekleştirir.
- İşçi ve kobotun aynı istasyonda farklı görevleri aynı anda gerçekleştirmesi mümkün değildir.
- Bazı görevler yalnızca işçiler tarafından yapılabilir.
- Görevlerin işlem süreleri işçi seviyelerine/işgören alternatiflerine bağlıdır ve bu değerler bilinmektedir.

- Günevlerin ergonomik risk değerleri işçi seviyelerine/yüküven alternatiflerine bağlıdır ve bu değerler bilinmektedir.
- İşçiler yetenek seviyelerine göre göre maaş almaktadır.
- Robotlar özleştir.
- Robotlar özleştir, ancak iş birliği alternatifinin işlem süresi ve ergonomik riski, birlikte çalışılan işçinin seviyesine bağlı olarak değişmektedir.
- Tüm istasyonlarda gerekli ekipman ve donanım mevcuttur.
- Malzeme taşıma ve kurulum süreleri ihmal edilebilir düzeydedir.

İndisler ve kümeler

i, j	görev
c	kobot ($c = 1$, kobot atanmamışsa; $c = 2$ kobot atanmışsa)
h	işgören yetenek seviyesi ($h = 1, 2, 3$ işçi seviyesi; $h = 4$ robot)
s	iş istasyonu
T	görev kümesi
S	iş istasyonu kümesi
H	işçi yetenek seviyesi ve robot kümesi
C	kobot kümesi
P_i	i görevinin bitişik öncüllerinin kümesi

Parametreler

CS	hatın çevrim süresi
t_{ik0}	görev i 'nin bir robota veya h seviyesinde bir işçiye kobotla/kobotsuz atandığı durumdaki işlem süresi
m_{ih}	h seviyesinde işçi veya robot maliyeti
m_c	kobot maliyeti
m_{lya}	yeniden atanan görevler için linim taşıma maliyeti
a_{ij}	eğer görev i başlangıç durumunda iş istasyonu s 'ye atanmış ise 1; diğer durumlarda 0
$ergo_{ik0}$	görev i 'nin bir robota veya h seviyesinde bir işçiye kobotla/kobotsuz atandığı durumdaki ergonomik riski
max_{erg}	bir istasyon için kabul edilebilir toplam ergonomik risk

Karar değişkenleri

x_{tshc}	görev i istasyonuna s 'de bir robotla veya h seviyesinde bir işçiye kobotla/kobotsuz atanmışsa 1; diğer durumlarda 0
y_{shc}	iş istasyonunu s 'de h seviyesinde bir işçi kobotla/kobotsuz çalıştırırsa 1; diğer durumlarda 0
v_s	iş istasyonunu s açılırsa 1; deil 0
q_{it}	eğer görev i 'nin başlangıç ve yeni durumunda iş istasyonunu s 'ye atama durumu değiştiyse 1; diğer durumlarda 0
TIM	toplam işgören maliyeti
ITM	toplam maliyeti
NW_h	atanan h seviyesinde işçi sayısı
NR	atanan robot sayısı
NC	atanan kobot sayısı

Matematiksel model

$$\sum_{s \in S} \sum_{h < 4} \sum_{c \in C} x_{tshc} + \sum_{s \in S} x_{tsh1} = 1 \quad \forall i \in T \quad (1)$$

$$\sum_{h < 4} \sum_{c \in C} y_{shc} + y_{sh1} = 1 \quad \forall s \in S \quad (2)$$

$$\sum_{s \in S} x_{tsh3} = 0 \quad \forall i \in T \quad (3)$$

$$\sum_{h \in H} x_{tshc} \leq M * y_{shc} \quad \forall s \in S, h \in H, c \in C \quad (4)$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{c \in C} y_{shc} = v_s \quad \forall s \in S \quad (5)$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{c \in C} x_{tshc} * x_{tshc} \leq CS * v_s \quad \forall s \in S \quad (6)$$

$$v_s \geq v_{s+1} \quad \forall s \in S \quad (7)$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{c \in C} s * x_{tshc} \leq \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{c \in C} s * x_{jshc} \quad \forall i, j \in T, i \in P_j \quad (8)$$

$$q_{it} \geq \sum_{h \in H} \sum_{c \in C} x_{tshc} - a_{it} \quad \forall i \in T, s \in S \quad (9)$$

$$q_{it} \geq a_{it} - \sum_{h \in H} \sum_{c \in C} x_{tshc} \quad \forall i \in T, s \in S \quad (10)$$

$$NW_h = \sum_{s \in S} \sum_{c \in C} y_{shc} \quad \forall h \in H, h < 4 \quad (11)$$

$$NR = \sum_{h \in H} y_{h41} \quad (12)$$

$$NC = \sum_{h \in H} \sum_{k \in K} y_{h42} \quad (13)$$

$$TIM = \sum_{h \in H} ml_h * NW_h + ml_4 * NR + ml_c * NC \quad (14)$$

$$TTM = ml_{ya} * \sum_{i \in T} \sum_{s \in S | q_{is}=0} q_{is} \quad (15)$$

$$\sum_{i \in T} \sum_{h \in H} \sum_{c \in C} \sigma_{ihc} q_{ihc} + x_{i40c} \leq \max \sigma_{ih} \quad \forall i \in T \quad (16)$$

$$x_{i40c}, y_{ihc}, \sigma_{ih}, q_{is} \in \{0,1\} \quad \forall i \in T, s \in S, h \in H, c \in C \quad (17)$$

$$NW_h, NR, NC, TIM, TTM \geq 0 \quad \forall h \in H \quad (18)$$

kısıtları altında

$$\min x = TIM + TTM \quad (19)$$

Kısıt (1), her görevin bir istasyona ve bir işgören alternatifine atanmasını garanti eder. Kısıt (2), her istasyona bir işgören alternatifinin atanmasını sağlar. Kısıt (3), görevlerin bir robota ve kobota birlikte atanmasını engeller. x_{i40c} ve y_{ihc} değişkenleri arasındaki ilişki Kısıt (4) ile kurulur. Burada M , yeterince büyük bir sayıdır ($\sum_{i \in T} \sum_{h \in H} \sum_{c \in C} t_{ihc} < M$). Kısıt (5), açılan iş istasyonu sayısını hesaplar. Kısıt (6), her bir istasyonun toplam iş yükünün çevrim süresini aşmasını önler. Kısıt (7), iş istasyonlarının sırayla açılmasını sağlar. Kısıt (8), görevler arasındaki öncelik ilişkilerini kılar. Kısıt (9) ve (10), görevlerin istasyonlarının değişip değişmediğini belirler. Kısıt (11)-(13) sırasıyla atanan k seviyesinde işçi, robot ve kobot sayılarını belirler. Kısıt (14) toplam işgören maliyetini, Kısıt (15) ise istasyonu değişen görevlerin toplam taşıma maliyetini hesaplar. Kısıt (16), her istasyonun toplam eşgüdüm riskinin belirlenen sınır değeri aşmamasını sağlar. Kısıt (17) ve (18) karar değişkenlerinin işaret kısıtlarıdır. Amaç fonksiyonu (19), işgören maliyetinin ve yeniden atanan görevlerin taşıma maliyetinin toplamının enküçülenmesidir.

3. Test Problemleri ve Elde Edilen Sonuçlar

3.1. Test problemlerinin türetilmesi

Geliştirilen matematiksel modelleme yaklaşımı, başlangıçta yalnızca işçiler ile çalışan montaj hatlarının; işçilerin yanı sıra robotları ve kobotları da içerecek şekilde yeniden dengelemesini amaçlamaktadır. Bu model, farklı boyutlarındaki üç ayrı problem ailesi üzerinde değerlendirilmiştir. Bir problem ailesinin içerdiği tüm test problemlerinde işçiler ile ilgili veriler ve tüm işgörevlerin ergonomik risk değerleri ortak alınmıştır.

Test problemlerinin türetilmesinde, basit montaj hattı dengeleme (BMHD) literatüründe yer alan üç farklı probleme ait görev sayıları, işlem süresi değerleri ve öncelik ilişkileri referans alınmıştır. Elde alınan her bir problem ailesi için ilk hat dengesi atamaları, oluru çözümlere denk gelen atamalar arasından seçilmiştir. Test problemlerine ait özellikler ve her bir aile için başlangıç hat dengesine ilişkin veriler Çizelge 1’de sunulmuştur.

Çizelge 1. Problem ailelerine ait özellikler

Problem ailesi	Görev sayısı	Başlangıç istasyon sayısı	Çözüm süresi	H1	H2	H3	Toplam işçi sayısı
Lotki	33	6	3062	3	2	1	449
Wimmerke	58	10	266	4	1	5	715
Bartinski	148	25	383	7	5	13	1687

Problemlerde görevlerin işçi seviyelerine/işgörevlere göre gerçekleştirilebilirliği aşağıdaki şekilde varsayılmıştır:

- Görevlerin ilk %20’si yalnızca en yetkin işçi grubu olan H1 (1. seviye) işçileri tarafından yapılabilir (Sungur ve Yavuz, 2015).
- Sonraki %30’luk kısım hem H1 hem de H2 (2. seviye) işçileri tarafından yerine getirilebilirken, H3 seviyesi bu görevleri gerçekleştirememektedir (Sungur ve Yavuz, 2015).
- Kalan %50’lik görevler ise tüm işçi seviyeleri tarafından yapılmaya uygundur (Sungur ve Yavuz, 2015).
- Görevlerin %10’u robotlar ve/veya iş birliği alternatifleri ile gerçekleştirilememektedir.

BMHD literatüründen alınan işlem süresi değerleri, en kalifiye işçi grubu olan H1 seviyesi için geçerli süreler olarak kabul edilmiştir. Daha düşük seviyelerdeki işçiler için işlem süreleri, bir üst seviyeye göre %50 oranında artmaktadır. Katsayı ile çarpım sonucu tamsayı değilse, değer en yakın tamsayıya yuvarlanmaktadır.

Ergonomik risk değerleri, her görev için 0 ile 10 arasıda çift tamsayılar şeklinde seçilmiştir (Çizelge 2). Her görev için H3 (3. seviye) işçileri bazında risk değeri rasal türetilmiş, diğer seviyelerdeki işçiler için bu değerler her kademede 2 birim azaltılmıştır. Örneğin, H3 için 6 olan bir görev riski; H2 için 4, H1 için 2 birimdir. H3 seviyesi için riskin 2 olduğu görevlerde, H1 ve H2 için risk değeri sıfır kabul edilmiştir. Negatif risk değerlerine izin verilmemiştir. Robotların tüm görevler için ergonomik risk değerinin 0 olduğu ve işçi-robot iş birliği durumunda, ilgili işçi için görevin ergonomik risk değerinin 2 seviye (4 birim) altı olduğu varsayılmıştır. Ergonomik risk kısıtının sağ taraf sabiti ise tüm işçilerin risk değerine göre seçilmiştir. Bu sabit, her görev için işçilerin bazında ortalama risk değerinin toplamına ilk denge durumundaki iş istasyonları sayısına bölünmesiyle bulunan değer en yakın tamsayıya yuvarlanmasıyla elde edilmiştir.

Hiyerarşik işçi atanması ile montaj hattı dengeleme problemini öneren Sungur ve Yavuz (2015) ile paralel şekilde H1 seviyesindeki işçilerin maliyetinin 100 para birimi (pb) olduğu ve sonraki seviyelere geçişlerde 0,70 çarpım oranı kullanıldığı varsayılmıştır. Yani, H1, H2 ve H3 işçileri için maliyet değerleri sırasıyla 100, 70 ve 49 pb olarak alınmıştır (Sungur ve Yavuz, 2015). Görevlerin ilk denge durumuna göre istasyonları değiştiğinde bir taşıma maliyeti meydana gelmektedir ve bu maliyet tüm test problemlerinde taşıma görev sayısı başına 10 pb olarak alınmıştır.

Çizelge 2. Ergonomik risk değerleri ve anlamları

Ergonomik risk değeri	Anlam
0	Risk yok
2	Çok düşük risk
4	Düşük risk
6	Orta risk
8	Yüksek risk
10	Çok yüksek risk

Yeniden dengeleme, robotların işlem süreleri, kobotların işlem süreleri, robot maliyeti, kobot maliyeti ve çevrim süresi olmak üzere dikkate alınması gereken beş farklı faktör bulunmaktadır. Yeniden dengeleme test problemleri türetilirken farklı değerlerin karar değişkenleri üzerindeki etkisini gözlemlenmek amacıyla robotların ve kobotların işlem süreleri ve maliyetleri için ikişer seviye göz önünde bulundurulmuştur. İlk olarak, çevrim süresinin ilk denge durumuna göre düştüğü, değişmediği ve arttığı olmak üzere üç seviye çevrim süresi dikkate alınmıştır. Böylelikle, her bir problem zikisi için 48'er test problemi türetilmiştir. Faktör seviyeleri Çizelge 3'te sunulmuştur.

Çizelge 3. Yeniden dengeleme faktör seviyeleri

Faktör	Robot işlem süresi		İşçi-Kobot işlem süresi		Robot maliyeti		Kobot maliyeti		Çevrim süresi		
Seviye	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	3
Çarpım	0,30	1,30	0,30	0,70	0,70	1,30	0,30	1,30	0,70	1,00	1,30

Robotların işlem süreleri için iki seviyede dikkate alınırken, bu işçilerin türünün işçilerden hızlı ve yavaş olduğu iki ayrı durum değerlendirilmiştir. Seviye 1'de 0,30 çarpım, her bir görev için robotların işlem süresinin, H1 işçilerinin işlem süresinin %30'u kadar olduğu anlamına gelmektedir. Robotların işçilerden yavaş olduğu durumda ise robotların işlem süreleri, H3 işçilerinin süresinin %130'u olmaktadır. Ele alınan problemde, işçi-kobot iş birliğinin her zaman en düşük işlem süresine sahip olduğu varsayılmıştır. İş birliği durumunda, iş birliği yapılan işçilerin sürelerinin %30'u ve %70'i olmak üzere iki seviye dikkate alınmıştır. Robot maliyeti, işçi maliyeti ortalamasına (73 pb), %70'i (51 pb) ve %130'u (95 pb) olmak üzere iki duruma göre incelenmiştir.

Kobot maliyeti, tek başına kobotun maliyetini göstermekte ve iş birliği durumunda işçinin ve kobotun maliyetinin toplamı dikkate alınmaktadır. Kısacası, kobot maliyeti ifadesi iş birliği durumunda işçi maliyetine ek olarak gelen maliyeti ifade etmektedir. Kobotların getirdiği ek maliyet, işçi maliyeti ortalamasının (73 pb), %30'u (22 pb) ve %130'u (95 pb) olarak iki seviyede ele alınmıştır. İşçi ve kobot arasındaki iş birliğinin maliyeti, iş birliği yapılan işçinin seviyesine göre değişmektedir. Kobot maliyetinin 22 pb olarak ele alındığı bir durumda, eğer bir kobot bir istasyonda bir H1 işçisiyle iş birliği yaparsa, bu

istasyon için 122 (100+22) pb işgören maliyeti ortaya çıkmaktadır. Kobottan H2 işçisiyle iş birliği durumunda ilgili istasyon için işgören maliyeti 92 (70+22) pb, H3 işçisiyle iş birliği durumunda ise 71 (49+22) pb olarak elde edilmektedir.

İlk denge durumundaki çevrim süresi değerinin, yarımlan dengeleme durumunda %30 düştüğü (ilk durumun %70'i olduğu), değişmediği ve %30 arttığı (ilk durumun %130'u olduğu) olmak üzere üç farklı durum incelenmiştir. Her bir problem ailesi için 48'er test problemi olmak toplam 144 adet problem türetilmiştir. Problem ailelerine ait işlem süresi, maliyet ve çevrim süresi faktörlerinin katsayıları Çizelge 4'te sunulmuştur.

Çizelge 4'te bir ailenin her bir problemine ait özellikler ilgili probleme ait satırda verilmiştir. Her problem, kendisine ait satırda "✓" simgesi bulunan sütunlara karşılık gelen özellikleri içermektedir. Örneğin, Çizelge 4'te üç aileden herhangi birine ait 1. sıradaki problemde, robotların işlem süreleri H1 işçilerinin işlem sürelerinin %70'i ve işçi-kobot iş birliğinin işlem süreleri ise iş birliği yapılan işçilerinin işlem sürelerinin %30'udur. Robot maliyeti işçi maliyetleri ortalamasının %70'i ve kobotların atanması durumunda getirecekleri ek maliyet ise işçi maliyetleri ortalamasının %30'udur.

Problemler, çevrim süresi değişimini bazında üçerli gruplara ayrılmıştır. 1. sıradaki problemde, çevrim süresi ilk denge durumunda elde edilen çevrim süresinin %70'i kadardır. 2. ve 3. sıradaki problemler işlem süresi ve maliyetler açısından 1. sıradaki ile aynı olmasına karşın, çevrim süresi açısından farklıdır.

Çizelge 4'te sunulan katsayılar, her üç ailenin içerdiği test problemleri için aynıdır. Görev sayısı, ilk hattın istasyon sayısı, öncelik ilişkileri ve işçilere ait işlem süreleri ise her bir aile için birbirinden farklıdır. Bu sebeple, ele alınan faktörler için aynı katsayılar kullanılmasına rağmen işçilere ait işlem sürelerine bağlı hesaplanan robot ve işçi-kobot süreleri, ilk hattın çevrim süresine göre belirlenen yeni çevrim süresi değerleri üç problem ailesi arasında farklılık göstermektedir. Farklı hiyerarşik seviyelere ait işçi maliyetleri tüm aileler bazında aynı olduğundan, iki farklı ailenin aynı maliyet faktörü katsayısına sahip problemleri için işçi maliyetlerine bağlı hesaplanan diğer işgören maliyetleri de eşdeğer olmaktadır.

3.2. Sonuçlar

Ele alınan problemin çözümü için geliştirilen matematiksel model, Intel Core i5 1.80GHz işlemciye ve 8 GB RAM'e sahip bir bilgisayarda GAMS programı ile kodlanmış ve çözücü olarak CPLEX kullanılmıştır. 144 problemin her biri için 7200 saniye süre limiti belirlenmiştir.

Tüm problemlere ait sonuçlar Çizelge 5-7'de sunulmuştur. Sonuç tablolarında ilk sütunlarda problemlerin ismi verilmiştir. Problemler isimlendirilirken, problem ailesinin ismi ve faktörlerin hangi seviyesine ait katsayılar ile türetildikleri dikkate alınmıştır (*Problem ailesinin baş harfi-Robot süresi için seviye-İşçi-Kobot süresi için seviye-Robot maliyeti için seviye-Kobot maliyeti için seviye-Çevrim süresi değişimi için seviye*). Örneğin, Çizelge 5'te Latzi ailesine ait 10. sıradaki problem (L-1-1-2-2-1) türetilirken; robot işlem süresi faktörünün 1. seviyesi dikkate alınmıştır ve robotların işlem süresi H1 işçilerinin süresinin 0,70 katıdır. Benzer şekilde, işçi-kobot işlem süresinin de 1. seviyesi dikkate alınmıştır ve işçi-kobot iş birliğinin işlem süresi iş birliği yapılan işçi seviyesinin 0,30 katıdır. 2. ve 3. faktörler için 2. seviyeler dikkate alındığından robot ve kobot maliyetleri işçi maliyetlerinin ortalamasına 1,30 katıdır. Bu problemlerde çevrim süresi için 1. seviye ele alındığından ilk hat dengesi çevrim süresinin 0,70 katıdır.

Sonuç tablolarının 2. sütunlarında iş istasyonuna sayıları gösterilmektedir. 3., 4. ve 5. sütunlarda ise sırasıyla hatta atanan H1, H2 ve H3 seviyesindeki işçilerin sayıları verilmektedir. 6. sütun, bu sayıların toplamından oluşan hattaki toplam işçi sayısını ifade etmektedir. İşçi sayıları hem tek başına atanan hem de bir kobot ile iş birliği yapan işçileri kapsamaktadır.

7. sütunda hatta atanan robot sayıları ve 8. sütunda ise birer işçi ile iş birliği yapan kobotların sayıları görülmektedir. Her bir kobot bir işçi ile iş birliği yaptığından dolayı, tek başına bir iş istasyonuna atanan işçi sayısı, 6. ve 8. sütundaki değerlerin farkına eşittir.

Her bir test problemi için yeniden dengeleme sebebiyle ilk hat dengesine göre iş istasyonunu değişen yani yeniden atanan görev sayısı 9. sütunda (YA) verilmiştir. Görevlerin yeniden atanması, taşıma maliyetini

meydana getirmektedir. Yenisiden dengeleme sonucunda toplam taşıma maliyeti 10. sütunda yer almaktadır (TİM).

Tüm seviyelerdeki işçilerin, robotların ve işçilerin yama iş birliği yapmak için atanan kubitların maliyeti içeren maliyetini oluşturmaktadır ve ilgili maliyet değerleri 11. sütunda sunulmuştur (TİM).

Elle alınan problemin amaç fonksiyonu, içeren ve taşıma maliyetlerinin toplamının enküçükleşmesidir. Toplam maliyet değeri, sonuç tablolarının 12. sütunlarında bulunmaktadır (TİM). Saniye cinsinden çözüm süreleri ise sonuç tablolarının 13. sütunundadır.

Çizelge 5'te yer alan tüm problemlerin optimal çözümü bulunduğundan gap değerleri 0'dır. Çizelge 6 ve 7'de son sütunlarda sırasıyla orta ve büyük boyutlu problemlerin çözümlerine ilişkin gap değerleri (%) verilmiştir.

Test problemlerinde elde edilen sonuçlara göre önerilen model [12] ailesine ait küçük boyutlu test problemlerini en fazla 674,20 saniye içinde optimal olarak çözmeyi başarmıştır. Bu aileye ait problemlerin oldukça büyük bir kısmında çözüm süresi 60 saniyeyi aşmamıştır.

Orta boyutlu Warnock problem ailesine ait toplam 48 problemten 33 tanesi (%69'u) verilen süre limiti içinde optimal olarak çözülmüştür. Kalan 15 (%31'i) problem için süre limiti içinde olurlu çözümler elde edilmiştir. Bu çözümlerin gap değerleri %2,24 ve %27,05 arasıdır.

Bu büyük boyutlu aile olan Barthold problemleri için yalnızca 1 (%2'si) problemin optimal çözümüne ulaşılmış, 19 (%40'ı) problem için süre limiti içinde olurlu çözümler elde edilmiş ve 28 (%58'i) problem için çözüm bulunamamıştır. Bu ailedeki problemler için verilen süre limiti içinde bulunan olurlu ancak optimal olmayan çözümlerin gap değerleri %1,07 ve %34,73 arasıdır.

Çizelge 4. Test problemlerinin sahip olduğu faktör seviyelerine ait katsayılar

Gm p	Sıra	Robot		İç-Robot		Robot		Robot		Çevrim süresi		
		0.70	1.30	0.30	0.70	0.70	1.30	0.30	1.30	0.70	1.00	1.30
1	1	✓		✓		✓		✓		✓		
	2	✓		✓		✓		✓			✓	
	3	✓		✓		✓		✓				✓
	4	✓		✓		✓			✓	✓		
2	5	✓		✓		✓			✓		✓	
	6	✓		✓		✓			✓			✓
	7	✓		✓			✓	✓		✓		
3	8	✓		✓			✓	✓			✓	
	9	✓		✓			✓	✓				✓
	10	✓		✓			✓		✓	✓		
4	11	✓		✓			✓		✓		✓	
	12	✓		✓			✓		✓			✓
	13	✓			✓	✓		✓		✓		
5	14	✓			✓	✓		✓			✓	
	15	✓			✓	✓		✓				✓
	16	✓			✓	✓			✓	✓		
6	17	✓			✓	✓			✓		✓	
	18	✓			✓	✓			✓			✓
	19	✓			✓		✓	✓		✓		
7	20	✓			✓		✓	✓			✓	
	21	✓			✓		✓	✓				✓
	22	✓			✓		✓		✓	✓		
8	23	✓			✓		✓		✓		✓	
	24	✓			✓		✓		✓			✓
	25		✓	✓		✓		✓		✓		
9	26		✓	✓		✓		✓			✓	
	27		✓	✓		✓		✓				✓
	28		✓	✓		✓			✓	✓		
10	29		✓	✓		✓			✓		✓	
	30		✓	✓		✓			✓			✓
	31		✓	✓			✓	✓		✓		
11	32		✓	✓			✓	✓			✓	
	33		✓	✓			✓	✓				✓
	34		✓	✓			✓		✓	✓		
12	35		✓	✓			✓		✓		✓	
	36		✓	✓			✓		✓			✓
	37		✓		✓	✓		✓		✓		
13	38		✓		✓	✓		✓			✓	
	39		✓		✓	✓		✓				✓

14	40		✓		✓	✓			✓	✓		
	41		✓		✓	✓			✓		✓	
	42		✓		✓	✓			✓			✓
15	43		✓		✓		✓	✓		✓		
	44		✓		✓		✓	✓			✓	
	45		✓		✓		✓	✓				✓
16	46		✓		✓		✓		✓	✓		
	47		✓		✓		✓		✓		✓	
	48		✓		✓		✓		✓			✓

Çizelge 5. Küçük boyutlu Luzt1 problemlerine ait sonuçlar

Problem	S	H1	H2	H3	İç	Kabuk	Kabuk	YA	TTM	TİM	TM	Süre (s)
L-1-1-1-1-1	6	0	0	2	2	4	1	4	40	324	304	2,32
L-1-1-1-1-2	6	0	0	2	2	4	1	2	20	324	344	1,94
L-1-1-1-1-3	6	0	0	2	2	4	1	2	20	324	344	0,84
L-1-1-1-2-1	6	1	0	1	2	4	0	6	60	353	413	1,92
L-1-1-1-2-2	6	1	0	1	2	4	0	2	20	353	373	0,84
L-1-1-1-2-3	6	1	0	1	2	4	0	2	20	353	373	2,48
L-1-1-2-1-1	6	0	3	2	5	1	3	2	20	460	480	8,05
L-1-1-2-1-2	6	0	1	4	5	1	3	6	60	427	487	5,35
L-1-1-2-1-3	6	0	1	4	5	1	3	6	60	427	487	5,86
L-1-1-2-2-1	6	1	0	1	2	4	0	6	60	520	580	7,61
L-1-1-2-2-2	6	1	1	1	3	3	0	2	20	504	524	3,80
L-1-1-2-2-3	6	1	0	2	3	3	0	4	40	483	523	5,16
L-1-2-1-1-1	6	1	0	1	2	4	0	6	60	353	413	3,66
L-1-2-1-1-2	6	0	0	2	2	4	1	4	40	324	304	2,16
L-1-2-1-1-3	6	0	0	2	2	4	1	3	30	324	354	2,73
L-1-2-1-2-1	6	1	0	1	2	4	0	6	60	353	413	1,56
L-1-2-1-2-2	6	1	0	1	2	4	0	2	20	353	373	1,38
L-1-2-1-2-3	6	1	0	1	2	4	0	2	20	353	373	3,23
L-1-2-2-1-1	6	1	2	0	3	3	1	4	40	547	587	22,11
L-1-2-2-1-2	6	1	1	2	4	2	1	4	40	480	520	9,77
L-1-2-2-1-3	6	0	2	3	5	1	3	5	50	448	498	8,92
L-1-2-2-2-1	6	1	0	1	2	4	0	6	60	520	580	7,75
L-1-2-2-2-2	6	1	1	1	3	3	0	2	20	504	524	5,23
L-1-2-2-2-3	6	1	0	2	3	3	0	4	40	483	523	8,94
L-2-1-1-1-1	6	1	2	3	6	0	4	7	70	475	545	18,97
L-2-1-1-1-2	6	1	2	2	5	1	3	4	40	455	495	4,41
L-2-1-1-1-3	6	1	2	2	5	1	3	3	30	455	485	7,30
L-2-1-1-2-1	6	3	2	1	6	0	1	12	120	504	704	58,43
L-2-1-1-2-2	6	3	1	1	5	1	1	6	60	505	625	66,73
L-2-1-1-2-3	6	3	1	0	4	2	1	3	30	587	597	47,56

L-2-1-2-1-1	6	1	2	3	6	0	4	7	70	475	545	7,61
L-2-1-2-1-2	6	1	2	3	6	0	3	5	50	453	503	4,58
L-2-1-2-1-3	6	1	2	3	6	0	3	5	50	453	503	5,97
L-2-1-2-2-1	6	3	2	1	6	0	1	13	130	584	704	35,42
L-2-1-2-2-2	6	3	2	0	6	0	1	3	30	605	635	21,36
L-2-1-2-2-3	6	3	2	0	6	0	1	3	30	605	635	28,25
L-2-2-1-1-1	6	5	1	0	6	0	3	8	80	636	716	50,89
L-2-2-1-1-2	6	3	2	1	6	0	2	4	40	533	573	43,59
L-2-2-1-1-3	6	1	3	1	5	1	3	3	30	476	506	10,94
L-2-2-1-2-1	7	6	1	0	7	0	1	13	130	765	895	561,67
L-2-2-1-2-2	6	4	1	1	1	6	0	1	10	604	614	84,41
L-2-2-1-2-3	6	4	1	0	5	1	1	1	10	616	626	133,24
L-2-2-2-1-1	6	5	1	0	6	0	3	8	80	636	716	49,17
L-2-2-2-1-2	6	3	2	1	6	0	2	4	40	533	573	31,38
L-2-2-2-1-3	6	1	2	3	6	0	4	4	40	475	515	7,45
L-2-2-2-2-1	7	6	1	0	7	0	1	13	130	765	895	674,28
L-2-2-2-2-2	6	4	1	1	6	0	1	5	50	614	664	43,88
L-2-2-2-2-3	6	3	2	0	6	0	1	3	30	605	635	39,63

Çizelge 6. Orta boyutlu Waznecka problemlerine ait sonuçlar

Problem	S	H	H	H	İç	Roto	Koto	Y	TT	TI	TM	Süre	Gap
W-1-1-1-1	1	1	1	1	3	7	1	6	60	598	658	186,53	0,00
W-1-1-1-1	1	0	2	1	3	7	1	7	70	568	638	46,73	0,00
W-1-1-1-1	1	0	2	1	3	7	1	7	70	568	638	43,84	0,00
W-1-1-1-1	1	1	1	1	3	7	1	6	60	671	731	255,70	0,00
W-1-1-1-1	1	0	2	1	3	7	1	7	70	641	711	208,47	0,00
W-1-1-1-1	1	0	2	1	3	7	1	7	70	641	711	2284,8	0,00
W-1-1-2-1	1	1	2	6	8	1	4	9	90	717	807	4328,6	0,00
W-1-1-2-1	1	0	2	6	8	2	3	11	110	690	800	5289,4	0,00
W-1-1-2-1	1	0	2	6	8	2	3	11	110	690	800	591,41	0,00
W-1-1-2-1	1	1	2	4	7	3	1	10	100	816	916	7280,0	8,78
W-1-1-2-1	1	1	2	4	7	3	1	9	90	816	906	7280,0	7,63
W-1-1-2-1	1	1	2	4	7	3	1	9	90	816	906	675,16	0,00
W-1-2-1-1	1	2	8	2	4	6	2	7	70	648	718	4512,3	0,00
W-1-2-1-1	1	1	1	1	3	7	1	7	70	598	668	2374,2	0,00
W-1-2-1-1	1	0	2	1	3	7	1	7	70	568	638	108,13	0,00
W-1-2-1-1	1	2	1	1	4	6	1	9	90	730	810	5282,5	0,00
W-1-2-1-1	1	1	1	1	3	7	1	7	70	671	741	2210,5	0,00
W-1-2-1-1	1	0	2	1	3	7	1	7	70	641	711	526,53	0,00
W-1-2-2-1	1	2	8	5	7	3	3	9	90	796	886	7280,0	9,45
W-1-2-2-1	1	1	2	5	8	2	2	11	110	719	829	7280,0	7,73

W-1-2-2-	1	8	2	6	8	3	3	12	120	690	810	1080,7	0,00
W-1-2-2-	1	3	1	3	7	3	1	9	98	887	987	7198,2	0,00
W-1-2-2-	1	2	2	4	8	2	1	10	180	821	931	7300,8	4,79
W-1-2-2-	1	1	2	4	7	3	1	9	98	816	906	564,86	0,00
W-2-1-1-	1	2	1	5	8	2	4	12	120	785	835	1231,2	0,00
W-2-1-1-	1	3	1	3	7	3	3	6	68	736	796	788,26	0,00
W-2-1-1-	1	1	2	2	5	5	3	9	98	659	749	6127,5	0,00
W-2-1-1-	1	4	2	1	7	3	1	17	170	837	100	7300,8	12,5
W-2-1-1-	8	3	1	1	5	3	1	25	250	687	917	3901,5	0,00
W-2-1-1-	1	1	2	1	4	6	1	17	170	690	860	6323,5	0,00
W-2-1-2-	1	2	3	5	18	0	4	10	180	743	843	7300,8	2,34
W-2-1-2-	1	2	3	5	18	0	4	9	98	743	833	735,92	0,00
W-2-1-2-	1	2	3	5	18	0	4	9	98	743	833	7300,8	0,07
W-2-1-2-	9	3	2	4	9	0	2	21	210	826	103	5831,5	0,00
W-2-1-2-	8	4	8	3	7	1	1	26	260	737	997	3203,7	0,00
W-2-1-2-	8	3	1	3	7	1	1	28	280	787	987	3499,8	0,00
W-2-2-1-	1	5	1	3	9	1	5	5	58	878	938	7300,8	0,66
W-2-2-1-	1	3	2	2	7	3	3	7	78	757	837	7300,8	2,24
W-2-2-1-	1	1	3	1	5	5	3	8	88	680	760	1873,1	0,00
W-2-2-1-	1	7	8	1	8	2	2	9	98	184	113	7300,8	2,89
W-2-2-1-	1	4	1	2	7	3	2	7	78	911	981	7300,8	15,2
W-2-2-1-	1	2	1	1	4	6	1	16	160	720	890	5787,4	0,00
W-2-2-2-	1	5	1	4	18	0	5	6	68	876	936	7300,8	7,93
W-2-2-2-	1	2	3	5	18	0	4	10	180	743	843	5891,3	0,00
W-2-2-2-	1	2	3	5	18	0	4	9	98	743	833	1629,5	0,00
W-2-2-2-	1	7	8	2	9	1	2	10	180	188	118	7300,8	21,0
W-2-2-2-	1	5	1	4	18	0	2	9	98	956	104	2856,2	0,00
W-2-2-2-	6	3	1	1	5	1	2	45	450	784	115	7300,8	27,0

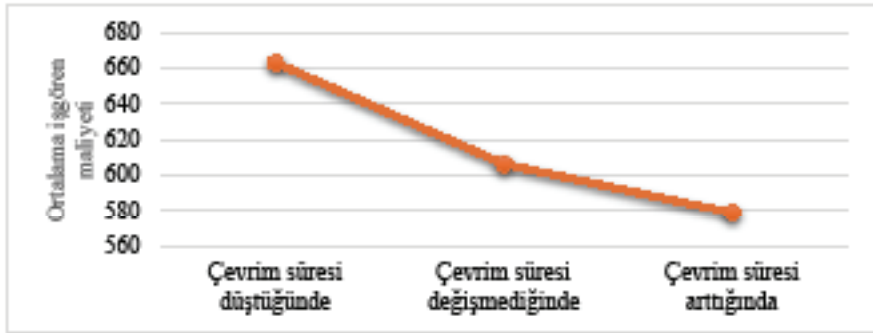
B-2-2-1-2-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
B-2-2-2-1-	2	8	7	10	25	0	17	29	290	215	344	7200,0	17,4
B-2-2-2-1-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B-2-2-2-1-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B-2-2-2-2-	2	16	6	3	25	0	5	49	490	264	313	7200,0	27,5
B-2-2-2-2-	2	10	8	13	23	2	2	39	390	201	340	7200,0	19,8
B-2-2-2-2-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

3.3. Senaryoların değerlendirilmesi

Test problemlerini üretmede kullanılan katsayıların amaç fonksiyonuna üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla küçük ve orta boyutlu problemler için elde edilen sonuçlar kullanılmıştır. Şekil 1, ilgili problemler için çevrim süresine göre ilk denge durumuna göre iş isteniyorsa değişen görevlerin ortalama taşıma maliyetini göstermektedir. Çevrim süresinin düşmesi, hatın çevrim süresinin ilk denge durumuna göre %30 azaldığında ve çevrim süresinin artması ise %30 arttığında ifade etmektedir. Taşıma maliyeti, çevrim süresinin değişmediği durumda diğer durumlara göre daha düşüktür. Bunun sebebi, ilk denge durumunda aynı çevrim süresiyle dengelenmiş bir hatın bulunması ve buna bağlı olarak görevlerin yer değişimi ihtiyacının daha az olmasıdır. Şekil 2 ise çevrim süresine göre ortalama işgören maliyetini göstermektedir. Bu maliyet, çevrim süresinin düşmesi durumunda diğer durumlara göre daha yüksektir. Bunun sebebi, çevrim süresi kontrolüne yazılacak için daha hızlı çalışan ve dolayısıyla daha maliyetli işgörenele ihtiyaç duyulmasıdır. İşgören maliyetinin en düşük olduğu durum ise maliyetli işgörenele daha az gereksinim duyulan çevrim süresinin arttığı durumdur.

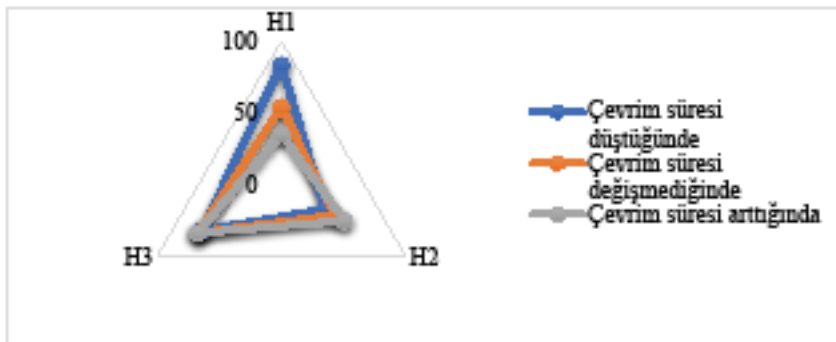


Şekil 1. Çevrim süresine göre ortalama taşıma maliyeti



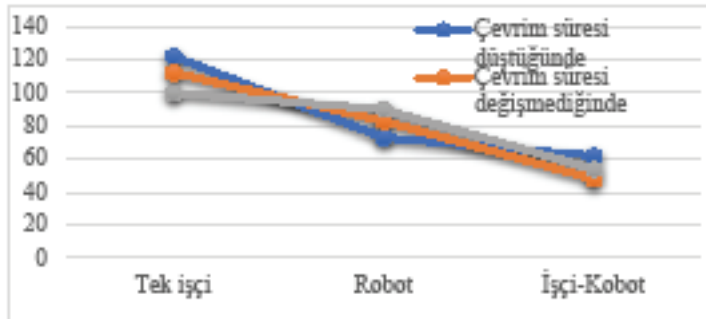
Şekil 1. Çevrim süresine göre ortalama işgören maliyeti

Şekil 3, yeniden dengeleme durumunda çevrim süresine göre atanan farklı seviyelere ait toplam işçi sayılarını göstermektedir. Bu değerler hem tek başına hem de kobot ile iş birliği halinde çalışan işçileri kapsamaktadır. Çevrim süresi düştüğünde, çevrim süresi kısıtına uyabilmek için daha hızlı çalışan H1 işçilerinin daha fazla atandığı görülmektedir. Çevrim süresi arttığında, bu gruptaki işçiler diğer durumlara göre daha az tercih edilmektedir. Bunun sebebi, H1 işçilerinin maliyetinin yüksek olması ve hatta daha yavaş işçilerde çevrim süresi kısıtına uyabilmesidir. H2 ve H3 seviyesindeki işçiler daha çok çevrim süresi arttığında tercih edilmektedir.



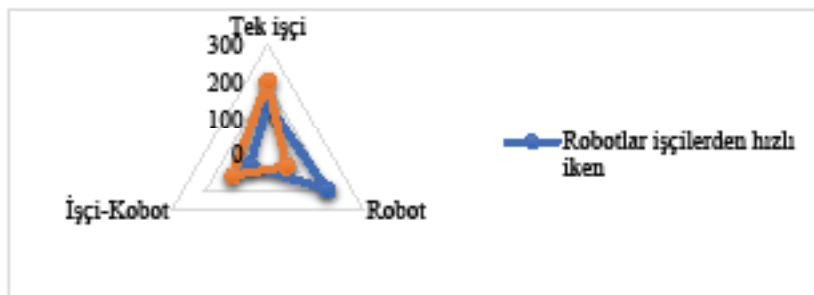
Şekil 3. Çevrim süresine göre farklı seviyelerdeki işçi sayıları

Şekil 4, çevrim süresine göre atanan işgören sayılarını göstermektedir. İş birliği olmadan tek başına çalışan işçilerin ve işçi-kobot iş birliğinin, çevrim süresinin düştüğü durumlarda diğer durumlara göre daha fazla olduğu görülmektedir. Robotlar, en çok çevrim süresi arttığında, en az ise çevrim süresi düştüğünde atanmaktadır.



Şekil 4. Çevrim süresine göre farklı işgören türlerinin atama sayıları

Şekil 5, robotun işçilerden hızlı veya yavaş olmasına göre atanan farklı seviyelere ait işgören sayılarını göstermektedir. Robotun işçilerden hızlı olması, robotun işlem süresinin her bir görev için H1 işçilerinin işlem süresinin %70'i kadar olmasına karşılık gelmektedir. Bu durumda, robotların diğer durumlara nazaran daha çok atandığı görülmektedir. Robotun hızlı işçilerden düşük olduğunda, robotlar her bir görevi H3 işçilerinin %130'u kadar sürede gerçekleştirmektedir. Robot yavaşken robot sayısının azaldığı, tek başına çalışan işçilerin ve işçi-kobot iş birliğinin arttığı belirlenmiştir.



Şekil 5. Robotların hızına göre farklı seviyelerdeki işgören sayıları

Elde edilen sonuçlara göre ele alınan faktörlerin farklı seviyelerinin atanan işgören sayıları ve dolayısıyla toplam maliyet üzerinde etkili bulunmaktadır. Buna ek olarak, çevrim süresinin ilk denge durumuna göre değişmediği durumda, diğer durumlara kıyasla daha az görevin istasyonu değiştirilerek hattın yeniden dengelenebildiği tespit edilmiştir. Özetle, işgören maliyeti ve görev taşıma maliyeti olmak üzere iki bileşenden oluşan amaç fonksiyonu değeri; farklı işgören türlerinin işlem sürelerinden, maliyetlerinden ve hattın çevrim süresinden etkilenmektedir.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, manuel montaj hatlarının iş birliği sistemlere dönüştürülmesi sürecinde karşılaşılan yeniden dengeleme ihtiyacını ele alan maliyet odaklı İR-MHYD problemi için bir matematiksel model önerilmiştir. Modelde, sabit çevrim süresi altında işgörenlerin toplam maliyeti ile görevlerin atandığı istasyonların değişiminden kaynaklanan taşıma maliyetlerinin toplamının enküçüklenmesi amaçlanmıştır. Problem kapsamında insan, robot ve işçi-kobot iş birliği olmak üzere üç farklı işgören türü dikkate alınmıştır.

Test problemleri üzerinde elde edilen sonuçlar, önerilen modelin küçük boyutlu Lutet problem ailesinde yüksek performans gösterdiğini ve tüm örnekleri kısa sürede optimal olarak çözüldüğünü ortaya koymıştır. Orta boyutlu Warnerke ailesinde, problemlerin %69'unu için optimal çözüme ulaşılmış, kalanlarında ise kabul edilebilir yakınsama oranları elde edilmiştir. Ancak, en büyük boyutlu Barthold ailesinde yalnızca sıradı sayıda optimal çözüm üretilebilmiş ve büyük kısmı için çözüm elde edilememiştir. Bu durum, özellikle büyük ölçekli problemlerin çözümünü için sezgisel veya metasezgisel algoritmaların gerekli olduğunu göstermektedir.

Gelecek çalışmalarda, montaj sistemlerinde işgörenlerin öğrenme etkisi, talep belirsizliği, çok ürünlü üretim yapıları ve kaynak paylaşımı gibi dinamiklerin dikkate alındığı yeniden dengeleme modellerinin geliştirilmesi hem kuramsal hem de uygulamalı boyutta literatüre katkı sağlayacaktır.

Kaynaklar

- Bekdemir, P., & Özmehtmet Taşın, S. (2024). Cost-based assembly line balancing and worker-robot assignment problem under ergonomic constraints. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 39(1), 461-472. <https://doi.org/10.17341/gazimfen.1182311>
- Clautiaux, P., & Khotsanenke, A. (2022). Multi-objective parallel adjacent U-shaped assembly line balancing collaborated by robots and normal and disabled workers. *Computers & Operations Research*, 143, Article 105775. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.105775>
- Dalle Mura, M., & Dini, G. (2019). Designing assembly lines with humans and collaborative robots: A genetic approach. *CIRP Annals*, 68(1), 1-4. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.006>
- Dalle Mura, M., & Dini, G. (2022). Job rotation and human-robot collaboration for enhancing ergonomics in assembly lines by a genetic algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 118, 2901-2914. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08068-1>
- Dalle Mura, M., & Dini, G. (2023). Improving ergonomics in mixed-model assembly lines balancing noise exposure and energy expenditure. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 40, 44-52. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.11.005>
- Karuy Çelik, A., & Özçelik, F. (2025). Assembly line rebalancing problem with human-robot collaboration and a hyper-heuristic solution approach. *Computers & Industrial Engineering*, 200, Article 110795. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110795>
- Li, Z., Ismailhan, M. N., & Tang, Q. (2021). Multi-objective migrating bird optimization algorithm for cost-oriented assembly line balancing problem with collaborative robots. *Neural Computing and Applications*, 33(14), 8575-8596. <https://doi.org/10.1007/s00521-020-05610-2>
- Li, Z., Tang, Q., & Zhang, Y. (2023). Cycle time optimization for U-shaped assembly lines with collaborative robots under budget constraint. *[Journal not specified]*
- Malik, A. A., & Hilberg, A. (2019). Collaborative robots in assembly: A practical approach for tasks distribution. *Proceedings CIRP*, 81, 665-670. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.173>

- Noormohammadi, A., Fathi, M., Arhavi, T., & Slama, I. (2024a). Multi-objective optimization of cycle time and robot energy expenditure in human-robot collaborated assembly lines. In *Proceedings of the 5th International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing*, 232, 1279–1288. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.01.126>
- Noormohammadi, A., Fathi, M., & Ng, A. H. C. (2024b). Balancing and scheduling human-robot collaborated assembly lines with layout and objective consideration. *Computers & Industrial Engineering*, 187, Article 109775. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109775>
- Rahimi, M., Behbahani, S. Z. R., & Farnkhi-Asl, H. (2020). The collaboration of human-robot in mixed-model four-sided assembly line balancing problem. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 100(1), 71–81. <https://doi.org/10.1007/s10846-020-01177-1>
- Sadriradipour, B., Sweidi, H., & Wang, Y. (2016). An integrated framework for human-robot collaborative assembly in hybrid manufacturing cells. In *Proceedings of the 17th IEEE International Conference on Automation Science and Engineering* (pp. 462–467). <https://doi.org/10.1109/ICASE.2016.7743441>
- Samouei, P., & Ashayeri, J. (2019). Developing optimization & robust models for a mixed-model assembly line balancing problem with semi-automated operations. *Applied Mathematical Modelling*, 71, 259–275. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2019.02.019>
- Slama, I., Arhavi, T., Noormohammadi, A., & Fathi, M. (2023). Assembly line balancing with collaborative robots under uncertainty of human processing times. In *Proceedings of the 9th International Conference on Control, Decision and Information Technologies* (pp. 2649–2653). <https://doi.org/10.1109/CoDIT58514.2023.10284282>
- Sengur, B., & Yavuz, Y. (2015). Assembly line balancing with hierarchical worker assignment. *Journal of Manufacturing Systems*, 37, 290–298. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.08.004>
- Tim, B., Janselkhan, M., & Marinelli, M. (2024b). A systematic investigation of the barriers to effective implementation of human-robot assembly line: An integrated multi-criteria decision-making approach. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 17(1–2), 198–223. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2023.2278114>
- Tim, B., Karal, H., & Janselkhan, M. (2024a). Balancing heterogeneous assembly line with multi-skilled human-robot collaboration via adaptive

cooperative co-evolutionary algorithm. *Swarm and Evolutionary Computation*, 91, Article 101762. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2024.101762>

Weckenborg, C., & Spengler, T. S. (2019). Assembly line balancing with collaborative robots under consideration of ergonomics: A cost-oriented approach. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 1860–1865. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.473>

Yapkin, S., Nugraha, C., & Ma'ruf, A. (2020). Mixed model assembly line balancing for human-robot shared tasks. In *Proceedings of the 2020 7th International Conference on Industrial Engineering and Applications* (pp. 245–252). https://doi.org/10.1007/978-981-15-0950-6_38

Zhang, X., Fathollahi-Fard, A. M., Tian, G., Yaseen, Z. M., Pham, D. T., Zhan, Q., & Wu, I. (2024). Human-robot collaboration in mixed-flow assembly line balancing under uncertainty: An efficient discrete bees algorithm. *Journal of Industrial Information Integration*, 41, Article 100676. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2024.100676>

Bölüm 7

GELENEKSEL MALİYET TAHMİN YÖNTEMLERİNDEN YAPAY ZEKÂ TABANLI MODELLERE GEÇİŞ

*İlknur AKCABA¹, Nursena BAYGIN²,
Işıl KARABEY AKSAKALLI³*

1 Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim dalı, Yakutiye/Erzurum, İlk-nur.akcaba26@erzurum.edu.tr, <https://orcid.org/0009-0002-0782-1066>

2 Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim dalı, Yakutiye/Erzurum, nur-senabaygin@erzurum.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0003-4457-5503>

3 Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim dalı, Yakutiye/Erzurum, isil.karabey@erzurum.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-4156-9098>

1. GİRİŞ

Yazılım şirketleri, yazılıma karşı artan talep nedeniyle hızla büyürken, yazılım geliştirme maliyetleri de paralel olarak yükselmektedir (Akhbardeh & Reza, 2021). Yazılım projelerinin karmaşıklıklaşması ve proje ekibi içerisinde birden fazla grup oluşması ve bu grupların yönetilmesi maliyeti arttıran diğer faktörlerdendir. Yazılım projelerinin başarısı, büyük oranda doğru maliyet, zaman ve kaynak tahminine bağlıdır. Tahmin süreci, yazılım geliştirme yaşam döngüsünün ilk aşamalarında maliyetlerin analiz edilmesi ve tahmin edilmesi konusunda proje yöneticilerine yol göstericidir (Gupta vd., 2024)

Doğru tahminler, zaman ve kaynak yönetimini kolaylaştırarak projenin başarısını doğrudan etkiler. Projelerin erken aşamalarda gerçekleştirilen maliyet tahminleri, bütçeleme, planlama ve risk yönetimi süreçlerinin temelini oluştururken; hatalı veya eksik tahminler, projelerin bütçe aşımı, gecikme, hatta başarısızlık gibi sonuçlarla karşılaşmasına neden olmaktadır. Projelerin planlanması, bütçelenmesi ve zamanında teslim edilmesi gibi unsurlar, doğru maliyet tahmini ile doğrudan ilişkilidir ve bu süreç oldukça karmaşık ve zorlu bir görevdir (Singh & Kumar, 2023). Yapılan araştırmalar, yazılım projelerinin %66'sının doğru tahmin yapılamaması nedeniyle olumsuz etkilendiğini ortaya koymuştur (Bloch vd., 2012).

Tahmin edilen rakamların tamamen doğru olması beklenmese de öngörülen değer ile gerçek sonuç arasındaki büyük sapmalar ciddi sorunlara yol açabilir. Aşırı ve yetersiz tahmin, yazılım projelerinde sıkça karşılaşılan iki temel sorundur. Aşırı tahmin, iş kaybına ve kaynakların verimsiz kullanımına neden olabilirken, yetersiz tahmin ise bütçe aşımına, şartnamelere uygun olmayan ürün teslimine veya projenin tamamen başarısız olmasına yol açabilir (Maher & Alneamy, 2022). CHAOS Raporu 2015'e göre projelerin %56'sı bütçe dahilinde tamamlanamamış, projelerin %60'ı son teslim tarihini kaçırmış ve projelerin %44'ü hedeflenen düzeyde tamamlanamamıştır (Maher & Alneamy, 2022).

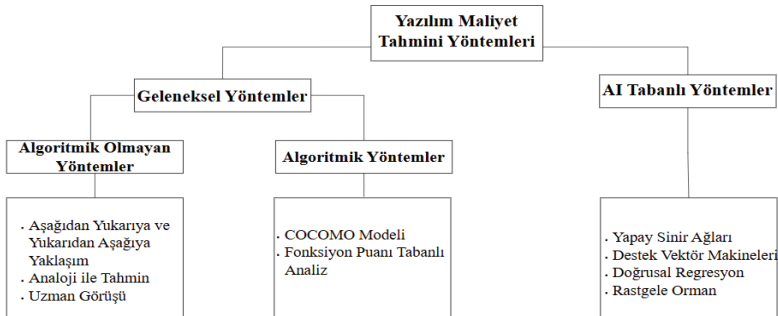
Yazılım maliyet tahmini alanında bugüne kadar birçok model ve teknik geliştirilmiştir. Bu yöntemler, geleneksel (algoritmik ve algoritmik olmayan) ve AI tabanlı (öğrenmeye dayalı) modeller olmak üzere genel olarak iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Geleneksel yöntemler, algoritmik modeller (ör. COCOMO) ve algoritmik olmayan modeller (ör. uzman görüşü) üzerine odaklanır. Son yıllarda, yapay zekâ ve makine öğrenimi tekniklerinin yükselişi, yazılım maliyet tahmini alanında da devrim niteliğinde gelişmelere yol açmıştır. AI tabanlı modeller, büyük veri setleri üzerinde gerçekleştirilen öğrenme süreçleri sayesinde, geleneksel yön-

temlerin öngöremediği karmaşık ilişkileri ve dinamik değişkenleri daha etkin bir şekilde analiz edebilme kapasitesine sahiptir. Bu sayede, proje yöneticileri daha güvenilir ve kesin maliyet tahminlerine ulaşarak, kaynak yönetimi ve proje planlamasında daha sağlam adımlar atabilmektedir. Ancak bilinmelidir ki her bir modelin kendine özgü avantajları ve dezavantajları bulunmakla birlikte, kullanım alanları ve uygulama koşulları da farklılık göstermektedir.

Bu bölümde, yazılım maliyet tahmini alanında geleneksel yaklaşımlardan yapay zekâ tabanlı modellere geçiş süreci detaylı bir şekilde değişen modeller üzerinden incelenecektir. İlk olarak, geleneksel yöntemlerin temel prensipleri, uygulama alanları ve karşılaştıkları zorluklar ele alınacak; ardından, AI tabanlı modellerin nasıl bir alternatif sunduğu, avantajları ve potansiyel sınırlamaları tartışılacaktır. Son olarak, geleneksel ve yapay zekâ tabanlı yaklaşımlar karşılaştırılarak, her iki yöntemin yazılım projelerindeki başarısına katkıları analiz edilecek ve sonuçlandırılacaktır.

2. TAHMİN TEKNİKLERİ ve TAHMİN SÜRECİ

Doğru yapılan yazılım maliyet tahmini, yazılım projelerinin başarıyla tamamlanmasında kritik bir rol oynar. Doğru kullanılan tahmin teknikleri, projelerin zamanında tamamlanmasını, bütçe aşımının önlenmesini ve kaynakların gerektiği verimlilikte kullanılmasını sağlar. Bu süreçte kullanılan yöntemler çok çeşitlidir. Bu bölümde, tahmin teknikleri genel olarak geleneksel yaklaşımlar ve yapay zekâ yaklaşımları olmak üzere iki ana kategoride incelenmiştir. Bu bölümde açıklanacak olan maliyet tahmin yöntemleri, Şekil 1’de gösterildiği gibi başlıklar altında ele alınmıştır. Hiyerarşik yapıda birbirleri ile olan bağlantıları verilmiştir.

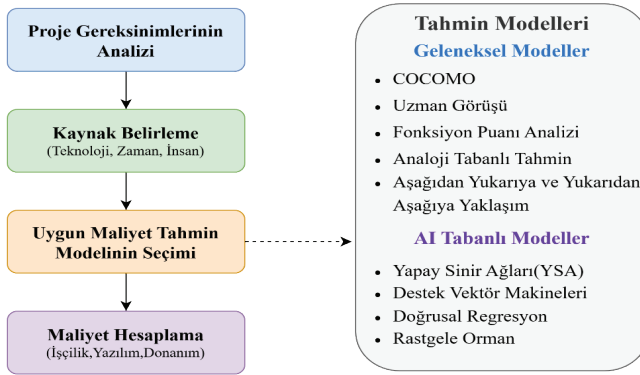


Şekil 1. Yazılım maliyet tahmin yöntemleri ve kategorizasyonu

Tahmin modeli seçmeden önce belirli süreçlerden geçmek gerekmektedir. Bu süreçler Şekil 2’de şematik olarak gösterildiği gibi dört ana başlık altında toplanabilir. İlk olarak, yazılım projesinin gereksinimleri analiz edilir. Bu aşamada projenin kapsamı, hedefleri ve teknik gereksinimleri belirlenerek listelenir. İkinci adımda, kaynak belirleme süreci gerçekleştirilir. Burada projede kullanılacak teknolojiler, zaman çerçevesi ve insan kaynakları planlaması yapılır. Üçüncü adımda, uygun maliyet tahmin modeli seçilir. Projenin özelliklerine bağlı olarak geleneksel veya yapay zekâ tabanlı modeller arasından en uygun yöntem belirlenir. Son olarak, maliyet hesaplama aşamasına geçilir. Bu aşamada işçilik, yazılım ve donanım giderleri hesaplanarak toplam proje maliyeti ortaya çıkarılır.

Bu adımların her biri, maliyet tahmin sürecinin doğruluğunu artırmada kritik bir rol oynar. Şekil 2, sürecin akışını şematik olarak sunmaktadır.

Yazılım Maliyet Tahmin Süreci



Şekil 2. Yazılım maliyet tahmin süreci

3. GELENEKSEL MALİYET TAHMİN MODELLERİ

Geleneksel maliyet tahmin modelleri, uzun yıllar boyunca yazılım projelerinde yaygın olarak kullanılmış ve belirli bir başarı sağlamıştır. Ancak, yazılım projelerinin giderek daha karmaşık hale gelmesiyle birlikte, bu yöntemlerin esneklik ve doğruluk açısından yetersiz kaldığı görülmüş ve günümüzde yerini daha gelişmiş tahmin yöntemlerine bırakmaya başlamıştır. Bu bölümde, geleneksel maliyet tahmin modellerinin algoritmik ve algoritmik olmayan modellerin en yaygın örneklerinden bazıları incelenecektir.

3.1 Algoritmik Olmayan Modeller

Algoritmik olmayan modeller, tahmin sürecinde geçmiş deneyim ve uzman görüşlerinden faydalanır. Ancak bu yöntemler, subjektif değerlendirmelere dayandığı için çoğu zaman yanıltıcı sonuçlar üretebilir (Clancy, 1995). Günümüzde teknolojinin hızla gelişmesi ve deneyim yetersizliği, geçmiş deneyimlere dayalı tahminlerin doğruluğunu azalttığından, bu modellerin kullanımı giderek azalmaktadır. Örnek olarak incelenecek algoritmik olmayan modeller ise şunlardır:

- Uzman Görüşü
- Aşağıdan Yukarıya ve Yukarıdan Aşağıya Yaklaşım
- Analoji ile Tahmin

Uzman Görüşü

Uzman görüşü tekniği geçmişte sıkça kullanılan ve günümüzde bazı küçük ölçekli şirketlerde kullanılmaya devam edilen algoritmik olmayan geleneksel bir tahmin modelidir. Uzman görüşü, yazılım projelerinin maliyet tahmini için bilgi veya deneyim sahibi uzmanlar ve gruplar üzerinden erişim sağlayan bir tahmin yöntemidir. Bu yöntemin büyük ölçüde sezgisel olduğundan dolayı bireysel önyargılara ve politik baskılara duyarlı olabileceği konusunda yaygın bir görüş vardır (Clancy, 1995).

Avantajları:

- Projelerin yazılım maliyet tahmini için geçmiş proje deneyimlerinden yararlanır.
- Önceki projelerden elde edilen bilgi birikimini maliyet tahmini yapılacak olan projeye taşır.
- Veri setine ihtiyaç yoktur, geçmişteki benzer projeleri incelemek fikir sahibi olmak için yeterlidir.

Dezavantajları:

- Uzmanlar, yeni bir yazılım programının maliyetini doğru bir şekilde tahmin etmekte genellikle zorlanır.
- Farklılaşan proje ve teknolojiler ve yeni deneyim edinilecek projelerde tahmin yetisi neredeyse imkansızdır.
- Bu yöntem yazılım maliyet tahmininde farklı yöntemlerle birlikte kullanılırken tek başına kullanımı çok fazla tercih edilmez.

Aşağıdan Yukarıya ve Yukarıdan Aşağıya Yaklaşım

Yazılım maliyet tahmini, aşağıdan yukarıya veya yukarıdan aşağıya yaklaşımlarla incelenebilir. Toplam maliyet tahmini, yazılım projesinin genel özelliklerine ve gerekliliklerine göre projedeki faaliyetlere bölünebilir (yukarıdan aşağıya) veya proje faaliyet tahminlerinin toplamı olarak hesaplanabilir (aşağıdan yukarıya) (Jørgensen, 2004). Yukarıdan aşağıya yaklaşımda proje daha küçük parçalara ve bileşenlerine ayrılır. Bu yöntem sayesinde tahmin edilmesi zor olan büyük parçalar daha netlik kazanır.

Avantajları:

- Minimum ayrıntı ile proje maliyet tahminini hızlı ve basit yöntemle bulunmasını sağlar.
- Sistem seviyesi etkinlikleri; dökümantasyon, entegrasyon gibi etkinliklerde etkilidir.

Dezavantajları:

- Ortaya çıkan tahminin detayları ve gerekçesi sunulmaz.
- Düşük maliyet gerektiren projelerde doğruluğu düşük olabilir.
- Projenin önemli ve riskli unsurları göz ardı edilebilir ve prosedürel sorunların olasılığını arttırır.

Analoji ile Tahmin

Projenin maliyeti, daha önce tamamlanmış, bilgileri ve geliştirme detayları bilinen mevcut benzer projelerin maliyetine göre tahmin edilmektedir (Singh & Kumar, 2023),(Gupta vd., 2024).Yapı, gereklilikler ve teknolojiler seviyeleri bir benzetme kullanılarak maliyet tahmini yapılır.

Avantajları:

- Analoji ile yapılan tahmin, projelerdeki gerçek verilere dayandığı için pratik ve güvenilir bir yaklaşım sunar.
- Maliyet tahmini yapılacak proje ile benzerlikler fazla ise hızlıca sonuca varmak için büyük bir kolaylık sağlar.

Dezavantajları:

- Hızla değişen teknoloji nedeni ile maliyet tahmini yapılacak olan proje benzeri geçmiş projeler bulmak zor olacağından yanlış veya yanıltıcı tahminlere yol açabilir.

□ İki proje arasındaki küçük farklılıklar bile maliyet ve çaba tahminlerini büyük ölçüde etkileyebilir, bu da yöntemin doğruluğunu azaltabilir.

□ Projenin önemli ve riskli unsurları göz ardı edilebilir ve prosedürel sorunların olasılığını artırır.

3.2 Algoritmik Modeller

Algoritmik modeller, matematiksel modellere dayalı olarak geliştirilmiştir ve yazılım maliyetini tahmin etmek için matematiksel modeller kullanılır. Bu matematiksel modeller, araştırma, önceki veriler, yürütülecek işlev sayısı, kaynak kodu satırları ve tasarım, yöntemler, beceriler vb. gibi diğer işlevler gibi girdiler temelinde tasarlanır. Bu modellerin başlıca avantajları arasında şeffaflık, tutarlılık ve nesnellik yer alır. Bununla birlikte dezavantajı olarak, modellerin etkinliği, mevcut veri setlerinin doğruluğuna ve modelin varsayımlarına bağlı olarak iyi veya kötü sonuç verebilir (Boehm vd., 2000). Örnek olarak incelenecek algoritmik olmayan modeller ise şunlardır:

- COCOMO Modeli
- Fonksiyon Puanı Tabanlı Analiz

COCOMO Modeli

COCOMO (Constructive Cost Model), yazılım projelerinin maliyetini tahmin etmek için kullanılan algoritmik bir yöntemdir (Butt vd., 2023). İlk olarak 1981'de Barry W. Boehm tarafından geliştirilmiş olan bu model, yazılımın geliştirme sürecinde harcanacak çabayı, maliyeti ve zamanı tahmin etmek için kullanılır (Obilor vd., 2021). Bu model, maliyeti doğru bir şekilde tahmin etmedeki başarısıyla COCOMO, COCOMO I -II VE III olmak üzere farklı modellere ve yenilikçi varyantlara sahiptir. Günümüzde COCOMO II çok yönlü uygulanabilirlikleri nedeniyle tercih edilmeye devam edilmektedir (Bajusova et al., 2024). Bu modelin güvenilirliğini arttırmak ve parametrelerinin daha iyileştirilmesi için farklı metasezgisel yöntemler ile birlikte kullanılmaktadır (Başar, 2017).

Günümüzde COCOMO III olmasına rağmen COCOMO II modeli sıkça kullanıldığından bu bölümde COCOMO II'nin matematiksel açıklaması yapılacaktır.

Çaba Tahmini (Effort)

Çaba, yazılım projesinin büyüklüğüne ve türüne bağlı olarak kişi-ay cinsinden hesaplanır (Obilor vd., 2021)

$$\text{Effort (PM)} = a \times (\text{Size})^b$$

- **Effort (PM):** Tahmini çaba (Person-Month).
- **a, b:** Proje türüne göre belirlenen katsayılar.
- **Size:** Yazılımın büyüklüğü (KLOC- Bin Satır Kod).

Geliştirme Süresi (Development Time)

Geliştirme süresi, kişi-ay cinsinden tahmin edilen çabanın bir fonksiyonu olarak hesaplanır:

$$\text{Time (TDEV)} = c \times (\text{Effort})^d$$

- **Time (TDEV):** Geliştirme süresi (Ay).
- **c, d:** Proje türüne göre belirlenen katsayılar.
- **Effort:** Çaba (Person-Month).

Personel Sayısı

Tahmini personel sayısı, çaba ve süreye bağlı olarak hesaplanır.

$$\text{Personel Sayısı} = \text{Effort(PM)} \div \text{Time(TEDV)}$$

- **Personel Sayısı:** Projeye atanması gereken tahmini personel sayısı.

- **Effort (PM):** Tahmini çaba (Person-Month).
- **Time (TDEV):** Tahmini geliştirme süresi (Ay).

Geniştirilmiş Çaba Tahmini (Efor Çarpanları ile)

COCOMO II de çaba tahmini efor çarpanları ile daha hassas hale getirilir:

$$\text{Effort (PM)} = a \times (\text{Size})^b \times \prod(\text{EAF})$$

- **Effort (PM):** Tahmini çaba (Person-Month).
- **a, b:** Proje türüne göre belirlenen katsayılar.
- **Size:** Yazılımın büyüklüğü (KLOC- Bin Satır Kod).
- **EAF:** Efor Çarpanları (Effort Adjustment Factors).
- **(EAF):** Tüm efor çarpanlarının çarpımı.

Avantajları:

- Kolay, anlaşılır ve uygulanabilir, daha yüksek doğruluk sağlar.
- Tarihsel verilere dayandığı için daha başarılı sonuçlar elde edilir.
- Matematiksel işlemlere dayandığı için algoritmik olmayan modellerden daha başarılı sonuçlar verir.

Dezavantajları:

- COCOMO modeli geliştirici becerileri, donanım ve diğer parametreleri göz ardı ettiği için değişen durumlara uyum sağlayamaz, bu nedenle verdiği sonuç doğru tahminlerden uzaktır.
- Kaynak kod sayısı başlangıçta belli olmadığından tahminlere kod satır sayısı tahmin edilerek başlanılır, yanlış yapılan tahmin sonucunda yanlış tahminler ortaya çıkar.
- No-Code, Low-Code ile oluşturulacak uygulamalar için geçersiz bir tahmin yöntemidir (Boehm vd., 2000), (Butt vd., 2023).

Fonksiyon Puanı Tabanlı Analiz

Bir yazılım projesindeki işlevsel noktaların ve sistemin karmaşıklığı üzerinden maliyet tahmin yöntemidir (Khan vd., 2020). İşlevsel noktalara belirlerken kullanılan teknoloji veya kaynaklar göz ardı edilir. Dikkat edilen tek şey işlevselliktir. Bilimsel veya teknik içerikli projelerde kullanımı uygun değildir. Çünkü bu tür uygulamalar karmaşık algoritmalar içerir ve tahmin noktasında ciddi ölçekte sorunlara neden olur. Fonksiyon puanları: geliştirme ortamları, dil veya prosedürlerden bağımsızdır; yani işlem donanımı, veritabanı yönetim sistemleri, programlama dilleri veya diğer veri işleme teknolojileri görmezden gelir (Low & Jeffery, 1990).

Avantajları:

- Yazılım geliştirme yaşam döngüsünün erken aşamalarında tek başına kullanımda uygun tahminler verdiği gözlemlenmiştir.
- Projede kullanılan programlama dili ve teknolojiden bağımsız olduğundan her projeye uygulanabilir.
- Kullanıcı etkileşimli uygulamalarda kullanılabilir ve sonuçları doğrudan gözlemlenebilir.

Dezavantajları:

- Kullanılacak teknolojilerin ve ekip becerisinin pek dikkate alınmadığından genellikle yanıltıcı sonuçlar verir.
- Sürekli değişen kullanıcı isteklerinin önceden öngörülmesi mümkün olmadığından değişecek olan maliyeti tahminde yetersiz kalır.

4. YAPAY ZEKÂ VE YAZILIM MALİYET TAHMİNİ

Geleneksel tahmin yöntemleri, genellikle uzman görüşüne, geçmiş verilere veya basit modellere dayanmakta olup, bu durum gerçek sonuçlardan uzak tahminlere, hatalara ve maliyet aşımalarına sıkça yol açmaktadır.

Bu tür sorunların üstesinden gelmek için, günümüzde pek çok alanda kolaylık sağlayan makine öğrenmesi ve derin öğrenme modelleri gibi yapay zekâ tekniklerine olan yönelim artmıştır. Araştırmacılar, çeşitli modelleri problemler üzerinde deneyerek elde ettikleri sonuçları değerlendirmiş ve bu bulguları literatüre kazandırmak amacıyla farklı makaleler

yayınlanmışlardır. Makine öğrenmesi algoritmaları, büyük veri setlerinden desenleri ve ilişkileri çıkarma konusunda dikkate değer bir yetenek sergileyerek, yazılım projelerinin karmaşıklığına dayalı olarak daha doğru tahminler yapılmasını mümkün kılmaktadır. Bu başlıkta makine öğrenmesi ve makine öğrenmesi algoritmaları açıklanacaktır.

4.1. Yazılım Maliyet Tahmininde Makine Öğrenmesi Modelleri

Makine öğrenimine dayalı teknikler, modelin tahmin yeteneği sayesinde, girdi düzeyindeki önemli maliyet parametreleri ile çıktı düzeyindeki maliyet geliştirme çabası arasındaki dağılımın belirlenmesine yardımcı olabilmektedir (Idri vd., 2004). Çeşitli makine öğrenmesi modellerinin kullanılmasının temel amacı, farklı projelerin farklı maliyetler ortaya koyması ve bu farklılıkları algılama konusundaki modellerin başarısını değerlendirmektir. Tahminlerde sıklıkla kullanılan makine öğrenmesi modellerinden bazıları bu bölümde incelenecektir.

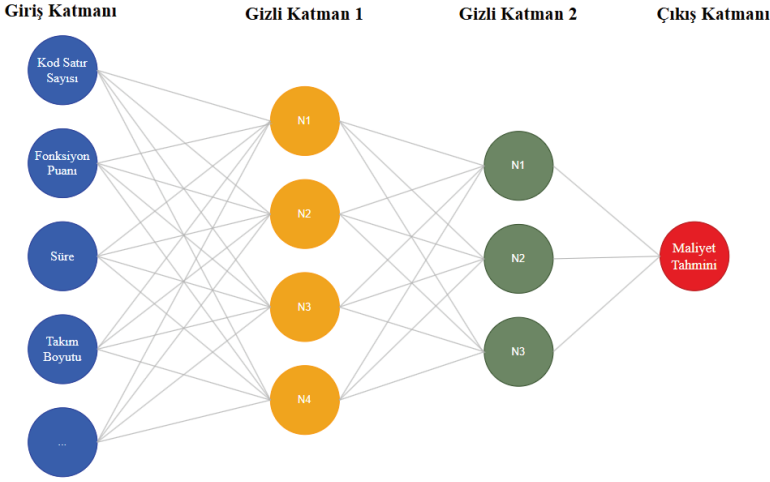
Yapay Sinir Ağları (YSA):

Sinir ağları, tahmin verimliliğine olan yatkınlıkları nedeniyle genellikle yazılım çaba tahminleri için bir teknik olarak kullanılmaktadır. Öğrenme kapasiteleri sayesinde, Yapay Sinir Ağları (YSA) çok çeşitli gerçek dünya senaryolarında son derece etkili olduklarını kanıtlamıştır. Örneğin, YSA öğrenme algoritmaları, maliyet fonksiyonunu optimize etmek için ağırlık değişikliklerine karar verir. Mevcut YSA çıktısı ile beklenen (hedef) çıktı arasındaki göreceli hata oranı, en düşük maliyetle sonuçlanabilmesi nedeniyle en etkili maliyet fonksiyonu olarak değerlendirilmekte, ancak en az sıklıkla kullanılmaktadır bunun nedeni ise yapay sinir ağlarının eğitimi için büyük miktarda veri gerektirmesidir. Büyük verilerin eğitimi hesaplama açısından maliyet gerektirdiğinden pek tercih edilmez (Jadhav et al., 2022).

Sinir ağları, birden fazla katmandan oluşur ve her katman, nöron adı verilen birimlerden meydana gelir, örnek yapay sinir ağı Şekil 3'te gösterilmektedir. Nöronlar, kod satırı sayısı, fonksiyon puanı, süre, takım boyutu gibi girdi ağırlıklarını değerlendirerek bir maliyet tahmini üretir. Bu tahmin sürecinin birincil amacı, gerçek çaba olan çıktıları elde etmektir. Ağırlıkları, ağ çıktıları ile gerçek sonuçları karşılaştırarak değiştirme yeteneği göz önüne alındığında, geri yayımlı sinir ağlarının yazılım çaba tahmini sorunları için en iyi seçim olduğu kanıtlanmıştır. Geri yayılım algoritmaları sayesinde eğitim süreçleri de verimli bir şekilde yönetilmektedir (Gupta vd., 2024).

Yazılım Maliyet Tahmini alanında Yapay Sinir Ağları (YSA) modelleri yaygın olarak kullanılan mimarilerden biridir. Araştırmacılar, yazılım

maliyet tahmini yapmak için geri yayılım ve evrimsel algoritmalar gibi çeşitli YSA modelleri önermiştir. Ancak, öğrenme algoritmalarına yönelik araştırma makalelerinin sayısına bakıldığında, geri yayılım üzerine yapılan çalışmaların üstün olduğu görülmektedir, çünkü bu algoritma uygulamada evrimsel algoritmalarından daha fazla kullanılmaktadır (Tran vd., 2024).



Şekil 3. Yazılım maliyet tahmininde yapay sinir ağı modeli

Destek Vektör Makineleri:

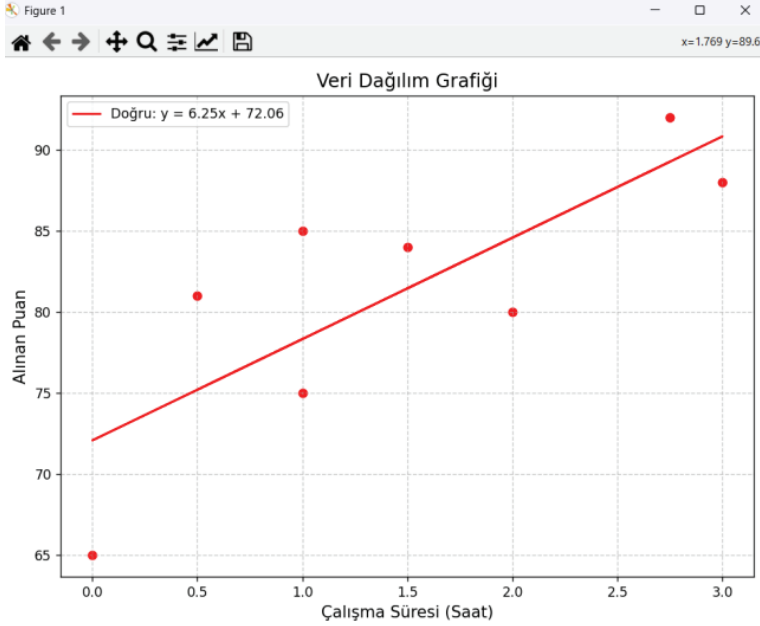
Makine öğrenimi yaklaşımların bir diğeri olan destek vektör makinesi, şirketler arası büyük veri kümeleri için çaba tahmini yapılmasında kullanılan etkili yöntemlerden biridir. DVM, çeşitli ve heterojen veri parçalarına uyum sağlayabilme yeteneği sayesinde bu alanda yararlı bir teknik olarak öne çıkmaktadır. (Butt vd., 2023). DVM'nin temel avantajı, basit ve etkili bir aykırı değer belirleme ve çıkarma prosedürü uygulayarak, araştırılan tahmin tekniği yöntemlerinin performansını artırabilmesidir.

Doğrusal Regresyon (LR):

Bir değişkenin ilişkisini diğer değişkenlere göre analiz etmek için kullanılan doğrusal bir yaklaşımdır. Bağımsız değişkenlerin değerleri verildiğinde bağımlı değişkenin değerini tahmin etmek için kullanılır. Doğrusal regresyon, yazılım maliyet tahmininde yaygın olarak kullanılan bir tekniktir (Maher & Alneamy, 2022). Performans açısından genellikle düşük sonuçlar verir bunun nedeni ise küçük veri kümeleri ile çalışabil-

me yeteneğidir. Ayırık değerlere duyarlı olmadığı diğer tercih sebeplerinden biridir. Şekil 4'deki grafik, çalışma süresi (saat) ile alınan puan arasındaki doğrusal regresyon analizini gösteren basit bir örnektir.

Şekil 4. Örnek bir doğrusal regresyon analizi



Şekil 4'de gösterilen grafik, çalışma süresi (bağımsız değişken, X eksenini) ile alınan puan (bağımlı değişken, Y eksenini) arasındaki doğrusal ilişkiyi modellemektedir. Regresyon doğrusu, veriler üzerinden elde edilen en iyi doğrusal tahmini göstermekte olup, modelin şu şekilde bir regresyon denklemi oluşturduğu görülmektedir:

$$y=6.25x+72.06$$

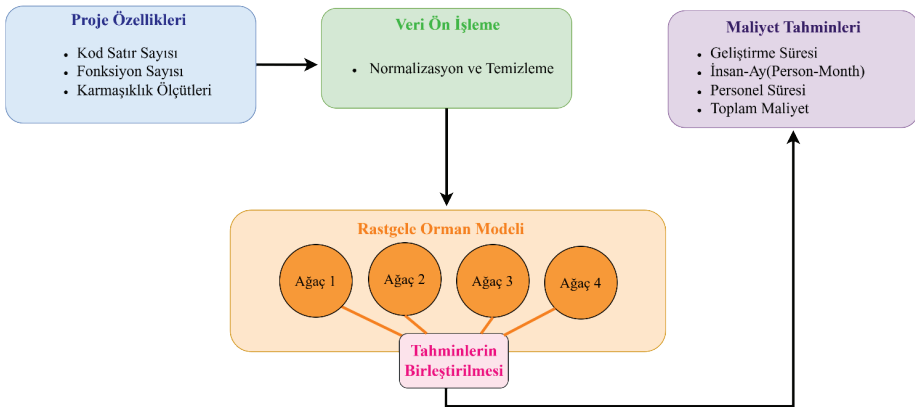
Bu denklem, çalışma süresinin her bir saatlik artışının alınan puana ortalama 6.25 birimlik bir katkı sağladığını göstermektedir. Kesme noktası (intercept) olan 72.06 değeri ise çalışma süresi sıfır olduğunda ($x = 0$) tahmin edilen başlangıç puanını ifade etmektedir. Bu model, yazılım maliyet tahmini açısından önemli bir temel sunmaktadır. Çünkü yazılım projelerinin maliyeti, genellikle satır sayısı (Lines of Code - LOC), işgücü saatleri veya karmaşıklık ölçütleri gibi bağımsız değişkenlere bağlıdır. Liner regresyon modeli, bu tür değişkenler kullanılarak yazılım projelerinin toplam maliyetini tahmin etmek için kullanılabilir. Ancak, yazılım

maliyet tahmininde doğrusal varsayımlar her zaman geçerli olmayabilir ve bazı durumlarda logaritmik veya polinom regresyon modellerine ihtiyaç duyulabilir.

Rastgele Orman (RF):

Sınıflandırma ve regresyon için birçok karar ağacı bir arada kullanılır ve her bir ağacın bağımsız tahmini birleştirilerek daha doğru bir sonuç elde edilir (Umoh et al., 2022). Şekil 5'te örnek bir rastgele orman algoritmasının maliyet tahmini yaparken nasıl çalıştığının mantığı verilmiştir. İlk olarak yazılım projesinin karmaşıklığını tanımlayan değişkenler belirlenir. Bu değişkenler veri kümesini oluşturur. Tahmin doğruluğunu arttırmak için veriler belirli ön işleme adımlarından geçirilir. Normalizasyon ve temizleme işlemleri ile verilerin tutarlı hale getirilmesi sağlanır. Eğitilmiş model, birden fazla karar ağacı oluşturarak her bir ağacı eğitim verisi ile besler. Her ağaç bağımsız olarak eğitilir ve belirli kurallara göre tahminlerde bulunur. Model, geliştirme süresi, insan-ay hesaplaması, personel sayısı ve toplam maliyet gibi metrikler üzerinden tahminlerde bulunur.

Maliyet tahmini için farklı ağaçlardan elde edilen sonuçlar birleştirilerek daha doğru bir tahmin elde edilir. Rastgele orman algoritmasının en önemli avantajı, tek bir karar ağacına bağlı kalmadan birden fazla modelin tahminlerini bir araya getirmesidir. Ortalamaların alınması veya çoğunluk oylaması yöntemiyle nihai tahmin belirlenir. Böylece model, tek bir ağaç yöntemine kıyasla daha doğru ve güvenilir maliyet tahminleri üretir. Bu süreç, yazılım maliyet tahmini gibi karmaşık problemlerde daha sağlam ve hassas tahminler yapılmasını sağlar.



Şekil 5. Rastgele Orman (Random Forest) algoritması ile maliyet tahmini

Yapay Zekanın Tahmindeki Avantajları:

- Makine öğrenimi ve yapay zekâ tabanlı tahmin modelleri, tahmin yeteneklerini geçmiş verilere dayandırır. Veri miktarı arttıkça, modelin tahmin doğruluğu ve başarısı da artış gösterir (Akhbardeh & Reza, 2021).
- Makine öğrenimi metodolojileri, işleme yetenekleri sayesinde uyarlanabilir bilgiler sunarak gerçek yaşam koşullarını ele alabilir ve daha gerçekçi sonuçlar üretebilir.
- Makine öğrenmesi yöntemleri bir arada kullanılarak işlem yetenekleri arttırılabilir ve daha doğru sonuçlara ulaşılabilir.
- Yapay zekâ tabanlı modeller, büyük veri kümelerini işleyebilme kapasitesine sahiptir ve bu sayede kompleks ilişkileri daha iyi analiz eder.
- İnsana dayalı tahminlerde oluşan önyargı ve hatalar yapay zekâ modellerinde minimize edilebilir.
- Yapay zekâ algoritmaları, sektöre ve projeye özel olarak uyarlanabilir ve farklı ihtiyaçlara göre optimize edilebilir.
- Yapay zekâ, büyük miktarda veriyi hızlı bir şekilde işleyerek manuel analiz süreçlerini kısaltır.

Yapay Zekanın Tahmindeki Dezavantajları:

- Modeller, kullanılan verinin doğruluğu ve kalitesine bağlıdır. Hatalı veya eksik veriler, tahminlerin yanlış olmasına neden olabilir.
- Model, öğrenme sırasında eğitildiği veri setine aşırı uyum sağlayabilir ve yeni verilere genelleme yapmakta zorlanabilir.
- Gelişmiş yapay zekâ algoritmaları, büyük hesaplama kaynakları ve güçlü donanım gerektirir.
- Bazı yapay zekâ modelleri, özellikle derin öğrenme tabanlı yaklaşımlar, sonuçların nasıl elde edildiğini açıklamakta zorlanabilir.
- Kullanıcı ihtiyaçlarındaki hızlı değişimler, yapay zekanın tahmin doğruluğunu düşürebilir.
- Yüksek doğruluk elde etmek için gereken model eğitimi ve iyileştirme süreçleri maliyetli olabilir.

Yapay Zekâ Modelleri Ve Geleneksel Tahmin Yöntemlerin Karşılaştırılması

Geleneksel tahmin yöntemleri ile yapay zekâ tabanlı yöntemlerin karşılaştırılması amacıyla, Tablo 1’de farklı kriterler doğrultusunda bir karşılaştırma sunulmuştur.

Tablo 1. Geleneksel yöntem ve AI tabanlı yöntemlerin karşılaştırılması

Kriter	Geleneksel Yöntemler	AI Tabanlı Yöntemler
<i>Doğruluk</i>	Orta düzeyde doğruluk sağlar.	Daha yüksek doğruluk sağlar.
<i>Esneklik</i>	Sınırlı esnekliğe sahiptir.	Daha esnek ve özelleştirilebilir.
<i>Veri İhtiyacı</i>	Az veri ile çalışabilir.	Büyük ve kaliteli veri setlerine ihtiyaç duyar.
<i>Uygulama Kolaylığı</i>	Kolay uygulanabilir, daha basit yapıdadır.	Karmaşıktır ve uzmanlık gerektirir
<i>Geliştirme Maliyeti</i>	Düşük maliyetlidir.	Yüksek maliyetlidir.
<i>Teknoloji Uyumu</i>	Geleneksel teknolojilere daha uygundur.	Modern teknolojilere ve dinamik projelere daha uyumludur.

5. SONUÇLAR

Doğru yapılan maliyet tahminleri, proje yöneticilerinin bilinçli kararlar almasına, proje zaman çizelgelerini doğru bir şekilde oluşturmaya, insan ve teknolojik kaynakları verimli bir şekilde yönetmesine olanak tanır. Bu nedenle, tahmin prosedürlerinin doğru bir şekilde sunulması ve vurgulanması, kesin ve güvenilir değerlendirmeler elde etmek açısından büyük önem taşır. Bu çalışmada, geçmişten günümüze yazılım maliyet tahmininde kullanılan yöntemler incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Yazılım proje yöneticileri, tahmin yaklaşımlarını tanımlayarak ve kullanarak proje koşullarına ve ilerlemeye uygun en doğru tahmin yöntemini seçebilir. Bu da proje başarısızlıklarını azaltmada önemli bir katkı sağlayabilir.

Her tahmin stratejisi belirli projelerde uygulanabilirliğe sahip olmakla birlikte, hiçbir yöntem tüm olası koşullarda en iyi tahmini sağlamaz. Bu nedenle, doğru tahmin tekniğinin seçimi, kullanılan yöntemin temel ilkelerinin anlaşılmasını gerektirir. Ayrıca, herhangi bir tahmin yaklaşımının etkinliği, projenin karmaşıklığı, süresi, ekip üyelerinin yetkinliği ve kullanılan geliştirme stratejisi gibi birçok faktörden etkilenir. Sonuç olarak, yazılım projelerinin başarılı bir şekilde yönetilmesi için doğru

tahmin tekniklerinin seçimi ve uygulanması, proje süreçlerinin kritik bir unsuru olarak değerlendirilmeli ve bu doğrultuda çalışmalar sürdürülmelidir.

KAYNAKLAR

- Akhbardeh, F., & Reza, H. (2021). A Survey of Machine Learning Approach to Software Cost Estimation. 2021 IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT), 405-408. <https://doi.org/10.1109/EIT51626.2021.9491912>
- Başar, A. (2017). Klasik ve Sezgisel Bulanık İkili Karşılaştırma ile Yazılım Geliştirme Projelerinin Maliyet Tahmini: Uygulama Örneği. Bilişim Teknolojileri Dergisi, 129. <https://doi.org/10.17671/gazibtd.309269>
- Bloch, M., Blumberg, S., & Laartz, J. (2012). Delivering large-scale IT projects on time, on budget, and on value. McKinsey on Business Technology, 27. <http://www.mckinsey.com/business-functions/digital-mckinsey/our-insights/delivering-large-scale-it-projects-on-time-on-budget-and-on-value>
- Boehm, B., Abts, C., & Chulani, S. (2000). Software development cost estimation approaches — A survey. Annals of Software Engineering, 10(1), 177-205. <https://doi.org/10.1023/A:1018991717352>
- Butt, S. A., Ercan, T., Binsawad, M., Ariza-Colpas, P.-P., Diaz-Martinez, J., Piñeres-Espitia, G., De-La-Hoz-Franco, E., Melo, M. A. P., Ortega, R. M., & De-La-Hoz-Hernández, J.-D. (2023). Prediction based cost estimation technique in agile development. Advances in Engineering Software, 175, 103329. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2022.103329>
- Gupta, R. G., Dumka, A., & Mazumdar, B. D. (2024). Software Cost Estimation: A Comparative Analysis. 2024 International Conference on Computer, Electrical & Communication Engineering (ICCECE), 1-8. <https://doi.org/10.1109/ICCECE58645.2024.10497286>
- Idri, A., Mbarki, S., & Abran, A. (2004). Validating and understanding software cost estimation models based on neural networks. Proceedings. 2004 International Conference on Information and Communication Technologies: From Theory to Applications, 2004., 433-434. <https://doi.org/10.1109/ICTTA.2004.1307817>
- Jørgensen, M. (2004). Top-down and bottom-up expert estimation of software development effort. Information and Software Technology, 46(1), 3-16. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2003.07.002>
- Khan, B., Khan, W., Arshad, M., & Jan, N. (2020). Software cost estimation: Algorithmic and non-algorithmic approaches. International Journal of Data Science and Advanced Analytics, 2(2), 1-5.
- Low, G. C., & Jeffery, D. R. (1990). Function points in the estimation and evaluation of the software process. IEEE Transactions on Software Engineering, 16(1), 64-71. <https://doi.org/10.1109/32.44364>
- Maher, M., & Alneamy, J. S. (2022). An Ensemble Model for Software Development Cost Estimation. 2022 5th International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems (ISRITI), 346-350. <https://doi.org/10.1109/ISRITI56927.2022.10052861>
- Obilor, N. A., Onyekachi, A. A., Chibuike, A. B., & Donatus, N. O. (2021).

Constructive Cost Model II Metrics for Estimating Cost of Indigenous Software. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 8(7). <https://journal-repository.com/index.php/ijaers/article/view/3889>

- Singh, S., & Kumar, K. (2023). Software Cost Estimation: A Literature Review and Current Trends. 2023 Third International Conference on Secure Cyber Computing and Communication (ICSCCC), 469-474. <https://doi.org/10.1109/ICSCCC58608.2023.10176495>
- Tran, N., Tran, T., & Nguyen, N. (2024). Leveraging AI for Enhanced Software Effort Estimation: A Comprehensive Study and Framework Proposal. <https://arxiv.org/abs/2402.05484>
- Umoh, U. A., Eyoh, I. J., Murugesan, V. S., & Nyoho, E. E. (2022). Fuzzy-machine learning models for the prediction of fire outbreaks: A comparative analysis. In *Artificial Intelligence and Machine Learning for EDGE Computing* (pp. 207–233). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824054-0.00025-3>
- Bajusova, D., Silhavy, P., & Silhavy, R. (2024). Enhancing Software Effort Estimation With Self-Organizing Migration Algorithm: A Comparative Analysis of COCOMO Models. *IEEE Access*, 12, 67170–67188. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3399060>
- Jadhav, A., Kaur, M., & Akter, F. (2022). Evolution of Software Development Effort and Cost Estimation Techniques: Five Decades Study Using Automated Text Mining Approach. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022, 1–17. <https://doi.org/10.1155/2022/5782587>

Bölüm 8

ÇOK UZUN ZİNCİRLİ DOYMAMIŞ YAĞ ASİTLERİ VE SAĞLIK ETKİLERİ

Seval ANDİÇ¹, Ayhan BAŞTÜRK²

1 Prof. Dr., Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, sevalandic@yyu.edu.tr ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8306-0222>

2 Doç. Dr., Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, ayhanbasturk@yyu.edu.tr ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7701-9306>

1. GİRİŞ

İnsan beslenmesi temel olarak, makro besinler olan protein, lipid ve karbonhidratlar ile mikro besinler olan vitamin ve mineraller dayanır. Makro besinler, vücuda alındıktan sonra mekanik, kimyasal ve enzimatik parçalanmaya uğratılarak bileşenlerine ayrılır ve bu bileşenlerin uygun olanları ihtiyaç doğrultusunda kullanılır. Gıdalar aracılığı ile vücuda alınan gıda bileşenlerinin bazıları, beslenme yararlarının yanında bir takım sağlık faydaları da oluşturmaktadır. Omega-3 ve omega-6 grubu yağ asitleri, sağlık faydaları da sağlayan besin bileşenlerinden bazılarıdır. Yapılan bazı epidemiyolojik ve randomize kontrollü çalışmalar, çok uzun zincirli Omega-3 yağ asitlerinden eikosapentanoik asit (EPA), dokosapentanoik asit (DPA) ve dokosaheksanoik asit (DHA) gibi yağ asitleri ile olumlu sağlık etkileri arasında pozitif bir korelasyon olduğunu göstermektedir. Ancak fizyolojik etki yağ asidi çeşidine göre değişmektedir.

2. OMEGA-3 VE OMEGA-6 YAĞ ASİTLERİ

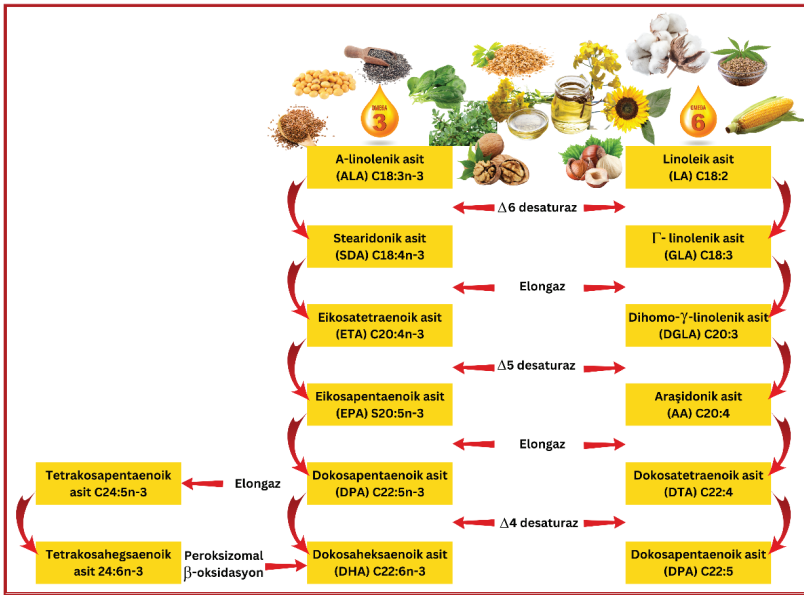
Omega isimlendirmesi, yağ asitlerinin metil grubu baz alınarak yapılan bir adlandırma şeklidir ve bu isimlendirme, metil grubuna en yakın çift bağ dikkate alınarak yapılır. Çift bağ, metil grubuna ne kadar yakınsa, yağ asidinin biyolojik değeri de o kadar yüksektir. İnsan vücudunda sentezlenemeyen ve esansiyel olarak nitelendirilen yağ asitleri, omega-3 (α -linolenik asit) ve omega-6 (linoleik asit) grubundadır. Araşidonik asit ise, ancak linoleik asit varlığında sentezlenebildiği için esansiyel yağ asitleri grubuna dahil edilir (Bradberry ve Hilleman, 2013).

Kara ve su bitkilerinin yapılarında bulunan Omega-3 ve Omega-6 yağ asitleri, memeli vücudunda daha uzun zincirli ve daha yüksek doymamışlığa sahip yağ asitlerine metabolize edilebilir. Çok uzun zincirli doymamış yağ asitleri olarak nitelendirilen bu yağ asitlerinden özellikle EPA, DPA DHA'nın üzerinde sağlık etkileri nedeniyle çok sayıda çalışma yapılmıştır (Deckelbaum ve Torrejon, 2012; Swanson vd., 2012). Bu yağ asitlerinin en iyi kaynakları olarak, soğuk sularda yaşayan dip balıkları gösterilmektedir. Ancak, çok uzun zincirli doymamış yağ asitleri için asıl kaynak fitoplankton ve deniz yosunlarıdır. Fitoplankton ve deniz yosunlarının tüketilmesiyle balıkların vücuduna alınan, özellikle Alfa-linolenik asit (ALA) yüksek hidrostatik basınç altında çok uzun zincirli çoklu doymamış yağ asitlerine metabolize edilmektedir (Baştürk ve Andiç, 2025; Narayan vd., 2006).

Çok uzun zincirli doymamış yağ asitlerinin sentezinde, omega-3 ve omega-6 yağ asitleri aynı yolu kullandıklarından aralarında rekabet vardır. Ortamda eşit miktarlarda bulunduklarında omega-3, omega-6'ya tercih edilir. Ancak omega-6 miktarı omega-3'ten fazlaysa tercih omega-6 yönünde olur.

Çok uzun zincirli doymamış yağ asitlerinin sentezinde stearidonik asit (SDA) bir ara üründür ve ALA'nın ilk metabolitidir. EPA'nın SDA'dan biyosentezi, bu ilk katalitik adımı gerektirmediği için EPA sentezinde SDA, ALA'dan daha verimli olarak kabul edilir ve bu gelişmiş dönüşüm nedeniyle SDA, "pro-EPA" olarak adlandırılır (Calder, 2025).

Linoleik, linolenik ve stearidonik asitler, kara bitkileri tohum yağlarında nispeten yüksek oranlarda bulunurlar. Bunun nedeni ise kara bitkilerinin, bu yağ asitlerinin daha uzun zincirli ve daha fazla doymamışlığa sahip yağ asitlerine metabolize edilmesinde rol alan enzim sistemlerine sahip olmamalarıdır (Parsad vd., 2020). Balık ve memelilerde ise ALA ve SDA'nın EPA ve DHA'ya metabolize edildiği bilinmektedir. Ancak bu dönüşüm memelilerde genellikle sınırlıdır. Omega-3 ve omega-6 yağ asitleri, peroksizomlarda meydana gelen son β -oksidasyon reaksiyonu hariç, başlıca endoplazmik retikulum içinde meydana gelen bir dizi uzama ve doymunluk giderme süreciyle EPA ve DHA'ya dönüştürülür (Şekil 1) (Baker vd., 2016; Sprecher, 1999).

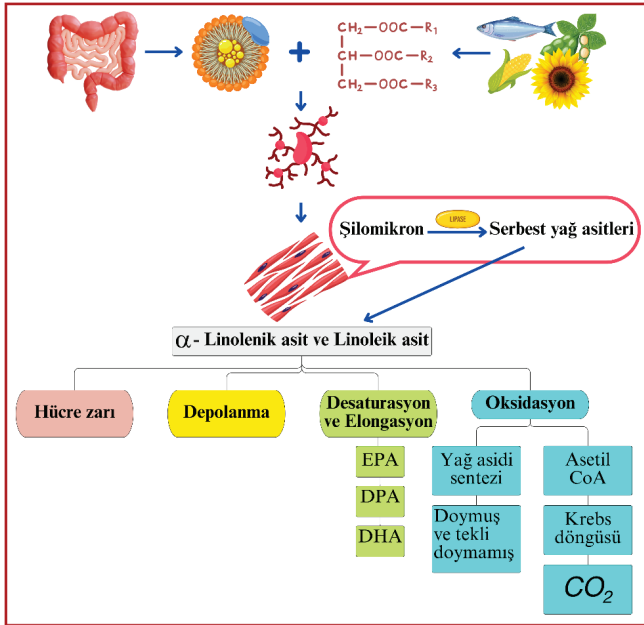


Şekil 1. Alfa-linolenik ve linolik asitlerin daha uzun zincirli çoklu doymamış yağ asitlerine metabolik dönüşüm yolları

EPA ve DHA'ya kıyasla yüksek oranda ALA alımında bile yağ dokusu depoları hariç plazma, hücre ve doku lipidlerindeki ALA konsantrasyonları EPA ve DHA'dan daha düşüktür. Kanda, hücrelerde ve çoğu dokuda

ALA düzeylerinin EPA ve DHA düzeylerinden çok daha düşük olması, ALA'nın birincil biyolojik rolünün EPA ve DHA sentezi için bir substrat olabileceği anlamına gelmektedir. Omega-3 ve omega-6 yağ asitlerinin daha uzun zincirli yağ asitlerine dönüşümünün karaciğerde olduğu düşünülmektedir. Sağlıklı insanlarda yapılan klinik deneyler, oleik, linoleik ve linolenik asitlerin bağırsaklardan emilim ve kan dolaşımına salımlarının benzer ve biyoyararlanımlarının yüksek olduğunu göstermektedir (Kris-Etherton vd., 2003).

Vücuda alınan ve bağırsaklardan emilen trigliseritler, öncelikle şilomikron parçacıkları tarafından dolaşıma dahil edilir ve dokulara taşınır. Şilomikron triaçilgliserolü, bu dokularda bulunan lipoprotein lipaz tarafından hidrolize edilir ve bu reaksiyon sonucunda açığa çıkan şilomikron kalıntıları, yapılarındaki yağ asitlerinin işlenmesi amacı ile hepatik reseptörler aracılığıyla karaciğere taşınır. Diyetle alınan ve bu yolla dokularda açığa çıkan ALA ise hücre membranlarında kullanılabilir, depolanabilir (çoğunlukla yağ dokusunda), bir çok hücre ve doku için gerekli olan enerjinin üretiminde kullanılabilir veya desaturasyon ve elongasyon ile daha uzun zincirli ve daha yüksek doymamışlığa sahip yağ asitlerine metabolize edilebilir (Şekil 2). (Baker vd., 2016).



Şekil 2. İnsanlarda α-linolenik ve linoleik asitlerin ana metabolik yolları

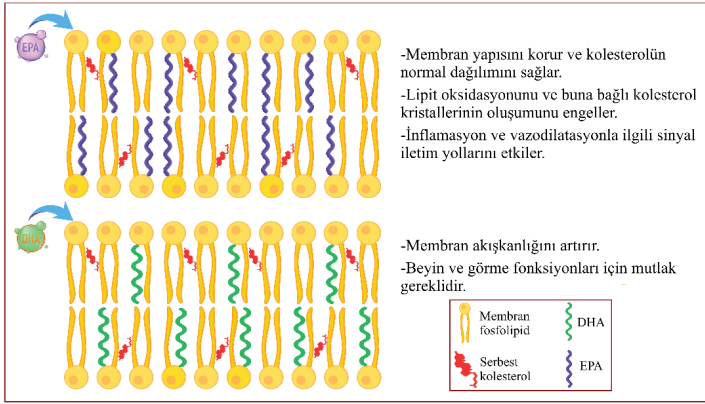
Ancak, insan vücudunda ALA'nın EPA ve DHA gibi çok uzun zincirli doymamış yağ asitlerine dönüşümü oldukça zayıftır. ALA'nın EPA'ya dönüşümü yalnızca %8 - 12 ve DHA'ya dönüşümü ise çok %1 gibi çok düşük düzeylerde (Burge vd., 2002; Burge ve Wootton, 2002). Bu nedenle Dünya Sağlık Örgütü (WHO) ve Amerikan Kalp Derneği dahil birçok bilimsel kuruluş tarafından, kronik kalp rahatsızlığı olmayan bireyler için en az 500 mg/gün EPA + DHA, kronik kalp hastalığı olan bireyler için ise 1 g/gün EPA + DHA alınması önerilmektedir. Sağlıklı bireyler için önerilen 500 mg EPA + DHA, haftada yaklaşık iki porsiyon yağlı balık tüketimine denk gelmektedir (Aterburn vd., 2006; Kris-Etherton vd., 2003). Şekil 3'te bazı uzun ve çok uzun zincirli doymamış yağ asitlerinin önemli kaynakları verilmiştir (Astorg vd., 2004; Sioen vd., 2006; Surette, 2013; Guil-Guerrero, 2007; Connor 1999; Curpi ve Cuzzocrea, 2022).

Bazı uzun zincirli yağ asitlerinin önemli kaynakları		
LA Linoleik Asit	Soya yağı, Mısır yağı, Ayçiçek yağı, Fıstık yağı, Kuruyemişler	
ALA Alfa-linolenik Asit	Keten tohumu, Kolza tohumu, Soya yağı, Kuruyemişler	
SDA Stearidonik Asit	Kenevir tohumu, Frenk üzümü tohumu, <i>Micelophycus simples</i> , <i>Scytosiphon lomentarius</i> , <i>Undaria pinnatifida</i>	
EPA Eikosapentaenoik Asit	Yağlı balık, Balık yağı, Kırmızı et, Beyaz et	
DPA Dokosapentaenoik Asit	Yumurta, Kırmızı et, Beyaz et	
DHA Dokosaheksaenoik Asit	Yağlı balık, Balık yağı, Kırmızı et, Beyaz et, Yumurta	

Şekil 3: Bazı uzun ve çok uzun zincirli doymamış yağ asitlerinin önemli kaynakları

3. ÇOK UZUN ZİNCİRLİ DOYMAMIŞ YAĞ ASİTLERİNİN SAĞLIK ETKİLERİ

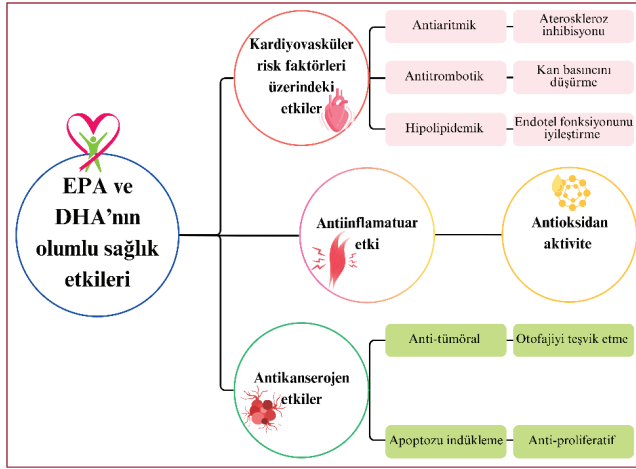
Çok uzun zincirli doymamış yağ asitlerinden olan EPA ve DHA, yapı ve işlev açısından çok önemli olan hücre zarının yapısındaki fosfolipitlere *sn*-2 pozisyonunda bağlanırlar. Hücre zarı yapısındaki EPA ve DHA; membran yapısının korunması, lipid oksidasyonunun engellenmesi, membran akışkanlığının arttırılması, kolesterol kristalleri oluşumunun engellenmesi gibi çok önemli işlevlere katkıda bulunurlar (Şekil 4) (Holman, 1971; Mason vd., 2020; Mititelu vd., 2024).



Şekil 4: EPA ve DHA'nın membran fosfolipid interaksyonu

Özellikle DHA, memelilerin çoğunlukla beyin ve retinasında yoğunlaşmıştır ve bu nedenle beyin ve görme fonksiyonları için mutlak gereklidir. Memelilerde fetal gelişim ile doğumdan sonra beyin ve retinadaki önemli biyokimyasal noktaların tamamlanmasına kadar olan süreçte DHA'nın vücuda alınması kritik öneme sahiptir. Konuyla ilgili yapılan çalışmalarda, diyetlerinde bu yağ asitleri eksik olan hayvanların görme ve öğrenme yeteneklerinin bozulduğu bildirilmiştir (Alessandri vd., 2004; Riediger vd., 2009).

Çok uzun zincirli doymamış yağ asitlerinin sağlık etkileri üzerinde yapılan epidemiyolojik, randomize kontrollü, *in vitro* ve *in vivo* çalışmalar, EPA ve DHA'nın önemli bazı hastalıklar üzerinde olumlu etkilerinin olduğunu göstermiştir. Bu olumlu sağlık etkilerinin bazıları; antikanse-rojen, antiaritmik, antitrombotik, hipolipidemik, antiinflamatuvar ve aterskleroz üzerinde olan inhibitör etkilerdir (Şekil 5) (Chapkin vd., 2009; Rose ve Connolly, 1999; von Schacky ve Harris, 2007).



Şekil 5: EPA ve DHA'nın bazı olumlu sağlık etkileri

3.1. Antikanserojen Etki

Kanser (karsinogenez), hücre farklılaşması, çoğalması ve programlanmış hücre ölümü (apoptozis) gibi hassas bir şekilde kontrol edilen mekanizmaların bozulması veya işlev bozukluğu ile oluşan çok aşamalı bir süreçtir. Bu süreç sonucunda, kanser hücrelerinin karakteristik hızlı büyümesi ve yayılması gerçekleşir (Mareel vd., 2003). Kansere karşı mücadelede, apoptoz ve hücre çoğalması gibi düzensiz süreçlerin kontrolünü sağlamada biyoaktif gıda bileşenlerinin olumlu etkilerinin olduğu çeşitli epidemiyolojik çalışmalarla gösterilmiştir (Abel vd., 2014).

Çok uzun zincirli omega-3 yağ asitlerinin meme, kolon, prostat, cilt, mide ve akciğer gibi yaygın kanser türlerine karşı koruyucu etki gösterdiğine dair hem epidemiyolojik hem de deneysel kanıtlar bulunmaktadır (Akihisa vd., 2004; Biondo vd., 2008; Kato vd., 2002; Kuriki vd., 2007; Noguchi vd., 1997; Rose ve Connolly, 1999; Rovito vd., 2015). Ancak bu yağ asitlerinin antikanser etkileri eşit düzeyde değildir. *İn vitro* çalışmalarda, çok uzun zincirli omega-3 yağ asitleri arasında DHA'nın en güçlü anti-neoplastik ajan olduğu kanıtlanmıştır (Kato vd. 2002; Serini vd., 2011b).

Çok uzun zincirli omega-3 yağ asitlerinin antikanser etkilerine ilişkin iddialar, bu yağ asitlerinin farklı doz ve kombinasyonlarının kullanıldığı erken klinik öncesi hayvan deneyleriyle doğrulanmıştır (Karmali vd., 1984; Kinoshita vd., 1994; Reddy, 1992; Reddy vd., 1991). Bu yağ asitleri, tümör hücrelerinin apoptoza duyarlılığını artırarak ve böylece kemoterapinin etkinliğini güçlendirerek faydalı etki oluşturmaktadırlar (Biondo vd., 2008; Dijk vd., 2019; Kato vd., 2002; Rovito vd., 2015). İnsan kanser

hücre hatları, hayvan modelleri ve insan deneklerle yapılan ön çalışma sonuçları, diyetle alınan EPA ve DHA'nın kanser tedavisinde kullanılan birçok ilacın toksisite veya aktivitesini değiştirebileceğini göstermiştir (Bindo vd., 2008). Çok uzun zincirli omega-3 yağ asitleri ayrıca, mikroskobik metastatik odakların ilerlemesi üzerinde kemosüpresif bir etki göstererek (Rose ve ark., 1996) ve önemli tümör baskılayıcı özellikleri ile de antikanser etki oluşturmaktadırlar (Kato vd., 2002; Vara-Messler vd., 2017).

Omega-3 DHA ve EPA'nın, kanserler üzerinde potansiyel sağlık yararları olan dopaminler gibi aminlerle veya antikanser ilaçlarla oluşturulan konjugatlarının da kanser tedavilerinde yeni adjuvan terapötik müdahaleler belirlemede biyolojik öneme sahip olabileceği bildirilmektedir (Bradley vd., 2001; Bonofiglio vd., 2016; Rovito vd., 2015).

3.2. Kardiyovasküler Risk Faktörleri Üzerindeki Etkileri

Çeşitli faktörlerin etkisine bağlı olarak kalp-damar hastalıklarının görülme sıklığı giderek artmaktadır. Dünyada meydana gelen toplam ölümlerin nedenleri arasında iskemik kalp hastalıkları 1. sırada yer almakta ve iskemik kalp hastalıklarından meydana gelen ölümler, toplam ölümlerin % 13'nü oluşturmaktadır (WHO, 2024).

Balık gibi doğal kaynaklar veya gıda destekleri aracılığı ile düzenli olarak EPA ve DHA tüketimin kardiyovasküler hastalıkların riskini azalttığı yaygın kabul görmektedir. Yüksek miktarda balık tüketen Alaska yerlileri, Eskimolar ve Japonlar'da kalp-damar hastalıklarından ölüm oranları, diğer toplumlara göre önemli düzeyde daha düşüktür (Bang vd., 1980; Kromann ve Green, 1980). Son yıllarda EPA ve DHA'nın kardiyovasküler sağlık üzerindeki etkileri, sınırlı klinik ve çok sayıda *in vivo* ve *in vitro* çalışmada araştırılmış ve bu bileşenlerin kalp damar sağlığını destekleyecek antiinflamatuvar, antiaritmik ve antikoagülan etkileri olduğu kanıtlanmıştır (Cottin vd., 2011; He vd., 2004).

EPA ve DHA; aritmiyi önleme, kalp atış hızını düşürme, kan basıncını düşürme, aterosklerozu inhibe etme ve trombozu önleme gibi etkileriyle kardiyovasküler hastalıkların önlenmesi üzerinde etkili olmaktadır. Ancak EPA ve DHA'nın bu olgular üzerindeki etkinlikleri benzer değildir. Geniş bir literatür, saflaştırılmış EPA ve DHA'nın kardiyovasküler hastalıkların ve ilgili patolojik durumların önlenmesinde farklı etkilere sahip olabileceğini öne sürmektedir (von Schacky ve Harris, 2007). Çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre; kan basıncı ve kalp atış hızını düşürme, aritmiyi önleme ve trombosit agregasyonunu azaltmada DHA, EPA'ya göre daha etkilidir (Mori vd., 1999). Ancak bu iki yağ asidinin vasküler etkileri arasında fark olup olmadığı henüz netleşmemiştir. Bununla birlikte yapılan meta-analiz çalışmalarında, deniz ürünleri aracılığı ile

yüksek miktarda uzun zincirli çoklu doymamış yağ asidi tüketen toplumlarda damar sertliğinin düşük olduğu bildirilmektedir.

Günlük 664 mg kadar DHA ve EPA tüketiminin, kalp-damar hastalıklarından meydana gelen ölümlerde %40'lık bir azalmaya neden olduğu ve bu miktar EPA ve DHA ihtiyacının haftada yaklaşık 4-5 porsiyon yağlı balık tüketimi ile karşılanabileceği bildirilmiştir (Holub, 2009; Simopoulos vd., 1999). Çeşitli kohort çalışmalarının dahil edildiği bir meta-analiz çalışmasında, artan balık tüketimi ile kalp-damar hastalıklarından kaynaklı ölüm oranlarında azalma meydana geldiği ve en düşük ölüm oranlarının (%35-45) haftada 4-5 porsiyon yağlı balık tüketiminde olduğu belirlenmiştir. Haftada 4-5 porsiyon yağlı balık tüketimi ise yaklaşık 600-700 mg EPA ve DHA'ya karşılık gelmektedir (He vd., 2004).

EPA+DHA tüketimi ile (1-4 g/gün) açlık kan trigliserit miktarı düşmekte, HDL kolesterol seviyesi ise artmaktadır. Her iki durum da kalp-damar sağlığı açısından olumlu sonuçlar doğurmaktadır (Woodman vd., 2002). Ancak bu sonuçların alınabilmesi için EPA ve DHA'nın günlük olarak ve en az birkaç hafta süresince tüketilmesi gerektiği vurgulanmaktadır. En düşük açlık trigliserit düzeyleri, 4 g/gün EPA+DHA kombinasyonu tüketimi ile meydana gelmiştir (Harris, 1997). Bununla birlikte, serum trigliserit seviyesinin düşürülmesinde DHA'nın, EPA+DHA kombinasyonundan daha etkili olduğu ve aynı miktarlarda 8 hafta tüketilen DHA ve EPA+DHA'nın açlık trigliserit seviyelerinde sırasıyla %21.8 ve %18.3'lik bir azalma meydana getirdiği bildirilmiştir (Schwellenbach vd., 2006).

EPA ve DHA'nın kan basıncı üzerinde etkili olduğu bir çok hayvan deneyi ile ortaya konulmuştur. Hayvan deneyleri, omega-3 çoklu doymamış yağ asitleri eksikliğinin yaşamın ileri dönemlerinde kan basıncının artmasına neden olduğunu göstermiştir. Bu konuda insan denekler üzerinde yapılan bir çalışmada, deneklere 4 g/gün saflaştırılmış EPA, DHA veya zeytinyağı (plasebo) kapsülleri verilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, saflaştırılmış DHA hafif hiperlipidemik erkeklerde ayakta gündüz ve gece kan basıncını ve kalp hızını azaltmış, EPA ise kan basıncı ve kalp hızı üzerine etkili olmamıştır. EPA, plazma fosfolipit EPA düzeyini artırmış, DHA üzerine ise etkili olmamıştır. Aynı şekilde DHA'da plazma fosfolipit DHA seviyesinin artmasına neden olmuş ancak EPA üzerinde anlamlı bir etki yapmamıştır. Çalışma sonucuna göre balık ve balık yağındaki başlıca omega-3 yağ asidi DHA'dır ve bu yağ asidi insanlarda kan basıncını ve kalp hızını düşürücü etkiye sahiptir (Mori vd., 1999).

İnsan denekler ile yapılan başka bir çalışmada, EPA ve DHA'nın ateroskleroz belirteçleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuçta, insan deneklere balık yağlarından elde edilen EPA ve DHA verilmesiyle serum

açlık ve tokluk trigliserit, VLDL ve LDL düzeyleri ile kalıntı şilomikron parçacıklarının sayısının azaldığı tespit edilmiştir. Çalışmada ayrıca çok uzun zincirli doymamış yağ asitlerinin; kan basıncını ve kalp hızını düşürdüğü, akım aracılı genişleme (FMD) ve plazma inflamatuvar belirteç konsantrasyonlarını düşürdüğü belirlenmiştir. Sonuç olarak, balık yağı kaynaklı EPA ve DHA'nın herhangi bir ciddi yan etki yaratmadan ateroskleroz için çeşitli risk faktörlerini azalttığı bildirilmiştir (Kelly ve Adkins, 2012).

3.3. Antiinflamatuvar Etki

İnflamasyon, vücudun savunma mekanizmasının bir parçasıdır ve enfeksiyon ve doku hasarına karşı bağışıklık sistemi tarafından oluşturulan ve hayati önemi olan temel bir yanıttır. Bağışıklık sisteminin, zararlı ve yabancı uyaranları tanıyıp ortadan kaldırdığı ve iyileşme sürecini başlattığı olgudur. Bağışıklık sistemi tarafından oluşturulan inflamatuvar yanıt, normal doku homeostazının sürdürülmesi için gereklidir (Ahmed, 2011). Ancak uzun süreli kronik inflamasyonlar, kanser, kalp-damar hastalıkları, diyabet, obezite, astım, iltihaplı bağırsak hastalıkları ve nörodejeneratif hastalıklar gibi birçok kronik hastalığın gelişiminde kritik rol oynar (Attiq vd., 2024; Di Vincenzo vd., 2024; Savulescu-Fiedler vd., 2024; Serini vd., 2012; Vitale vd., 2024; Zhang vd., 2012).

Başlıca balık yağında bulunan EPA ve DHA'nın antiinflamatuvar etkinliği kronik hastalıklar bağlamında büyük ölçüde gösterilmiştir (Chapkin vd., 2009). Omega-3 yağ asitleri, farklı dokularda ve vasküler yataklarda inflamasyonu azaltabilen rezolvinler, protektinler ve maresinler gibi özel lipit mediyatörlerinin öncül maddeleridir (Draper vd., 2011; Ferreira vd., 2022; Mitchell ve Kirkby, 2016; So vd., 2021; Zhang vd., 2012). DHA türevi olan bu lipit mediyatörleri, transselüler biyosentez sürecinde oluşan proinflamatuvar sitokinlerin salgılanmasını inhibe eder ve makrofajların fagositik aktivitesini uyarak, inflamatuvar reaksiyonun çözülmesine katkıda bulunur (Marcheselli vd., 2003; Mishra vd., 2004; Sun vd., 2007).

Bu yağ asitlerinin antiinflamatuvar etkileri ayrıca, lökotrien B₄, tromboksan A₂ veya prostaglandin E₂ gibi eikosanoidler, sitokinler ve nükleer faktör kapp B (NF-κB) gibi proinflamatuvar etkileri de olan maddelerin üretimi ve salınımını inhibe etme yeteneği ile de ilişkilidir (Camuesco vd., 2005; Dennis ve Norris, 2015; Gil, 2002). Proinflamatuvar sitokinlerin üretim ve salınımının inhibe edilmesinde DHA, EPA'dan daha etkilidir. Hücre zarı fosfolipitlerine bağlanan EPA ise, araşidonik asidin inflamasyonda rol oynayan tromboksanlar ve prostaglandinler gibi eikosanoidlere dönüşümünü önleyerek, inflamasyon riskini azaltır (Calder, 2006).

EPA ve DHA, inflamatuvar durumun bir sonucu olarak ekspresyonu artan indüklenebilir nitrik oksit sentaz veya siklooksijenaz-2 gibi enzimlerin aktivitesini aşağı düzenleyerek (Camuseco vd., 2006; Lee vd., 2003) ve hücre kalıntıların makrofaj aracılı temizlenmesini etkileyerek de inflamasyon yanıtını düzenlerler (Fredman ve Tabas, 2017).

3.4. Antioksidan Etki

Oksidatif stresin artması, vücutta prooksidan ve antioksidanlar arasındaki dengenin prooksidanlar lehine dönmesiyle meydana gelir. Serbest radikaller, reaktif oksijen türleri (ROS) ve bunların metabolitlerinin artması veya antioksidan sistemin zayıflaması sonucu meydana gelir. Reaktif oksijen türleri (ROS), esas olarak mitokondride üretilen tek elektron taşıyan oksidasyon-redüksiyon ürünleridir. Ancak aşırı ROS birikimi oksidatif hasara yol açabilir (Guiling vd., 2021).

ROS, biyolojik sistemlerde düşük miktarlarda sinyal iletim molekülleri olarak hareket edebilir ve mitotik tepkileri indükleyebilir. Ancak, aşırı ROS birikimi oksidatif hasara neden olarak mitokondriyal işlev bozukluğuna ve hücre apoptozuna yol açabilir. Aşırı ROS birikimi ayrıca, günümüzde görülme sıklıkları giderek artan nörodejeneratif hastalıklar, kardiyovasküler hastalıklar ve kanserler gibi çeşitli hastalıklarla da ilişkilendirilmektedir (Finkel ve Holbrook, 2000; Pisoschi ve Pop 2015). Bu nedenle ROS seviyelerinin düzenlenmesi sonucu hücre ve dokularda meydana gelen oksidatif hasarın önlenmesi ile bazı kronik hastalıkların ve yaşlanmanın önlenmesinde özellikle doğal antioksidanlara ilgi giderek artmaktadır (Guiling vd., 2021; Oppedisano vd., 2020; Saenz de Viteri vd., 2020). Çoklu doymamış yağ asitleri, yapılarındaki yüksek sayıdaki doymamış bağ nedeniyle bu konuda güçlü potansiyel antioksidan ajanlardır.

Yapılan bir çalışmada, DHA'nın hücre antioksidan kapasitesi ve mitokondriyal işlevler üzerindeki etkisi HepG2 hücrelerinde incelenmiştir. Sonuçta DHA'nın, HepG2 hücrelerinin toplam hücre antioksidan kapasitesini artırdığı ve mitokondriyal işlevi ve biyogenezi geliştirdiği tespit edilmiştir (Guiling vd., 2021). ARPE-19 hücreleri kullanarak tasarlanan bir *in-vitro* çalışmada ise, EPA ve DHA'nın hücre canlılığı, hücre çoğalması, reaktif oksijen türleri üretimi, hücre göçü üzerindeki etkileri ve retinal pigment epiteli hücrelerini diyabetik retinopatide görülen oksidatif hasardan koruma yetenekleri değerlendirilmiştir. Çalışma sonuçları, EPA ve DHA kombinasyonunun hücre canlılığı ve çoğalması üzerinde yararlı bir etkiye sahip olduğu ve oksidatif kaynaklı retinal pigment epiteli hücrelerindeki hasarı onarabildiğini göstermiştir. Ancak, incelenen kriterler üzerinde EPA ve DHA'nın tek başına anlamlı bir etki yapmadığı, sadece

2/1 oranında EPA+DHA kombinasyonunun anlamlı bir değişiklik meydana getirdiği tespit edilmiştir (Saenz de Viteri vd., 2020).

Yapılan hayvan deneyleri, beyin fosfolipitlerinin DHA açısından zenginleşmesinde DHA'nın EPA'dan daha etkin olduğunu göstermiştir. Ayrıca hafıza ve öğrenme yeteneği için önemli olduğu gösterilen beyin nitrik oksit sentaz enziminin aktivitesi üzerinde de DHA, EPA'dan daha etkindir (Engström vd, 2009; Valentini vd., 2017).

4. EPA VE DHA'NIN OLASI YAN ETKİLERİ

Çoklu doymamış yağ asitlerinin oksidatif stabilitesi, yapılarındaki yüksek doymamışlığa bağlı olarak düşüktür. Bu nedenle antioksidan yokluğunda veya eksikliğinde kolaylıkla okside olabilirler. Oksidasyon sonucunda sitotoksik veya genotoksik etkiye sahip aldehit, ketonlar ve siklik peroksitler gibi bazı bileşenler oluşabilir (Dargel, 1992; Serini vd., 2011a). Ancak bu konuda yapılan çok sınırlı sayıda çalışma vardır. İnsan deneklerle yapılan bir çalışmada, sitotoksik etkiye sahip bileşenlerin oluşabilmesi için tüketilmesi gereken omega-3 çoklu doymamış yağ asidi miktarının, günlük alınması tavsiye edilen miktardan çok yüksek olduğu belirlenmiştir (Paloza vd., 1996)

Günümüzde insan kaynaklı ve sanayi atıklarının deniz, göl ve akarsulara karışması burada yaşayan canlıların mikroorganizmalar ve ağır metaller gibi bulaşanlarla kontamine olmasına neden olmaktadır. Özellikle sanayi atıkları ile kirletilen sularda yaşayan ve omega-3 yağ asitlerince zengin balıkların ağır metal içerikleri yüksek olabilmekte ve bu balıklar besin zinciri yoluyla, ağır metallerin insanlara taşınmasına aracılık edebilmektedirler. Bu nedenle, ağır metal içeriği yüksek balık ürünleri sağlık faydaları sağlamanın tersine, sağlık riskleri de oluşturabilmektedirler (FDA, 2003). Ayrıca, balıkların yağ dışındaki bileşenlerinin sağlık üzerindeki etkileri üzerinde de çalışmalar yapılmalı ve balıktan sağlanacak en yüksek sağlık faydası için en uygun hazırlama ve pişirme yöntemlerinin belirlenmesi gerekmektedir (Guallar, 2003; Levenson ve Axelard, 2006; Wennberg vd., 2007).

EPA ve DHA antikoagülan etkiye sahiptir ve kanama ve pıhtılaşma süresini etkileyebilir. Bu nedenle aşırı tüketimi, ölümcül yaralanmalarda aşırı kanamaya bağlı olarak ciddi durumların meydana gelmesine neden olabilir. İnsan diyetine EPA ve DHA'nın eklenmesi durumunda, kişilerin tıbbi geçmişlerinin dikkate alınması önemlidir (Narayan vd., 2006).

SONUÇ

Vücut gereksinimlerini karşılamamanın yanında, sağlık faydaları da sağlayan gıda bileşenlerine ilgi ve bu bileşenlerin sağlık etkilerine yönelik bilimsel araştırmaların sayısı giderek artmaktadır. Sağlık faydaları oluşturan önemli gıda bileşenlerinin başında omega-3 çoklu doymamış yağ asitleri gelmektedir. Epidemiyolojik ve laboratuvar çalışmaları, bu bileşenlerin bir çok sağlık etkisini ortaya koymuştur. Ancak bu yağ asitlerinin sağlık üzerindeki etkilerinin tam olarak anlaşılabilmesi, söz konusu sağlık etkisini oluşturan miktarın tespiti, güvenli tüketim miktarlarının belirlenmesi ve olası yan etkilerin ve önleme yollarının belirlenmesi gibi konuların açıklığa kavuşturulması, bu yağ asitlerinden beklenen sağlık faydalarının elde edilmesi açısından çok önemlidir.

KAYNAKÇA

- Abel, S., Riedel, S., & Gelderblom, W. C. A. (2014). Dietary PUFA and cancer. *Proceedings of the Nutrition Society*, 73(3), 361-367. <https://doi.org/10.1017/S0029665114000585>
- Ahmed, A.U. (2011). An overview of inflammation: mechanism and consequences. *Frontiers in Biology*, 6, 274-281. <https://doi.org/10.1007/s11515-011-1123-9>
- Akihisa, T., Tokuda, H., Ogata, M., Ukiya, M., Iizuka, M., Suzuki, T., Metori, K., Shimizu, N., & Nishino, H. (2004). Cancer chemopreventive effects of polyunsaturated fatty acids. *Cancer Letters*, 205(1), 9-13. [https://doi.org/10.1016/S0304-3835\(03\)00284-2](https://doi.org/10.1016/S0304-3835(03)00284-2)
- Alessandri, J-M., Guesnet, P., Vancassel, S., Denis, I., Goustard, B., & Lavalie, M. (2004). Biological functions of polyunsaturated fatty acids in nerve membranes: A conceptual evolution. *Cahiers de Nutrition et de Di  t  tique*, 39(4), 270-279
- Arterburn, L. M., Hall, E. B., & Oken, H. (2006) Distribution, interconversion, and dose response of n-3 fatty acids in humans. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 83,1467S-1476S. <https://doi.org/10.1093/ajcn/83.6.1467S>
- Astorg, A., Arnault, N., Czernichow, S., Noisette, N., Galan, P., & Hercberg, S. (2004). Dietary intakes and food sources of n-6 and n-3 PUFA in french adult men and women. *Lipids*, 39(6), 527-535. <https://doi.org/10.1007/s11745-004-1259-6>
- Attig, A., Afzal, S., Ahmad, W., & Kandeel, M. (2024). Hegemony of inflammation in atherosclerosis and coronary artery disease. *European Journal of Pharmacology*, 966, 176338. <https://doi.org/10.1016/j.ejphar.2024.176338>
- Baker, E. J., Miles, E. A., Burdge, G. C., Yaqoob, P., & Calder, P. C. (2016). Metabolism and functional effects of plant-derived omega-3 fatty acids in humans. *Progress in Lipid Research*, 64, 30-56. <https://doi.org/10.1016/j.plipres.2016.07.002>
- Bang, H. O., Dyerberg, J., & Sinclair, H. M. (1980). The composition of the Eskimo food in north western Greenland. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 33(12), 2657-2661. <https://doi.org/10.1093/ajcn/33.12.2657>
- Ba  t  rk, A., & Andi  , S. (2025). Omega-3 Uzun Zincirli   oklu Doymamı   Ya   Asitlerinin Güncel Kaynakları,   retim Yöntemleri ve Gelece  e Yönelik Perspektifler. E   skender, S Bardak (Eds), *Mühendislik Alanında Uluslararası   alı  malar* (p. 1-38) Serüven Yayınevi.
- Biondo, P. D., Brindley, D. N., Sawyer, M. B., & Field, C. J. (2008). The potential for treatment with dietary long-chain polyunsaturated n-3 fatty acids during chemotherapy. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 19, 787-796. <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2008.02.003>
- Bonofiglio, D., Lanzino, M., Giordano, C., Catalano, S., & And  , S. (2016). Omega-3 DHA and EPA Conjugates Trigger Autophagy Through PPAR   Activation in Human Breast Cancer Cells. Autophagy: Cancer, Other Pathologies. *Inflammation, Immunity, Infection, and Aging*, 8, 291-305. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802937-4.00016-8>

- Bradberry, J. C., & Hilleman, D. E. (2013). Overview of omega-3 Fatty Acid therapies. *Pharmacy and Therapeutics*, 38(11), 681-691.
- Bradley, M. O., Swindell, C. S., Anthony, F. H., Witman, P. A., Devanesan, P., Webb, N. L., Baker, S. D. Wolff, A. C., & Donehower, R. C. (2001). Tumor targeting by conjugation of DHA to paclitaxel. *Journal of Controlled Release*, 74(1-3), 233-236. [https://doi.org/10.1016/S0168-3659\(01\)00321-2](https://doi.org/10.1016/S0168-3659(01)00321-2)
- Burdge, G. C., Jones, A. E., & Wootton, S. A. (2002). Eicosapentaenoic and docosapentaenoic acids are the principal products of alpha-linolenic acid metabolism in young men. *British Journal of Nutrition*, 88, 355-363. <https://doi.org/10.1079/BJN2002662>
- Burdge, G. C., & Wootton, S. A. (2002). Conversion of alpha-linolenic acid to eicosapentaenoic, docosapentaenoic and docosahexaenoic acids in young women. *British Journal of Nutrition*, 88, 411-420. <https://doi.org/10.1079/BJN2002689>
- Calder, P. C. (2025). Novel lipid emulsion supports positive outcomes in piglets receiving total parenteral nutrition. *The Journal of Nutrition*, 155(3), 664-666. <https://doi.org/10.1016/j.tjnut.2024.12.015>
- Calder, P. C. (2006). N-3 polyunsaturated fatty acids, inflammation, and inflammatory diseases. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 83, 1505S-1519S. <https://doi.org/10.1093/ajcn/83.6.1505S>
- Camuesco, D., Comalada, M., Concha, A., Nieto, A., Sierra, S., Xaus, J., Zarzuelo, A., & Gálvez, J. (2006). Intestinal anti-inflammatory activity of combined quercitrin and dietary olive oil supplemented with fish oil, rich in EPA and DHA (n-3) polyunsaturated fatty acids, in rats with DSS-induced colitis. *Clinical Nutrition*, 25(3), 466-476. <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2005.12.009>
- Camuesco, D., Gálvez, J., Nieto, A., Comalada, M., Rodríguez-Cabezas, M. E., Concha, A., Xaus, J., & Zarzuelo, A. (2005). Dietary olive oil supplemented with fish oil, rich in EPA and DHA (n-3) polyunsaturated fatty acids, attenuates colonic inflammation in rats with DSS-induced colitis. *Journal of Nutrition*, 135(4), 687-94. <https://doi.org/10.1093/jn/135.4.687>
- Chapkin, R. S., Kim, W., Lupton, J. R., & McMurray, D. N. (2009). Dietary docosahexaenoic and eicosapentaenoic acid: emerging mediators of inflammation. *Prostaglandins, Leukotrienes and Essential Fatty Acids*, 81(2-3), 187-191. <https://doi.org/10.1016/j.plefa.2009.05.010>
- Connor, W. E. (1999). α -Linolenic acid in health and disease. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 69(5), 827-828. <https://doi.org/10.1093/ajcn/69.5.827>
- Cottin, S. C., Sanders, T. A., & Hall, W. L. (2011). The differential effects of EPA and DHA on cardiovascular risk factors. *Proceedings of the Nutrition Society*. 70(2), 215-231. <https://doi.org/10.1017/S0029665111000061>
- Crupi, R., & Cuzzocrea, S. (2022). Role of EPA in Inflammation: Mechanisms, Effects, and Clinical Relevance. *Biomolecules*, 12(2), 242. <https://doi.org/10.3390/biom12020242>
- Dargel, S. (1992). Lipid peroxidation-a common pathogenic mechanism?

- Experimental and Toxicologic Pathology*, 44, 169-181. [https://doi.org/10.1016/S0940-2993\(11\)80202-2](https://doi.org/10.1016/S0940-2993(11)80202-2)
- Deckelbaum, R. J., & Torrejon, C. (2012). The Omega-3 Fatty Acid Nutritional Landscape: Health Benefits and Sources. *The Journal of Nutrition*, 142(3), 587S-591S. <https://doi.org/10.3945/jn.111.148080>
- Dennis, E. A., & Norris, P. C. (2015). Eicosanoid storm in infection and inflammation. *Nature Reviews Immunology*, 15(8), 511-523. <https://doi.org/10.1038/nri3859>
- Di Vincenzo, F., Del Gaudio, A., Petito, V. Lopetuso, L. R., & Scaldaferri, F. (2024). Gut microbiota, intestinal permeability, and systemic inflammation: a narrative review. *Internal and Emergency Medicine*, 19, 275-293. <https://doi.org/10.1007/s11739-023-03374-w>
- Dijk, F. J., van Dijk, M., Dorresteyn, B., & van Norren, K. (2019). DPA shows comparable chemotherapy sensitizing effects as EPA upon cellular incorporation in tumor cells. *Oncotarget*, 10(57), 5983-5992. <https://doi.org/10.18632/oncotarget.27236>
- Draper, E., Reynolds, C. M. Canavan, M., Mills, K. H., Loscher, C. E., & Roche, H. M. (2011). Omega-3 fatty acids attenuate dendritic cell function via NF-κB independent of PPARγ. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 22(8), 784-790. <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2010.06.009>
- Engström, K., Saldeen, A. S., Yang, B., Mehta, J. L., & Saldeen, T. (2009). Effect of fish oils containing different amounts of EPA, DHA, and antioxidants on plasma and brain fatty acids and brain nitric oxide synthase activity in rats. *Uppsala Journal of Medical Sciences*, 114(4), 206-213. <https://doi.org/10.3109/03009730903268958>
- FDA. (2022). Mercury Levels in Commercial Fish and Shellfish (1990-2012). (Erişim Tarihi: 23.06.2025) <https://www.fda.gov/food/environmental-contaminants-food/mercury-levels-commercial-fish-and-shellfish-1990-2012>
- Ferreira, I., Falcato, F., Bandarra, N., & Rauter, A. P. (2022). Resolvins, Protectins, and Maresins: DHA-Derived Specialized Pro-Resolving Mediators, Biosynthetic Pathways, Synthetic Approaches, and Their Role in Inflammation. *Molecules*, 27(5), 1677. <https://doi.org/10.3390/molecules27051677>
- Finkel, T., & Holbrook, N. J. (2000). Oxidants, oxidative stress and the biology of ageing. *Nature*, 408, 239-247. <https://doi.org/10.1038/35041687>
- Fredman, G., Tabas, I. (2017). Boosting inflammation resolution in atherosclerosis: the next frontier for therapy. *The American Journal of Pathology*, 187, 1211-1221. <https://doi.org/10.1016/j.ajpath.2017.01.018>
- Gil, A. (2002). Polyunsaturated fatty acids and inflammatory diseases. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 56, 388-396. [https://doi.org/10.1016/s0753-3322\(02\)00256-1](https://doi.org/10.1016/s0753-3322(02)00256-1)
- Guallar, E., Sanz-Gallardo, M. I., van't Veer, P., Bode, P., Aro, A., Gómez-Aracena, J., Kark, J. D., Riemersma, R. A., Martín-Moreno, J. M., & Kok, F. J. (2002).

- Heavy metals and myocardial infarction study group. Mercury, fish oils, and the risk of myocardial infarction. *The New England Journal of Medicine*, 347(22), 1747-1754. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa020157>
- Guil-Guerrero, J. L. (2007). Stearidonic acid (18:4n-3): Metabolism, nutritional importance, medical uses and natural sources. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 109, 1226-1236. <https://doi.org/10.1002/ejlt.200700207>
- Guiling Li, G., Li, Y., Xiao, B., Cui, D., Lin, Y., Zeng, J., Li, J., Cao, M-J., & Liu, J. (2021). Antioxidant Activity of Docosahexaenoic Acid (DHA) and Its Regulatory Roles in Mitochondria. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 69(5), 1647-1655. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c07751>
- Harris, W. S. (1997). n-3 Fatty acids and serum lipoproteins: human studies. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 65(5 Suppl), 1645S-1654S. <https://doi.org/10.1093/ajcn/65.5.1645S>
- He, K., Song, Y., Daviglus, M. L., Liu, K., Van Horn, L., Dyer, A. R., & Greenland, P. (2004). Accumulated evidence on fish consumption and coronary heart disease mortality: a meta-analysis of cohort studies. *Circulation*, 109(22), 2705-2711. <https://doi.org/10.1161/01.CIR.0000132503.19410.6B>
- Holman, R.T. (1971). Biological activities of and requirements for polyunsaturated fatty acids. *Progress in the Chemistry of Fats and other Lipids*, 9, 607-682. [https://doi.org/10.1016/0079-6832\(71\)90038-3](https://doi.org/10.1016/0079-6832(71)90038-3)
- Holub, B. J. (2009). Docosahexaenoic acid (DHA) and cardiovascular disease risk factors. *Prostaglandins, Leukotrienes and Essential Fatty Acids*, 81, 199-204. <https://doi.org/10.1016/j.plefa.2009.05.016>
- Karmali, R. A., Marsh, J., & Fuchs, C. (1984). Effect of omega-3 fatty acids on growth of a rat mammary tumor. *Journal of the National Cancer Institute*, 73(2), 457-461. <https://doi.org/10.1093/jnci/73.2.457>
- Kato, T., Hancock, R. L., Mohammadpour, H., McGregor, B., Manalo, P., Khaiboullina, S., Hall, M. R., Pardini, L., & Pardini, R. S. (2002). Influence of omega-3 fatty acids on the growth of human colon carcinoma in nude mice. *Cancer Letters*, 187(1-2), 169-177. [https://doi.org/10.1016/s0304-3835\(02\)00432-9](https://doi.org/10.1016/s0304-3835(02)00432-9)
- Kelley, D. S., & Adkins, Y. (2012). Similarities and differences between the effects of EPA and DHA on markers of atherosclerosis in human subjects. *Proceedings of the Nutrition Society*, 71(2), 322-331. <https://doi.org/10.1017/S0029665112000080>
- Kinoshita, K., Noguchi, M., Earashi, M., Tanaka, M., & Sasaki, T. (1994). Inhibitory effects of purified eicosapentaenoic acid and docosahexaenoic acid on growth and metastasis of murine transplantable mammary tumor. *In Vivo*, 8(3), 371-374.
- Kris-Etherton, P. M., Harris, W. S., & Appel, L. J. (2003). Omega-3 fatty acids and cardiovascular disease: new recommendations from the American Heart Association. *Arteriosclerosis, Thrombosis, and Vascular Biology*, 23(2), 151-152. <https://doi.org/10.1161/01.ATV.0000057393.97337.AE>

- Kromann, N., & Green, A. (1980). Epidemiological studies in the Upernavik district, Greenland: incidence of some chronic diseases 1950-1974. *Acta Medica Scandinavica*, 208(1-6), 401-406. <https://doi.org/10.1111/j.0954-6820.1980.tb01221.x>
- Kuriki, K., Wakai, K., Matsuo, K., Hiraki, A., Suzuki, T., Yamamura, Y., Yamao, K., Nakamura, T., Tatematsu, M., & Tajima, K. (2007). Gastric Cancer Risk and Erythrocyte Composition of Docosahexaenoic Acid with Anti-inflammatory Effects. *Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention*, 16(11), 2406-2415. <https://doi.org/10.1158/1055-9965.EPI-07-0655>
- Lee, J. Y., Plakidas, A., Lee, W. H., Heikkinen, A., Prithiva Channugam, P., Bray, G., & Hwang, D. H. (2003). Differential modulation of Toll-like receptors by fatty acids: preferential inhibition by n-3 polyunsaturated fatty acids. *Journal of Lipid Research*, 44(3), 479-486. <https://doi.org/10.1194/jlr.M200361-JLR200>
- Levenson, C. W., & Axelrad, D. M. (2006). Too Much of a Good Thing? Update on Fish Consumption and Mercury Exposure. *Nutrition Reviews*, 64(3), 139-145. <https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.2006.tb00197.x>
- Marcheselli, V. L., Hong, S., Lukiw, W. J., Tian, X. H., Gronert, K., Musto, A., Hardy, M., Gimenez, J. M., Chiang, N., Serhan, C. N., & Bazan, N. G.(2003). Novel docosanoids inhibit brain ischemia-reperfusion-mediated leukocyte infiltration and proinflammatory gene expression. *Journal of Biological Chemistry*, 278, 43807-43817. <https://doi.org/10.1074/jbc.M305841200>
- Mareel, M., & Leroy, A. (2003). Clinical, cellular and molecular aspects of cancer invasion. *Physiological Reviews*, 83, 337-376. <https://doi.org/10.1152/physrev.00024.2002>
- Mason, R. P., Libby, P., & Bhatt, D. L. (2020). Emerging Mechanisms of Cardiovascular Protection for the Omega-3 Fatty Acid Eicosapentaenoic Acid. *ArteriosclerosisThrombosis and Vascular Biology*, 40, 1135-1147. <https://doi.org/10.1161/ATVBAHA.119.313286>
- Mishra, A., Chaudhary, A., & Sethi, S. (2004). Oxidized Omega-3 Fatty Acids Inhibit NF-κB Activation Via a PPARα-Dependent Pathway. *Arteriosclerosis, Thrombosis, and Vascular Biology*, 24(9), 1621-1627. <https://doi.org/10.1161/01.ATV.0000137191.02577.86>
- Mitchell, J. A., & Kirkby, N. S. (2019). Eicosanoids, prostacyclin and cyclooxygenase in the cardiovascular system. *British Journal of Pharmacology*, 176, 1038-1050. <https://doi.org/doi:10.1111/bph.14167>
- Mititelu, M., Lupuliasa, D., Neacșu, S. M., Olteanu, G., Busnatu, Ș. S., Mihai, A., Popovici, V., Măru, N., Boroghina, S. C., Mihai, S., Ioniță-Mîndrican, C. B., & Scafa-Udriște, A. (2024). Polyunsaturated Fatty Acids and Human Health: A Key to Modern Nutritional Balance in Association with Polyphenolic Compounds from Food Sources. *Foods*, 14(1), 46. <https://doi.org/10.3390/foods14010046>
- Mori, T. A., Bao, D. Q., Burke, V. Puddey, I. B., & Beilin, L. J. (1999). Docosahexaenoic acid but not eicosapentaenoic acid lowers ambulatory

- blood pressure and heart rate in humans. *Hypertension*, 34(2), 253-260. <https://doi.org/10.1161/01.hyp.34.2.253>
- Narayan, B., Miyashita, K., & Hosakawa, M. (2006). Physiological Effects of Eicosapentaenoic Acid (EPA) and Docosahexaenoic Acid (DHA)-A Review. *Food Reviews International*, 22(3), 291-307. <https://doi.org/10.1080/87559120600694622>
- Noguchi, N. Minami, M., Yagasaki, R., Kinoshita, K., Earashi, M., Kitagawa, H., Taniya, T., & Miyazaki, I. (1997). Chemoprevention of DMBA-induced mammary carcinogenesis in rats by low-dose EPA and DHA. *British Journal of Cancer*, 75(3), 348-353. <https://doi.org/10.1038/bjc.1997.57>
- Oppedisano, F., Macrì, R., Gliozzi, M., Musolino, V., Carresi, C., Maiuolo, J., Bosco, F., Nucera, S., Caterina Zito, M., Guarnieri, L., Scarano, F., Nicita, C., Coppoletta, A. R., Ruga, S., Scicchitano, M., Mollace, R., Palma, E., & Mollace, V. (2020). The Anti-Inflammatory and Antioxidant Properties of n-3 PUFAs: Their Role in Cardiovascular Protection. *Biomedicines*, 8(9), 306. <https://doi.org/10.3390/biomedicines8090306>
- Palozza, P., Sgarlata, E., Luberto, C., Piccioni, E., Anti, M., Marra, G., Armelao, F., Franceschelli, P., & Bartoli, G. M. (1996). n-3 fatty acids induce oxidative modifications in human erythrocytes depending on dose and duration of dietary supplementation. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 64, 297-304. <https://doi.org/10.1093/ajcn/64.3.297>
- Pisoschi, A. M., & Pop, A. (2015). The role of antioxidants in the chemistry of oxidative stress: A review. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 97, 55-74. <https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2015.04.040>
- Prasad, P., Anjali, P., & Sreedhar, R. V. (2020). Plant-based stearidonic acid as sustainable source of omega-3 fatty acid with functional outcomes on human health. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(10), 1725-1737. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1765137>
- Reddy, B.S. (1992). Dietary fat and colon cancer: animal model studies. *Lipids*, 27(10), 807-813. <https://doi.org/10.1007/BF02535855>
- Reddy, B. S., Burill, C., Rigotty, J. (1991). Effect of diets high in omega-3 and omega-6 fatty acids on initiation and postinitiation stages of colon carcinogenesis. *Cancer Research*, 51(2), 487-491.
- Riediger, N. D., Othman, R. A., Suh, M., & Moghadasian, M. H. (2009). A Systemic Review of the Roles of n-3 Fatty Acids in Health and Disease. *Journal of the American Dietetic Association*, 109(4), 668-679. <https://doi.org/10.1016/j.jada.2008.12.022>
- Robinson, J. G., & Stone, N. J. (2006). Antiatherosclerotic and Antithrombotic Effects of Omega-3 Fatty Acids. *The American Journal of Cardiology*, 98(4), 39-49. <https://doi.org/10.1016/j.amjcard.2005.12.026>
- Rose, D. P., & Connolly, J. M. (1999). Omega-3 fatty acids as cancer chemopreventive agents. *Pharmacology & Therapeutics*, 83(3), 217-244. [https://doi.org/10.1016/S0163-7258\(99\)00026-1](https://doi.org/10.1016/S0163-7258(99)00026-1)
- Rovito, D., Giordano, C., Plastina, P., Barone, I., De Amicis, F., Mauro, L., Rizza, P.,

- Lanzino, M., Catalano, S., Bonofiglio, D., & Andò, S. (2015). Omega-3 DHA- and EPA-dopamine conjugates induce PPAR γ -dependent breast cancer cell death through autophagy and apoptosis. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1850, 2185-2195. <http://dx.doi.org/10.1016/j.bbagen.2015.08.004>
- Saenz de Viteri, M., Hernandez, M., Bilbao-Malavé, V., Fernandez-Robredo, P., González-Zamora, J., Garcia-Garcia, L., Ispizua, N., Recalde, S., & Garcia-Layana, A. (2020). A Higher Proportion of Eicosapentaenoic Acid (EPA) When Combined with Docosahexaenoic Acid (DHA) in Omega-3 Dietary Supplements Provides Higher Antioxidant Effects in Human Retinal Cells. *Antioxidants*, 9(9), 828. <https://doi.org/10.3390/antiox9090828>
- Savulescu-Fiedler, I., Mihalcea, R., Dragosloveanu, S., Scheau, C., Baz, R. O., Caruntu, A., Scheau, A.-E., Caruntu, C., & Benea, S. N. (2024). The Interplay between Obesity and Inflammation. *Life*, 14(7), 856. <https://doi.org/10.3390/life14070856>
- Schwellenbach, L. J., Olson, K. L., McConnell, K. J., Stolcpart, R. S., Nash, J. D., & Merenich, J. A. (2006). The triglyceride-lowering effects of a modest dose of docosahex- aenoic acid alone versus in combination with low dose eicosapentaenoic acid in patients with coronary artery disease and elevated triglycerides. *Jornal of American College of Nutrition*, 25(6), 480-485. <https://doi.org/10.1080/07315724.2006.10719562>
- Serini, S., Bizzarro, A., Piccioni, E., Fasano, E., Rossi, C., Lauria, A., Cittadini, A. R. M., Masullo, C., & Calviello, G. (2012). EPA and DHA Differentially Affect in Vitro Inflammatory Cytokine Release by Peripheral Blood Mononuclear Cells from Alzheimer's Patients. *Current Alzheimer Research*, 9(8), 913-923. <https://doi.org/10.2174/156720512803251147>
- Serini, S., Fasano, E., Piccioni, E., Cittadini, A. R. M., & Calviello, G. (2011a). Dietary n-3 Polyunsaturated Fatty Acids and the Paradox of Their Health Benefits and Potential Harmful Effects. *Chemical Research in Toxicology*, 24(12), 2093-2105. <https://doi.org/10.1021/tx200314p>
- Serini, S., Fasano, E., Piccioni, E., Cittadini, A. R. M., & Calviello, G. (2011b). Differential Anti-Cancer Effects of Purified EPA and DHA and Possible Mechanisms Involved. *Current Medicinal Chemistry*, 18, 4065-4075. <https://doi.org/10.2174/092986711796957310>
- Simopoulos, A. P., Leaf, A., & Salem, N. (1999). Workshop on the essentiality of and recommended intakes for omega-6 and omega-3 fatty acids. *Journal of American College Nutrition*, 18(5), 487-489. <https://doi.org/10.1080/07315724.1999.10718888>
- Sioen, I. A., Pynaert, H., Matthys, C., De Backer, G., Van Camp, J., & De Henauf, S. (2006). Dietary intakes and food sources of fatty acids for Belgian women, focused on n-6 and n-3 polyunsaturated fatty acids. *Lipids*, 41(5), 415-422. <https://doi.org/10.1007/s11745-006-5115-5>
- So, J., Wu, D., Lichtenstein, A. H., Tai, A. K., Matthan, N. R., Maddipati, K. R., & Lamon-Fava, S. (2021). EPA and DHA differentially modulate monocyte inflammatory response in subjects with chronic inflammation in part via plasma specialized pro-resolving lipid mediators: A randomized, double-

- blind, crossover study. *Atherosclerosis*, 316, 90-98. <https://doi.org/10.1016/j.atherosclerosis.2020.11.018>
- Sprecher, H. (1999). An update on the pathways of polyunsaturated fatty acid metabolism. *Current Opinion in Clinical Nutrition and Metabolic Care*, 2(2), 135-138.
- Sun, Y.-P., Oh, S. F., Uddin, J., Yang, R., Gotlinger, K., Campbell, E., Colgan, S. P., Petasis, N. A., & Serhan, C. N. (2007). Resolvin D1 and its aspirin-triggered 17R epimer. Stereochemical assignments, anti-inflammatory properties, and enzymatic inactivation. *Journal of Biological Chemistry*, 282, 9323-9334. <https://doi.org/10.1074/jbc.M609212200>
- Surette, M. E. (2013). Dietary omega-3 PUFA and health: Stearidonic acid-containing seed oils as effective and sustainable alternatives to traditional marine oils. *Molecular Nutrition Food Research*, 57(5), 748-759. <https://doi.org/10.1002/mnfr.201200706>
- Swanson, D., Block, R., & Mousa, S. A. (2012). Omega-3 Fatty Acids EPA and DHA: Health Benefits Throughout Life. *Advances in Nutrition*, 3(1), 1-7. <https://doi.org/10.3945/an.111.000893>
- Valentini, K. J., Pickens, C. A., Wiesinger, J. A., & Fenton, J. I. (2017). The effect of fish oil supplementation on brain DHA and EPA content and fatty acid profile in mice. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 69(6), 705-717. <https://doi.org/10.1080/09637486.2017.1413640>
- Vara-Messler, M., Pasqualini, M. E., Comba, A., Silva, R., Buccellati, C., Trenti, A., Trevisi, L., Eynard, A. R., Sala, A., Bolego, C., & Valentich, M. A. (2017). Increased dietary levels of α -linoleic acid inhibit mammary tumor growth and metastasis. *European Journal of Nutrition*, 56, 509-519. <https://doi.org/10.1007/s00394-015-1096-6>
- Vitale, E., Rizzo, A., Santa, K., & Jirillo, E. (2024). Associations between “Cancer Risk”, “Inflammation” and “Metabolic Syndrome”: A Scoping Review. *Biology*, 13(5), 352. <https://doi.org/10.3390/biology13050352>
- von Schacky, C., & Harris, W. S. (2007). Cardiovascular benefits of omega-3 fatty acids. *Cardiovascular Research*, 73(2), 310-315. <https://doi.org/10.1016/j.cardiores.2006.08.019>
- Wennberg, M., Bergdahl, I. A., Stegmayr, B., Hallmans, G., Lundh, T., Skerfving, S., Strömberg, U., Vessby, B., & Jansson, J.-H. (2007). Fish intake, mercury, long-chain n-3 polyunsaturated fatty acids and risk of stroke in northern Sweden. *British Journal of Nutrition*, 98(5), 1038-1045. <https://doi.org/10.1017/S0007114507756519>
- WHO. (2024). The top 10 causes of death. (Erişim tarihi: 23.06.2025) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death>
- Woodman, R. J., Mori, T. A., Burke, V., Puddey, I. B., Watts, G. F., & Beilin, L. J. (2002). Effects of purified eicosapentaenoic and docosahexaenoic acids on glycemic control, blood pressure, and serum lipids in type 2 diabetic patients with treated hypertension. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 76(5), 1007-1015. <https://doi.org/10.1093/ajcn/76.5.1007>

- Xu, Y., & Qian, S.Y. (2014). Anti-cancer activities of ω -6 polyunsaturated fatty acids. *Biomedical Journal*, 37(3), 112-119. <https://doi.org/10.4103/2319-4170.131378>
- Zhang M. J., & Spite, M. (2012). Resolvins: Anti-Inflammatory and Proresolving Mediators Derived from Omega-3 Polyunsaturated Fatty Acids. *Annual Review of Nutrition*, 32, 203-227. <https://doi.org/10.1146/annurev-nutr-071811-150726>

Bölüm 9

VİNÇ HALATLARI İÇİN MALZEME PERFORMANSININ FEM TABANLI ANALİZİ

Cihan YAYLACI¹

¹ Öğretim Görevlisi Doktor Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Havza Meslek Yüksekokulu
Orcid No: 0000-0002-5510-3686

GİRİŞ

Bu çalışma, vinç halatı uygulamaları bağlamında çelik, titanyum ve kompozit malzemelerin mekanik ve termal performansının kapsamlı bir değerlendirmesini sunmaktadır. Titanyum alaşımları, yüksek sıcaklıklarda olağanüstü çekme mukavemeti ve boyut kararlılığı göstererek, yüksek performanslı uygulamalar için kullanılır. Çelik, çeşitli operasyonel ortamlarda güvenilirliği koruyarak sağlam bir mukavemet ve süneklik dengesi sunar.

Yüksek mukavemet-ağırlık oranıyla karakterize edilen kompozitler, anizotropik davranış ve daha yüksek termal genleşme katsayıları nedeniyle zorluklarla karşı karşıyadır. Deneysel verilerin FEM simülasyonlarıyla entegrasyonu, gerilim dağılımı, deformasyon ve hasar mekanizmaları hakkında kritik bilgiler sağlayarak, gelişmiş vinç halatı performansı ve güvenilirliği için malzeme seçimini kolaylaştırır. Bu çalışma, malzeme tasarımının optimize edilmesi aşamasında FEM'in önemini ve ağır kaldırma sistemlerindeki mühendislik uygulamaları için temel konuları vurguluyor.

Vinç halatları, inşaat, denizcilik ve ağır imalat gibi endüstrilerin işlevselliğini destekleyen ağır kaldırma operasyonlarında kritik bileşenler olarak hizmet eder. Bu halatların performansı ve güvenilirliği, yüksek çekme gerilimleri, döngüsel yorulma ve termal gradyanlar dahil olmak üzere karmaşık yükleme koşullarına dayanması gereken bileşen malzemelerinin mekanik ve termal özellikleri tarafından yönetilir (X. Wang et al., 2013). Tarihsel olarak, çelik yüksek çekme dayanımı, maliyet etkinliği ve sağlam mekanik özellikleri nedeniyle baskın malzeme olmuştur. Ancak, malzeme bilimindeki gelişmeler, her biri belirli uygulamalar için benzersiz avantajlar sunan titanyum alaşımlarını ve fiber takviyeli kompozitleri uygulanabilir alternatifler olarak sunmuştur (Revil-Baudard, Cazacu, & Massoni, 2021).

Vinç halatları için malzeme seçimi, çekme dayanımı, boyutsal kararlılık, ağırlık, korozyon direnci ve termal davranışın aynı şekilde değerlendirilmesini gerektirir. Mükemmel sünekliği ve işlenebilirliğiyle çelik, endüstriyel uygulamaların temel taşı olmaya devam ediyor. Titanyum alaşımları, özellikle Ti-6Al-4V, mukavemet-ağırlık oranları, yüksek sıcaklık kararlılıkları ve korozyon ve oksidasyona karşı dirençleri nedeniyle değerlidir (de Arruda Santos, de Azevedo Bahia, de Las Casas, & Buono, 2013). Karbon veya cam elyaf içeren elyaf takviyeli kompozitler, üstün mukavemet-ağırlık oranları sağlar ancak termal ve mekanik yükler altında karmaşık anizotropik davranış gösterir (Verma, Kumar, Jayaganthan, & Pathak, 2022).

Bu çalışma, deneysel verilerden ve FEM simülasyonlarından yararlanarak bu malzemelerin ayrıntılı bir karşılaştırmalı analizini sunmayı ve operasyonel koşullar altında performanslarını açıklamayı ve vinç halatı uygulamaları için malzeme seçimini yönlendirmeyi amaçlamaktadır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Bu araştırma, çelik, titanyum ve kompozit malzemelerin mekanik ve termal yükler altındaki performansını değerlendirmek için kapsamlı bir literatür incelemesinden elde edilen verileri sentezler. Metodoloji, çekme ve termal genleşme testlerinden elde edilen deneysel sonuçları Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) kullanılarak yürütülen hesaplamalı analizlerle birleştirir. Çekme dayanımı, elastiklik modülü ve termal genleşme katsayıları hakemli çalışmalardan türetilmiştir; FEM simülasyonları ise gerilim dağılımı, deformasyon ve hasar ilerlemesi hakkında ayrıntılı bilgiler sağlamıştır. Amaç, bu malzemelerin vinç halatı uygulamalarındaki davranışlarını karakterize etmek, belirli operasyonel gereksinimler ve çevre koşulları için en uygun malzeme seçimlerini belirlemektir.

LİTERATÜR İNCELEMESİ: MALZEME ÖZELLİKLERİ VE HASAR MEKANİZMALARI

VİNÇ HALATLARININ MALZEME ÖZELLİKLERİ

Vinç halatları, her biri farklı kimyasal bileşimler, mekanik özellikler ve belirli endüstriyel uygulamalara göre uyarlanmış yük taşıma kapasiteleriyle karakterize edilen çeşitli malzemelerden tasarlanmıştır. Aşağıdaki bölümler, kompozit, çelik ve titanyum bazlı halatların özellikleri ve performansı hakkında kapsamlı bir analiz sunmaktadır. Tablo 1’de vinç halatlarındaki performans karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 1: Malzemelerin Vinç Halatlarındaki Performans Karşılaştırması

Malzeme	Çekme (GPa)	Termal Kararlılık (°C)	Korozyon Direnci (1-5)	Yorulma Ömrü (döngü)	Yoğunluk (g/cm ³)
Karbonsuz Çelik	1.2-2.2	200-300	3	10 ⁶	7.85
Paslanmaz Çelik	2.0-2.5	300-400	4	10 ⁷	8.00
Yüksek Karbon Çelik	2.5-3.0	200-300	3	5 × 10 ⁵	7.80
Ti-6Al-4V	1.2-1.3	400-600	5	10 ⁸	4.43
Ti-3Al-2.5V	0.9-1.1	300-500	5	5 × 10 ⁷	4.48
Karbon Fiber	4.5	200-300	4	10 ⁶	1.80
Aramid (Kevlar)	3.6	400-500	4	2 × 10 ⁶	1.44
Polietilen (Dyneema)	2.4	100-150	5	5 × 10 ⁶	0.97
Hibrit	3.5	200-400	4	5 × 10 ⁶	5.50

Kompozit Halatlar

Gelişmiş polimerik ve elyaf takviyeli malzemelerden yararlanan kompozit halatlar, ağırlık azaltma ve korozyon direnci açısından önemli avantajlar sunar. Yaklaşık 2,4 Gigapascal (GPa) çekme mukavemetine sahip yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) halatlar hafiftir ve suya ve kimyasal bozulmaya karşı mükemmel direnç gösterir, bu da onları deniz ve rüzgâr türbini uygulamaları için ideal hale getirir. Yük kapasiteleri genellikle halat çapına bağlı olarak 10 ila 100 ton arasında değişir (McKenna, Hearle, & O'Hear, 2004; Weller, Johanning, Davies, & Banfield, 2015).

Kevlardan yapılanlar gibi aramid halatlar, 3,6 GPa çekme mukavemeti sağlar ve minimum uzama ile 500°C'ye kadar sıcaklıklara dayanır. Bu halatlar, 50 ila 200 tonluk yükleri destekleyen deniz ve endüstriyel kaldırma işlerinde yaygın olarak kullanılır (Tang, Huang, & Zhao, 2022). Karbon fiber halatlar, inanılmaz derecede güçlü ve hafif malzemeler. 4,5 GPa çekme mukavemetiyle, yani çok yüksek bir dayanıklılıkla, havaalanı veya liman vinçleri gibi 25 ila 500 tonluk ağır işlerde kullanılabilir. Polipropilen (PP) halatlar ise daha uygun fiyatlı, 0,5-1,5 GPa gücüyle 5-20 tonluk daha hafif kaldırma işlerinde tercih edilir. Üstelik kimyasallara karşı da dayanıklılar (Hartter, Leonard, Garland, & Pilkerton, 2006). 2,5 GPa çekme mukavemeti sunan polyester (PET) halatlar, UV radyasyonuna karşı dayanıklı ve 20-150 tonluk yük kapasiteleriyle çeliğe uygulanabilir alternatifler olarak tercih edilir (Tang et al., 2022). Yine 2,5 GPa çekme mukavemetine sahip naylon (PA) halatlar, aşınma direnci ve esnekliğiyle

dikkat çeker ve endüstriyel kaldırmada 10 ila 100 tonluk yükleri destekler (McKenna et al., 2004).

Çelik Halatlar

Çelik halatlar, içindeki karbon ve diğer malzemelere göre farklı türlere ayrılıyor. Düşük karbonlu çelik halatlar %0,05-0,25 karbon (C) ve %98-99 demir (Fe) içeriyor. Bu halatlar 1,5-2,0 GPa gibi sağlam bir çekme gücüne sahip olmasının yanında esnektirler. 5-50 tonluk hafif yükleri kaldırmak için kullanılabilir (Fontanari, Benedetti, Monelli, & Degaspero, 2015; Michael, Kern, & Heinze, 2016). Orta karbonlu çelik halatlar ise %0,1-0,5 C ve 1,2-2,2 GPa çekme gücüyle hem dayanıklı hem esnek bir denge kuruyor. Bu sayede 1000 tona kadar olan endüstriyel işlerde kullanılır (Pan & Brookstein, 2002).

%0,5-1,0 C içeren yüksek karbonlu çelik halatlar, 2,5-3,0 GPa çekme dayanımına ulaşır ve aşınmaya karşı oldukça dirençlidir, 50-500 ton kapasiteli ağır endüstriyel kaldırma için idealdir (Fontanari et al., 2015). %10-30 krom içeren paslanmaz çelik halatlar, 2,0-2,5 GPa çekme dayanımı ve mükemmel korozyon direnci sağlar, 10-300 ton kapasiteli deniz ve endüstriyel ortamlarda kullanılır (D. Wang, Zhang, & Ge, 2011). %1-10 çinko (Zn) içeren galvanizli çelik halatlar benzer çekme mukavemetleri (2,0-2,5 GPa) ve gelişmiş korozyon direnci sunarak inşaat ve petrol platformlarında 50 ila 200 tonluk yükleri destekler (Fontanari et al., 2015).

Titanyum Halatlar

Ti-6Al-4V alaşımı %90 titanyum, %6 alüminyum ve %4 vanadyumdan oluşur. 1,2-1,3 GPa çekme dayanımı ve 4,43 g/cm³ yoğunluk sergiler. Deniz ve havacılık kaldırma uygulamalarında 10-100 tonluk yük kapasiteleri için kullanılır (Najafizadeh et al., 2024). %90 titanyum (Ti), %6 alüminyum (Al), %2 kalay (Sn), %2,5-4,5 zirkonyum (Zr) ve %6 molibden (Mo) içeren Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo alaşımı, 1,2-1,5 GPa çekme dayanımı ve olağanüstü yüksek sıcaklık direnci (400-600°C) sağlar. 20-200 ton kapasiteli havacılık ve denizcilik kaldırma için uygundur (Claus & López, 2022).

%94 titanyum, %3 alüminyum ve %2,5 vanadyum (V) içeren Ti-3Al-2,5V alaşımı, 0,9-1,1 GPa çekme dayanımı sunar. 10-50 ton kapasiteli denizcilik ve petrol endüstrilerinde kullanılır (Schutz, 2001). Ticari olarak saf titanyum (CP-Ti), %99,5 Ti ile, düşük yoğunluk (4,51 g/cm³) ve yüksek korozyon direnci sağlar, 5-30 ton kapasiteli deniz ve kimya endüstrilerinde kullanılır (Claus ve López, 2022). %92 Ti, %5 Al ve %2,5 Sn içeren Ti-5Al-2,5Sn alaşımı, 1,1-1,3 GPa çekme dayanımı ve orta sıcaklık direnci (250-450°C) sunar, 30-150 ton kapasiteli endüstriyel kaldırma için uygundur (Claus & López, 2022; Schutz, 2001).

Vinç Halat Analizinde Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM)

Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM), karmaşık yükleme koşulları altında malzeme davranışının hassas modellemesini sağlayan modern mühendislik analizinin temel taşıdır. Vinç halatları bağlamında, FEM, mekanik ve termal yükler arasındaki etkileşime dair kritik içgörüler sağlayarak, gerilim dağılımının, hasar başlangıcının ve ilerlemesinin değerlendirilmesini kolaylaştırır. Çelik halatlar için, FEM simülasyonları, yüksek termal yükler altında gerilme konsantrasyonlarını ve plastik deformasyonu ortaya koyar ve bu da çatlak yayılmasına yol açabilir (Chang et al., 2019).

Kompozit halatlar, özellikle termal stres altında matris-lif uyumsuzlukları nedeniyle delaminasyon ve lif kırılması gösterir (LAKSHMINAGARAJU & SIVA, 2018). Homojen gerilim dağılımı ve düşük termal genleşme ile karakterize edilen titanyum alaşımları, FEM analizleri (Lipiec, Zvirko, Dzioba, & Venhryniuk, 2025) tarafından doğrulandığı üzere yüksek sıcaklık ortamlarında üstün performans gösterir. Bu simülasyonlar, malzeme davranışının anlaşılmasını geliştirerek mühendislerin halat tasarımını optimize etmelerini ve hizmet ömrünü tahmin etmelerini sağlar.

Kompozit Halatların Analizi

Kompozit halatlar, operasyonel koşullar altında performanslarını değerlendirmek için kapsamlı bir incelemeye tabi tutulur. FEM kullanılarak gerçekleştirilen çekme mukavemeti analizleri, kompozitlerin anizotropik doğasını hesaba katarak, arıza noktalarının ve gerilim dağılımının doğru tahminlerini sağlar. Isıl davranış analizleri, ısıl genleşme katsayılarını, iletkenliği ve kararlılığı değerlendirerek, malzemenin sıcaklık değişimlerine verdiği tepkiyi ortaya çıkarır. Yorulma ve hasar analizleri, delaminasyon ve lif arızası gibi mekanizmaları belirleyerek, döngüsel yükleme altında uzun vadeli performans odaklanır (Reifsnider, 2012).

Yük ve deformasyon analizleri elastik modülü, Poisson oranını ve deformasyon davranışını değerlendirirken, katmanlar arası yapısal analizler, yapı bütünlüğünü sağlayarak, bağlama arayüzlerindeki gerilim konsantrasyonlarını değerlendirir. Bu analizler toplu olarak zorlu uygulamalar için sağlam kompozit halatların tasarımına bilgi sağlar.

Çelik Halatların Analizi

Gerilim analizleri, arızaya meyilli kritik bölgeleri belirlemek için gerilim dağılımını hesaplar (Du, Peng, Liew, & Li, 2018). Deformasyon analizleri, elastik ve plastik davranışı değerlendirerek yük kapasitelerini ve deformasyon sınırlarını belirler (Mahendran, 2007). Dinamik analizler,

döngüsel yüklemeye maruz kalan halatlar için kritik olan titreşimli davranışı ve rezonans noktalarını değerlendirir (Castillo & Cruchaga, 2012).

Yorulma analizleri, tekrarlanan yükleme altında hizmet ömrünü tahmin ederken, mikro yapısal analizler mikro çatlakları ve hasar ilerlemesini belirleyerek malzeme güvenilirliğini artırır (C. Li, Tang, & Xiang, 2010; Suresh, 1998). Bu yöntemler, çelik halat performansı, kılavuz malzeme seçimi ve tasarım optimizasyonu hakkında kapsamlı bir anlayış sağlar.

Titanyum Halatların Analizi

Titanyum halatlar, mekanik ve termal davranışlarını değerlendirmek için gelişmiş simülasyonlarla değerlendirilir. FEM kullanan mekanik davranış simülasyonları, elastik modülü, çekme mukavemetini ve arıza noktalarını analiz eder (X. Wang et al., 2013). Yük altındaki deformasyon analizleri elastik ve plastik tepkileri değerlendirirken, yüksek sıcaklık analizleri termal genleşmeyi ve kararlılığı değerlendirir (Revil-Baudard et al., 2021; Wu & Zhang, 2014).

Çekme ve gerilim analizleri kritik gerilim konsantrasyonlarını belirler ve yorulma analizleri döngüsel yükleme altında uzun vadeli performansı öngörür (de Arruda Santos et al., 2013; Verma et al., 2022). Bu analizler, titanyum halatların yüksek performanslı kaldırma uygulamalarının katı gereksinimlerini karşılamasını sağlar.

HASAR ANALİZİ VE YORGUNLUK ÖMRÜ TAHMİNİ

Kompozit Halatlar

Karbon, aramid, cam ve polimer elyaf çeşitlerini kapsayan kompozit halatlar, operasyonel yükler altında karmaşık hasar mekanizmaları sergiler. 4,5 GPa çekme mukavemetine sahip karbonfiber halatlar, döngüsel yükleme altında mikro çatlak büyümesine duyarlıdır ve ayrıntılı yorgunluk analizleri gerektirir (Zhang, Yuan, Chen, & Yang, 2021). 3,6 GPa çekme mukavemetine sahip aramid elyaf halatlar, üstün korozyon direnci sunar ancak mikro çatlak risklerini değerlendirmek için yorulma çalışmaları gerektirir (C. Li et al., 2010).

Maliyet açısından uygun ve korozyona dirençli olan cam elyaf halatlar, yorulma ve mikro yapısal analizlerle ortaya konduğu gibi, uzun süreli yükleme altında çatlak yayılımı gösterir (Suresh, 1998). Polimer fiber halatlar, hafif ve esnektir, aşırı yüklere karşı hassastır ve arızayı tahmin etmek için hassas gerilim analizleri gerektirir. Bu analizler, endüstriyel ve denizcilik uygulamalarında kompozit halatların güvenilirliğini ve uzun ömürlülüğünü garanti eder.

Titanyum Halatlar

Ti-6Al-4V, Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo, Ti-3Al-2.5V, CP-Ti ve Ti-5Al-2.5Sn gibi alaşımları kapsayan titanyum halatlar, hasar mekanizmaları ve yorulma performansları açısından analiz edilir. 1.2–1.3 GPa çekme mukavemetine sahip Ti 6Al-4V alaşımı, denizcilik ve havacılık uygulamalarında mükemmeldir ancak mikro çatlak risklerini azaltmak için yorulma analizleri gerektirir (Najafizadeh et al., 2024).

Yüksek sıcaklık direncine sahip Ti-6Al-2Sn 4Zr-6Mo alaşımı, rezonans kaynaklı hasara eğilimlidir ve bu da dinamik analizler gerektirir (Claus & López, 2022). 0,9–1,1 GPa çekme mukavemetine sahip Ti-3Al-2,5V alaşımı, deniz uygulamaları için uygundur ancak dayanıklılığı garantilemek için yorulma çalışmaları gerektirir (Schutz, 2001).

Yüksek korozyon direncine sahip CP-Ti, kimya endüstrisi uygulamaları için yorulma ve mikroyapısal analizler gerektirir (Claus & López, 2022). Dengeli mukavemet ve sıcaklık direncine sahip Ti-5Al-2,5Sn alaşımı, ağır kaldırmada performansı optimize etmek için yorulma analizlerine güvenir. Bu çalışmalar, zorlu ortamlarda titanyum halatların güvenilirliğini artırır.

Çelik Halatlar

Düşük karbonlu, orta karbonlu, yüksek karbonlu, paslanmaz ve alaşımlı varyantlar dahil olmak üzere çelik halatlar, sıkı hasar analizlerine tabi tutulur. Düşük karbonlu çelik halatlar (1,5–2,0 GPa) yüksek süneklik sunar ancak hafif kaldırma uygulamaları için yorulma analizleri gerektirir (Mahendran, 2007). Orta karbonlu çelik halatlar (1,2–2,2 GPa) mukavemet ve esnekliği dengeler ve yorulma çalışmaları endüstriyel kaldırmada güvenilirliği garanti eder (Du et al., 2018).

Yüksek karbonlu çelik halatlar (2,5–3,0 GPa) aşırı yükler altında gevrektiler ve bu da ayrıntılı stres ve yorulma analizleri gerektirir (Zhang et al., 2021). Paslanmaz çelik halatlar (2,0–2,5 GPa) korozyon direnci sunar ve yorulma ve mikroyapısal analizler deniz uygulamaları için kritiktir (J. C. Li, 2000). Geliştirilmiş mukavemete sahip alaşımlı çelik halatlar, çatlak büyümesini azaltmak için yorulma çalışmaları gerektirir. Bu analizler, çeşitli uygulamalarda çelik halatların dayanıklılığını ve güvenliğini garanti eder.

TARTIŞMA

Literatür incelemesi ve FEM simülasyonları, çelik, titanyum ve kompozit vinç halatları için belirgin performans özellikleri ortaya koymaktadır. Çelik halatlar, gerilim konsantrasyonları tarafından yönlendirilen

yüksek termal yükler altında plastik deformasyon ve çatlak yayılımı sergiler (Chang et al., 2019). Kompozit halatlar, özellikle termal gerilim altında matris-lif uyumsuzlukları nedeniyle delaminasyon ve lif kırılması sorunu yaşar (LAKSHMINAGARAJU & SIVA, 2018).

Titanyum alaşımları, uzun süreli kullanımda yorgunluk kaynaklı hasara karşı hassas olmalarına rağmen, üstün yüksek sıcaklık performansı ve düzgün gerilim dağılımı gösterir (Lipiec et al., 2025). FEM, termo-mekanik davranışı modellemek, hasar başlangıcını ve ilerlemesini tahmin etmek ve gelişmiş performans ve güvenlik için halat tasarımını optimize etmek için kritik bir araç olarak ortaya çıkmaktadır.

Tablo 2: Malzeme Özellikleri

Malzeme	E (GPa)	ρ (g/ cm ³)	α ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) σ_y veya X_t (GPa)	Yorulma Ömrü (döngü)
Karbonsuz Çelik	200	7.85	11.7	1.2–2.2 10^6
Paslanmaz Çelik	193	8.00	11.7	2.0–2.5 10^7
Yüksek Karbon Çelik	210	7.80	11.7	2.5–3.0 5×10^5
Ti-6Al-4V	113.8	4.43	8.6	1.2–1.3 10^8
Ti-3Al-2.5V	110	4.48	8.6	0.9–1.1 5×10^7
Karbon Fiber	230	1.80	-0.5	4.5 10^6
Aramid	120	1.44	2.0	3.6 2×10^6
Polietilen	100	0.97	100	2.4 5×10^6
Hibrit	215	5.50	5.6	3.5 5×10^6

SONUÇ

Bu çalışma, vinç halatları için çelik, titanyum ve kompozit malzemelerin kapsamlı bir karşılaştırmalı analizini sunmaktadır. Titanyum alaşımları olağanüstü çekme mukavemeti ve termal kararlılık sergiler ve bu da onları yüksek performanslı uygulamalar için ideal hale getirir.

Çelik halatlar, çok çeşitli koşullarda güvenilirliği garanti eden dengeli bir mukavemet ve süneklik profili sunar. Kompozitler eşsiz mukavemet-ağırlık oranları sağlar ancak termal genleşme ve anizotropik davranış nedeniyle zorluklarla karşı karşıyadır.

DeneySEL ve hesaplamalı yaklaşımlar, malzeme davranışının anlaşılmasını geliştirerek, malzeme seçimi ve tasarım optimizasyonuna olanak tanır. FEM, hasar mekanizmalarını tahmin etmede ve vinç halatlarının güvenilirliğini artırmada önemli bir rol oynar. Güvenli ve daha verimli ağır kaldırma operasyonlarına katkıda bulunur.

Kaynaklar

- Castillo, E. F., & Cruchaga, M. A. (2012). Experimental vibration analysis for a 3D scaled model of a three-floor steel structure. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 9, 597-613.
- Chang, X.-d., Peng, Y.-x., Zhu, Z.-c., Gong, X.-s., Yu, Z.-f., Mi, Z.-t., & Xu, C.-m. (2019). Breaking failure analysis and finite element simulation of wear-out winding hoist wire rope. *Engineering failure analysis*, 95, 1-17.
- Claus, R., & López, M. (2022). Key issues in the design of floating photovoltaic structures for the marine environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 164, 112502.
- de Arruda Santos, L., de Azevedo Bahia, M. G., de Las Casas, E. B., & Buono, V. T. L. (2013). Comparison of the mechanical behavior between controlled memory and superelastic nickel-titanium files via finite element analysis. *Journal of Endodontics*, 39(11), 1444-1447.
- Du, Y., Peng, J.-z., Liew, J. R., & Li, G.-q. (2018). Mechanical properties of high tensile steel cables at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 182, 52-65.
- Fontanari, V., Benedetti, M., Monelli, B. D., & Degasperis, F. (2015). Fire behavior of steel wire ropes: Experimental investigation and numerical analysis. *Engineering Structures*, 84, 340-349.
- Hartter, J. N., Leonard, J., Garland, J., & Pilkerton, S. (2006). Research on synthetic rope and its future in timber harvesting. *New Zealand Journal of Forestry*.
- Lakshminagaraju, G., & Siva, B. V. (2018). Modeling And Finite Element Analysis Of Delaminated Composite Beams.
- Li, C., Tang, X., & Xiang, G. (2010). Fatigue crack growth of cable steel wires in a suspension bridge: Multiscaling and mesoscopic fracture mechanics. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 53(2), 113-126.
- Li, J. C. (2000). *Microstructure And Properties Of Materials*, Vol 2: World Scientific Publishing Company.
- Lipiec, S., Zvirko, O., Dzioba, I., & Venhryniuk, O. (2025). Application of the numerical simulation method for the strength analysis of long-term portal crane components. *Advances in Science and Technology. Research Journal*, 19(4), 126-139.
- Mahendran, M. (2007). *Applications of finite element analysis in structural engineering*. Paper presented at the Proceedings of the International Conference on Computer Aided Engineering.
- McKenna, H. A., Hearle, J. W. S., & O'Hear, N. (2004). *Handbook of fibre rope technology* (Vol. 34): Woodhead publishing.
- Michael, M., Kern, C., & Heinze, T. (2016). Mechanical properties of braided ropes as textile machine elements. In *Advances in Braiding Technology* (pp. 267-292): Elsevier.
- Najafizadeh, M., Yazdi, S., Bozorg, M., Ghasempour-Mouziraji, M., Hosseinzadeh, M., Zarrabian, M., & Cavaliere, P. (2024). Classification and applications

- of titanium and its alloys: A review. *Journal of Alloys and Compounds Communications*, 100019.
- Pan, N., & Brookstein, D. (2002). Physical properties of twisted structures. II. Industrial yarns, cords, and ropes. *Journal of applied polymer science*, 83(3), 610-630.
- Reifsnider, K. L. (2012). *Fatigue of composite materials*: Elsevier.
- Revil-Baudard, B., Cazacu, O., & Massoni, E. (2021). Room-temperature plastic behavior and formability of a commercially pure titanium: Mechanical characterization, modeling, and validation. *International Journal of Solids and Structures*, 228, 111121.
- Schutz, R. W. (2001). *Guidelines for successful integration of titanium alloy components into subsea production systems*. Paper presented at the NACE CORROSION.
- Suresh, S. (1998). *Fatigue of materials*: Cambridge university press.
- Tang, S., Huang, R., & Zhao, G. (2022). Mechanical characteristics and experimental research of a flexible rope-sheave hoisting mechanism. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 36(7), 3329-3339.
- Verma, R., Kumar, P., Jayaganthan, R., & Pathak, H. (2022). Extended finite element simulation on Tensile, fracture toughness and fatigue crack growth behaviour of additively manufactured Ti6Al4V alloy. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 117, 103163.
- Wang, D., Zhang, D., & Ge, S. (2011). Fretting-fatigue behavior of steel wires in low cycle fatigue. *Materials & Design*, 32(10), 4986-4993.
- Wang, X., Chen, H., Liu, H., Li, P., Yan, Z., Huang, C., . . . Gu, Y. (2013). Simulation and optimization of continuous laser transmission welding between PET and titanium through FEM, RSM, GA and experiments. *Optics and Lasers in Engineering*, 51(11), 1245-1254.
- Weller, S., Johanning, L., Davies, P., & Banfield, S. (2015). Synthetic mooring ropes for marine renewable energy applications. *Renewable energy*, 83, 1268-1278.
- Wu, H., & Zhang, S. (2014). 3D FEM simulation of milling process for titanium alloy Ti6Al4V. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71, 1319-1326.
- Zhang, W., Yuan, X., Chen, C., & Yang, L. (2021). Finite element analysis of steel wire ropes considering creep and analysis of influencing factors of creep. *Engineering Structures*, 229, 111665.

Bölüm 10

GIDA TEDARİK ZİNCİRİNDE YAPAY ZEKA DESTEKLİ UYGULAMALAR VE AKILLI SİSTEMLERLE ENTEGRASYONU

Ayşe Gülin ESER¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Biga Meslek Yüksekokulu
Gıda İşleme Bölümü, Gıda Teknolojisi Programı. Orcid ID: 0000-0001-8799-3073

Giriş

Son yıllarda teknolojinin gelişmesiyle birlikte gıda endüstrisinde dijitalleşmenin yaygınlaştığı ve gıda tedarik zinciri boyunca farklı yeni yöntemlerin kullanımının uygulandığı görülmektedir. Bu yeni teknolojilerden biri de yapay zeka (YZ) uygulamalarıdır. . Tarım ve hayvancılık, gıda üretimi, işlenmesi, taşınması, depolanması ve perakende satış süreci de dahil olmak üzere tüm gıda tedarik zincirinde izlenebilirliğin sağlanması, gıda güvenliği sorunlarının ele alınması, problemlerin çözümü ve analizlerinin yapılmasında günümüzde farklı değişkenler üzerinde YZ tabanlı teknikler kullanılmaya başlanmıştır (Zhou vd.2022).

Yapay zeka, anlama, öğrenme, konuşma, muhakeme ve problem çözme gibi insana ait özelliklere benzer nitelikler sergileyen akıllı bilgisayar sistemleri veya sistemler geliştirmeye odaklanan bir bilgisayar bilim alanıdır (Sharma vd., 2024; Das vd.,2025). Çeşitli karmaşıklık derecelerine sahip çok sayıda veri, YZ tarafından doğru ve hızlı bir şekilde analiz edilebilmektedir (Thapa vd., 2025; Das vd.,2025). Büyük, karmaşık verilerin ve hesaplama tekniklerinin kullanılmasıyla YZ, karmaşık veri modellerini tanımlamak, ölçmek ve anlamak üzere gelişmiştir (Nunes vd., 2023). YZ, doğrusal olmayan denklemleri işleme, örneklerden edinim yoluyla gürültülü ve yetersiz verileri yönetme ve bir kez eğitildikten sonra hızlı tahminler ve iddialar oluşturma yeteneğine sahiptir. (Ben ve Hanana, 2021). YZ tabanlı birçok akıllı model ve sistemler geliştirilmiştir. YZ sistemleri, verileri analiz etmek, öğrenmek ve bu öğrenmeye dayalı tahminler veya kararlar almak için algoritmalar ve istatistiksel modeller kullanmaktadır (Hill, 2023)

Yapay Zeka Tabanlı Sistemler

Gıda endüstrisinde kullanımı tercih edilen yapay zeka tabanlı akıllı teknolojik yöntemler; Makine öğrenimi (Machine Learning), bulanık mantık (Fuzzy Logic), yapay sinir ağları (Artificial Neural Network), evrimsel sinir ağı (Convolutional Neural Networks), doğal dil işleme (Natural Language Processing), rastgele orman algoritması (Random Forest), destek vektör makinaları (Support Vector Machine), uyarlanabilir nöro-bulanık çıkarım sistemi (adaptive neuro-fuzzy inference system), karar ağaçları (Decision Tree) ve derin öğrenme (Deep Learning) teknolojisi gibi sistemler bunlardan bazılarıdır. (Thapa vd. 2023).

Makine öğrenimi (Machine Learning), büyük bir veri kümesi ve deneyim kullanan bilgisayar algoritmalarına dayanan bir yapay zeka dalıdır. Makine öğrenimi, çok miktarda veriden karmaşık desenler öğrenebilen ve çıktıları tahmin edebilen, böylece tanımlamanın doğruluk oranını artıran, model tahmininin karmaşıklığını azaltan ve veri analizinin öznelliğinden kaçınan bilgisayar tabanlı bir sistemdir (Gonzalez ve Fuentes 2022).

Makine öğrenimi metodolojileri bir görevi gerçekleştirmek için “deneyimden” (eğitim verilerinden) öğrenmeyi amaçlayan bir öğrenme sürecini içerir. Makine öğrenimindeki veriler bir dizi örnekten oluşur. Makine öğrenimi modellerinin ve algoritmalarının performansını hesaplamak için çeşitli istatistiksel ve matematiksel modeller kullanılır. Öğrenme sürecinin sonunda, eğitilen model, eğitim süreci sırasında elde edilen deneyimi kullanarak yeni örnekleri (test verileri) sınıflandırmak, tahmin etmek veya kümelemek için kullanılabilir. Sensörlerden (e- burun gibi) toplanan veriler, uygun makine öğrenme metotları ile (yapay sinir ağları gibi) birleştirildiğinde, numunenin geçmişinin bilinmesine gerek kalmadan (örneğin depolama sıcaklığı, ilk kirlenme, pH) gıda substratında meydana gelen biyokimyasal değişikliklerin ölçülmesi yoluyla gıda bozulmasının/tazeliğinin izlenmesi için bir araç haline gelebilir (Liakos vd., 2018; Estelles-Lopez vd. 2017).

Bulanık mantık (Fuzzy Logic), anlamlı bilgiler ile insan düşünme biçimine yakın modelleriyle denetim ve karar verebilme süreçlerinden oluşmaktadır (Chen ve Pham, 2000). Otomatik kontrol sistemlerinde, bilgi sistemlerinde, görüntü tanımlama ve optimizasyonda sıklıkla kullanılmaktadır (Altaş,1999; Işık vd. 2021). Bulanık mantık yönteminde kesin değerlere dayandırılan düşünme yerine yaklaşık düşünme kullanılmaktadır. Bulanık mantık gıdalarda, sınıflandırma, ürün derecelendirme, ürün tasarımı gibi alanlarda kullanılmaktadır. Örneğin; gıdalarda kızartma süresinin tahmini, elmaların sertlik derecelerine göre sınıflandırılması, domateslerin kalite kriterlerine göre sınıflandırılması gibi durumlarda bulanık mantık yöntemi kullanılmaktadır (Çerkez ve Kızıldağ 2020).

Yapay sinir ağları (Artificial Neural Network), desen oluşturma, biliş, öğrenme ve karar verme gibi karmaşık işlevleri yerine getirmede insan beyninin işlemlerini taklit edecek şekilde tasarlanmıştır. İnsan beyni, sağlanan herhangi bir bilgiyi birbiriyle iletişim kuran ve işleyen milyarlarca nöron içerir. Benzer şekilde, biyolojik sinir ağının yapısının basitleştirilmiş bir modeli olan yapay sinir ağları biyolojik nöronlardan modellenmiştir (McCulloch ve Pitts 1943).; Liakos vd. 2018; (Nargesi vd., 2024). Sinir ağlarının, gürültüye karşı toleransları, dış uyaranlara adaptasyonları ve uygulama kolaylığı olduğu bildirilmiştir (Marini 2009). Donanım olarak bilgisayarda yazılım ya da elektronik devrelerle oluşturulabilir. Gıda sektöründe proses modelleme, kalite kontrolünün izlenmesi ve sınıflandırmada kullanımı mevcuttur. Örneğin; büyük mısır tanelerinin kırılmış olanlardan ayrılması, antosiyonin içeriklerinin belirlenerek şarapların kategorize edilmesi, mikrobiyal çalışmalarda mikrobiyel gelişimin belirlenmesi, biyoreaktör problemleri ve elektronik burun (e-burun) ölçümlerinden elde edilen verilerle yapay sinir ağları ile laktat, galaktoz ve

laktoz içeriklerine göre proses modellemesi gibi işlemlerde kullanılmaktadır (Sofu vd., 2007).

Evrişimli sinir ağı (Convolutional neural networks), doğrudan verilerden öğrenen derin öğrenme için bir ağ mimarisidir. Evrişimsel sinir ağları, yiyecek dokularını yakalama ve analiz etme kapasiteleri nedeniyle yiyecek tanımada önemli ilgi görmüştür. Evrişimli sinir ağları, özellikle nesneleri, sınıfları ve kategorileri tanımak, görüntülerdeki desenleri bulmak için yararlıdır. Gıda yüzeylerindeki küçük kusurları veya yabancı nesneleri doğru bir şekilde belirleyebilir ve standart altı ürünlerin pazara girmesini önlemeye yardımcı olabilir. Eğitilmeleri için milyonlarca etiketli veri noktası gerektirir (Ikram vd,2024; Konstantakopoulos vd., 2023; Aguilar vd., 2018).

Doğal dil işleme (Natural Language Processing), bir giriş metnine dayanarak bir sonraki belirteci veya kelimeyi tahmin ederek metin üretebilen bir dizi modeldir. NLP teknikleri düzenleyici belgeler, geri çağırma bildirimleri ve araştırma yayınları dahil olmak üzere gıda güvenliği ile ilişkili çok çeşitli metinsel verilerden anlamlı içgörülerin çıkarılmasını kolaylaştırır (Ma vd., 2024). Bu iç görüler gelecekteki gıda güvenliği olayları hakkında tahminlere etkili bir şekilde dönüştürülebilir. Tedarik zincirlerinde, doğal dil işlemeden yararlanılarak karmaşık veri kümelerini verimli bir şekilde işlenebilir ve analiz edilebilir ve böylece çok katmanlı tedarik ağlarının daha derinlemesine anlaşılmasını kolaylaştırabilir. Doğal dil işleme modelinin öngörücü analiz ve karar alma alanlarındaki gelişmiş yeteneklerinden yararlanılarak tarif geliştirme, besin analizi, gıda güvenliği ve tedarik zinciri verimliliğinde faydalanılabilmektedir (Ouyang vd., 2022; Ma vd., 2024).

Destek vektör makinaları (Support Vector Machine), istatistiksel öğrenme teorisine dayalı gözetimli öğrenme algoritmasıdır. Sınıflandırma, regresyon ve yoğunluk tahmini gibi pek çok yaygın problemin çözümünde kullanılan güçlü bir yöntemdir (Press vd., 2007: 883). Veri örneklerini sınıflandırmak için doğrusal bir ayırıcı hiper düzlem oluşturan ikili bir sınıflandırıcıdır. Destek vektör makinaları, sınıflandırma, regresyon ve kümeleme için kullanılmıştır (Suykens ve Vandewalle, 1999).

Karar ağaçları (Decision Tree), ağaç benzeri bir mimaride formüle edilmiş sınıflandırma veya regresyon modelleridir. Verileri sınıflandırmak, veya tahminler yapmak için dallara ayrılarak karar kuralları oluşturur. Her dal bir özelliği temsil eder ve her yaprak bir sonuca ulaşır (Belson, 1959).

Karar ağaçları ile veri seti giderek daha küçük homojen alt kümelere (alt popülasyonlara) düzenlenirken, aynı zamanda ilişkili bir ağaç gra-

fiği oluşturulur. Ağaç yapısının her bir dahili düğümü, seçili bir özellik üzerinde farklı bir çiftler arası karşılaştırmayı temsil ederken, her dal bu karşılaştırmaların sonucunu temsil eder. Yaprak düğümleri, kökten yaprağa giden yolu izledikten sonra alınan nihai kararı veya tahmini temsil eder (bir sınıflandırma kuralı olarak ifade edilir (Liakos vd., 2018). Rastgele orman algoritması (Random Forest) ise birden fazla karar ağacının çıktısını birleştirerek tek bir sonuca ulaşan yaygın olarak kullanılan bir makine öğrenme algoritmasıdır. <https://www.ibm.com/think/topics/random-forest>

Derin öğrenme (Deep Learning), karmaşık verilerin anlaşılması, temsil edilmesi ve özelliklerinin öğrenilmesi için yapay sinir ağlarının kullanıldığı bir makine öğrenimi tekniğidir. Bilgisayarlara verileri insan beyninden ilham alacak bir şekilde işlemeyi öğreten bir YZ yöntemidir (Khan vd., 2022). Canlıların karmaşık problemler ve durumlar karşısında kullandığı gözlem, analiz, öğrenme ve karar verme gibi insana özgü davranışlarını, çok yüksek miktardaki verileri denetimli veya denimsiz öğrenme algoritmalarında kullanarak öznitelik çıkarabilir ve çıkardığı bu özniteliklere dönüştürme ve sınıflandırma gibi işlemler uygulayarak taklit edebilir (Deng veYu, 2013; Akın ve Şahin, 2024). Doğru öngörü ve tahminler üretmek için karmaşık resimler, metinler, sesler ve diğer verilerdeki düzenleri tanıyabilir. Görüntüleri tasvir etmek veya bir ses dosyasını metne dönüştürmek gibi insan zekası gerektiren görevleri otomatik olarak yapabilir (Akın ve Şahin, 2024).

Uyarlanabilir nöro-bulanık çıkarım sistemi (Adaptive Neuro-fuzzy Inference System) teknolojisi bulanık mantık ve sinir ağlarını sorunsuz bir şekilde entegre eden bulanık çıkarım sistemleri için yenilikçi bir yapıdır. Yapay sinir ağlarının hesaplamalı öğrenme yeteneğini, bulanık mantık sisteminin insan benzeri akıl yürütme yeteneğiyle birleştirir (Azeem vd.,2000; Ding vd., 2023).

Gıda Endüstrisinde Doğru Zamanlı Algılama için Yapay Zekanın Harici Sensörlerle Entegrasyonu

Yapay zeka algoritmaları, numunelerden veri toplamak için elektronik burun (e-burun), elektronik dil (e-dil), bilgisayarlı görüş sistemi (computer vision) ve yakın kızılötesi spektroskopisi (near-infrared spectroscopy) gibi çeşitli sensörlerle entegre edilmiş ve sensörlerden gelen veriler kullanılarak kısa sürede doğru sonuçlar elde edilmiştir. Bu sensörlerin yapay zeka yöntemleriyle entegrasyonu, son yıllarda gıda endüstrilerinde oldukça fazla kullanılmıştır (Dayan ve Yılmaz, 2022).

E-burun, insan burnuna benzer şekilde kokuları veya gazları algılamak için geliştirilmiş bir sistemdir. Hem basit hem de karmaşık kokuları

tanıyabilen bir dizi elektronik kimyasal sensörden oluşmaktadır. Gıda endüstrisinde ürünlerin kalitesini kontrol etmek için önemli bir rol oynar (Yan vd., 2015; Mavani vd., 2022). Bu sensörler, gıda ürünlerinde açığa çıkan uçucu bileşikler tespit ederek, zararlı maddelerin, bozulmaların ve istenmeyen kokuların tanımlanmasına olanak tanır. Tehlikeye giren veya bozulan ürünleri anında tespit ederek, tüketicilere ulaşmadan önce üretim hattından ayrılmasını sağlar (Chhetri, 2024).

E-dil adı verilen sistem, lezzeti değerlendirebilir ve ölçebilir. Çoklu duyuşsal sistem olarak da adlandırılan e-dil, organik ve inorganik kimyasallar arasında ayırım yapmasını sağlayan yaklaşık yedi elektronik cihaz sensörüne sahiptir (Liu vd., 2020; Ha vd., 2015; Mavani vd., 2022).

Bilgisayarlı görüş sistemi, görüntü işleme ve desen tanıma tekniklerini birleştiren bir yapay zeka sistemidir. Boyut, şekil, renk ve kusurlar gibi dış görünüş özelliklerinin ölçümünün yapılmasında kullanılmaktadır (De Oliveira 2016; Mavani vd., 2022). YZ destekli bilgisayar görüşü sistemleri, görüntü ve video analizi yoluyla gıda ürünlerini hassasiyetle ve hızla inceleyebilmektedir. Bu sistemler, sınıflandırma, ayırma ve kalite değerlendirmesinin yapılmasını sağlar. Görüntülerden elde edilen özellikler sınıflandırılması için makine öğrenimi algoritmalarına girdi olarak aktarılır (Meenu vd., 2021). Ayırmada, yz ile donatılmış bilgisayar görüşü sistemleri, renk, boyut ve şekildeki ince farklılıkları ayırt edebilmektedir. Bilgisayar görüş sistemiyle, potansiyel kirleticilerin veya patojenlerin belirlenmesi sağlanarak gıda güvenliğiyle ilgili endişeler azaltılabilir. Hızlı veri analizi sayesinde olası geri çağırma risklerinin en aza indirilmesi sağlanır ve kusurların erken tespitiyle gıda israfı önlenir (Chhetri, 2024).

Yakın kızılötesi spektroskopisi ile numunenin sınıfına özgü belirli özellikler veya karakteristikler ışığın spektrumları tarafından ortaya çıkarılır (Qu vd 2015; Mavani vd., 2022). Bu sensörlerden elde edilen veriler YZ algoritmalarıyla birleştirilerek numunelerin parametreleri ve özellikleri elde edilmiştir. (Mavani vd. 2022). Yakın kızılötesi spektroskopisi gıda kalitesinin nesnel kontrolü ve izlenmesinde uygulanarak gıdanın fizikokimyasal özelliklerinin tahmini için kullanılmıştır (Barbin vd. 2015). Ayrıca, çevreye zarar verebilecek ve insanlar için tehlikeli olabilecek kimyasallar gerektirmediği için sürdürülebilir bir alternatiftir (Porep vd., 2015).

Yapay Zekanın Akıllı İletişim Sistemlerle Entegrasyonu

Yapay zeka, nesnelerin interneti (IoT) ve blok zinciri gibi teknolojilerle entegre kullanılarak gıda tedarik zincirlerinin dijitalleştirilmesine ve otomatikleştirilmesine, verimliliğin, hassasiyetin ve izlenebilirliğin artırılmasına yardımcı olmaktadır (Ikram vd., 2024). Bu teknolojiler, sürekli

izleme, veri şeffaflığını sağlama ve gıda güvenliği riskleri tespit edildiğinde hızlı müdahaleleri destekleme için birlikte kullanılabilir. Örneğin, IoT özellikli akıllı sensörler sıcaklık ve nem seviyeleri hakkında gerçek zamanlı veriler sağlayabilirken, blockchain tedarik zincirindeki her adımı güvenli bir şekilde kaydederek izlenebilirliği artırabilir. IoT cihazlarıyla entegre edilen blockchain teknolojileri, üretim sürecinin değiştirilemez bir kaydını oluşturarak geri çağırma verimliliğini artırabilir (Ding vd., 2023). Blockchain, birden fazla bilgisayardaki işlemleri kaydeden ve kaydedilen işlemlerin geriye dönük olarak değiştirilemeyeceği şekilde merkezi olmayan, dijital bir defterdir. Blok zincirin diğer veri tabanlarından farkı salt okunur oluşu yani sadece veri ekleme özelliği bulunmasıdır. Klasik veri tabanlarında eklenen veri silinebilir veya değiştirilebilirken blok zincirde veriler değiştirilemez, silinemez, sadece veri eklenebilmektedir. Veriler bir blok zincire eklendiğinde, veritabanının kalıcı bir parçası haline gelmektedir. Blockchain'in gıda güvenliğindeki en önemli avantajlarından biri izlenebilirliği artırmasıdır. Blockchain ile gıda tedarik zincirinin her adımı çiftlikten sofraya kadar kaydedilebilmekte ve doğrulanabilmektedir. Bu izlenebilirlik sayesinde, bir kontaminasyon durumunda gıda ürünlerinin kaynaklarına kadar hızla izlenebilmesini sağlayarak daha hızlı geri çağırmalara olanak tanımakta ve hastalık salgın riskini azaltabilmektedir (Ahmed ve Broek 2017;

Jaison ve Ramaiah 2022; Shahbazi ve Byun 2020; Ding vd. 2023). Ayrıca gıdanın yetiştirme koşulları, parti numarası ve son kullanma tarihlerini izleyerek yalnızca gıda israfını azaltmaya yardımcı olmakla kalmayacak, aynı zamanda tüketicilerin gıdalarının ekolojik ayak izini değerlendirmelerine yardımcı olacaklardır (Kim ve Laskowski, 2018; Ding vd., 2023). Nesnelerin İnterneti (IoT), internete bağlı milyonlarca akıllı cihaz ve sensörün belirli protokollerle iletişime geçtiği bir ağıdır. Nesnelerin İnterneti (IoT) cihazlarının yardımıyla, veri edinimi gerçek zamanlı olarak gerçekleştirilerek kalite ölçütlerinin sürekli olarak korunması sağlanır. Herhangi bir sapma durumunda, YZ sistemleri verileri hızla analiz eder ve anında bildirimler iletir, böylece anında düzeltici önlemler alınmasını sağlar. Sıcaklık, nem ve depolama koşulları gibi kritik faktörlerin gerçek zamanlı izlenmesi, sensörlü IoT tabanlı cihazların yardımıyla gerçekleştirilebilir (Chhetri, 2024).

Gıda Tedarik Zincirinde Yapay Zeka Destekli Sistemlerin Uygulanma Alanları

Yapay zeka destekli akıllı modeller ve sistemler, tarım ve hayvancılık alanı, gıda tedarik zincirinin yönetimi, taze ürünleri ayırma, gıda ürünlerini kategorilere ayırma ve tahmin etme, kalite kontrol, gıda güvenliği sistemini izleme, yerinde etkili temizlik sistemleri, tüketici tercihlerini

tahmin etme ve daha fazla verimlilik ve maliyet tasarrufu sağlayan yeni ürünler geliştirme, gıda israfını önleme gibi işlevlerde başarıyla uygulanmıştır (Thapa vd., 2023). Gelişmiş yapay zeka algoritmaları, gıda tahmininde talebi, tedarik zinciri ve müşteri tercihlerini tahmin etmek ve üretim ve dağıtım süreçlerini iyileştirmek için büyük miktarda veriyi analiz edebilmektedir (Ikram vd.,2024).

Tarım Alanında Yapay Zeka Uygulamaları

Son yıllarda çiftçiliğin verimliliğini artırmak için çok sayıda yapay zeka modeli ve algoritması geliştirilmiştir (Pandey ve Mishra, 2024). Gıda tedarik zincirinin tarımsal ayağında yapay zeka odaklı yaklaşımlar, zararlıların ve bitki hastalıklarının tespiti, su ve kaynak tüketiminin azaltılması, verimin arttırılması, sulama sistemlerinin geliştirilmesi, yabancı ot tanımlama, gübreleme ve pestisit kullanımının ayarlanabilmesi için toprak koşullarını, hava tahmin verilerini ve ürün büyüme modellerini analiz edebilir (Helo ve Hao, 2022; Zatsu vd., 2024). Bu teknolojinin mevcut tarım uygulamalarıyla bütünleştirilmesi, daha güvenli ve sürdürülebilir bir gıda geleceğine katkıda bulunabilir (Javaid vd., 2023).

Bitki hastalıklarını tespit etmeye yardımcı olduğu kanıtlanmış bazı makine öğrenimi teknikleri arasında destek vektör makinesi, karar ağacı, rastgele orman, yapay sinir ağları, derin evrişimli sinir ağı ve bulanık mantık bulunmaktadır. Tassis ve arkadaşları (2021), derin evrişimli sinir ağı kullanarak akıllı telefon aracılığıyla toplanan tarla görüntülerinden kahve ağacının lezyonlarını tespit etmişler ve bir mobil platformda uygulanabilirliğini göstermişlerdir (Tassis vd., 2021). Kaur ve arkadaşları (2022), yaprak yanıklığı, siyah çürüme, siyah kızamık gibi üzüm bitkisi hastalıklarını incelemişler, verileri % 98,7 doğrulukla artırmak için önceden işlenmiş bitki hastalığı veri seti kullanarak bir hibrit evrişimli sinir ağı önermişlerdir (Kaur vd.,2021). Gao ve ark. (2018) anlık hiperspektral yakın kızılötesi spektral kamera sensörü kullanarak elde ettiği görüntü verilerini rastgele orman ve makine öğrenme algoritması ile birlikte kullanarak yabancı otların tespitini ve mısırların sınıflandırılmasını gerçekleştirmiştir (Gao vd., 2018).

Neugebauer ve ark. (2023) toprak nem oranı, hava durumu tahminleri ve bitki su ihtiyacına göre otomatik sulama sistemleri için karar almada toprak nem sensörü ile entegre edilmiş bulanık mantık modelini kullanmışlar, iyi tasarlanmış bir modelin, tarımda su kullanımını azaltarak kıt su kaynaklarının gerçekçi yönetimine katkıda bulunabileceğini bildirmişlerdir.

Teixeira ve ark. (2023) haşere kontrolünü sağlamak, aşırı pestisit kullanımını azaltmak ve ürün çıktısını ve kalitesini artırmak için entegre

zararlı yönetiminde karar ağacı algoritmasından faydalanılabileceğini önermişlerdir. Toro ve ark (2022) tarımsal sulamada gıda kaynaklı patojenlerin varlığını ve konsantrasyonlarını tahmin etmek ve bu patojenlerle ilişkili fiziko-kimyasal, zamansal, coğrafi, hava durumu ve antropojenik risk faktörlerini incelemek için birçok gözetimli öğrenme modeli (rastgele orman) oluşturmuşlardır. Bilim insanları, iklim değişikliğinin gıda güvenliği sistemlerini etkileyen önemli bir faktör olduğunu bildirmişlerdir (Loucks, 2023). Tarımsal üretimi artırmak ve iklim değişikliğiyle mücadele etmek için gelişmiş bir kablolu sensör ağı tabanlı nesnelerin interneti (IoT) sisteminin kullanılması toprak-bitki-atmosferik sürekliliğinin izlenmesinde önemli rol oynayacağı bildirilmiştir (Chamara vd., 2022; Singh vd., 2022; Ikram vd. 2024).

Hayvancılıkta Yapay Zeka Uygulamaları

Hayvancılık işletmelerinde günlük işlerin düzenlenmesi, üretim ve besleme, hastalık tespiti gibi hayvancılıkla ilgili birçok konuda yapay zeka destekli sistemlerinin kullanılması alternatif çözümler getirilmesinde önemli bir araç haline gelmiştir

Fuentes ve ark. (2021), otomatik sağım sistemi kullanan bir işletmede süt sığırlarının süt üretimi ve kalitesini tahmin etmek için kamera sistemleri kullanarak kalp atış hızı, solunum hızı, vücut sıcaklığının etkisini makine öğrenimi modellemesi ile tahmin etmişler, elde edilen verileri kullanan bir yapay sinir ağı ile günlük süt verimi, laktasyon süt verimi ve süt bileşenlerini tahmin etmede yüksek doğruluk ($R = 0.96$) elde etmişlerdir. Memmedova (2012), otomatik sağım sistemi kullanılan bir işletmede subklinik mastitisin tespitinde yapay sinir ağlarının kullanımında hassaslığın % 82 bulunduğunu bildirmiştir (Memmedova, 2012.; Tuvay ve Ermetin, 2023). Bovo ve ark. (2021), tek inek düzeyinde günlük süt veriminin değerlendirilmesi için rastgele orman tabanlı bir model tanımlamak ve test etmek için bir süt çiftliğinde bir yıl boyunca hem otomatik sağım sisteminden gelen üretim verilerini hem de iki termo-higrometrik sensörden gelen çevresel verileri toplamışlardır. Toplanan verilerin yorumlanması için kullanılan yedi öngörücüden oluşan istatistiksel model kullanmışlardır. Modelin aşırı sıcak koşulların ısı stresi etkilerine neden olması nedeniyle süt verimindeki düşüşü tespit edebildiğini bildirmişlerdir. Yapılan başka bir çalışmada hayvanların sağlık, davranış ve verimliliğini izlemek için sensörlerden elde edilen verilerinin analiz edilmesinde destek vektör makinaları modeli kullanılmıştır (Satoła ve Satoła, 2024; Pandey ve Mishra, 2024). Chen ve ark. (2008) tarafından Çin’de yapılan çalışmada, süt sığırları gübresindeki besin maddesi miktarını belirlemek amacıyla yapay sinir ağlarının kullanılabilirliği araştırılmış ve yapay sinir ağları modelinin sığır gübresindeki besin madde içeriğini tahmin etmek

için uygun bir araç olduğu bildirilmiştir. İnalpulat ve ark. (2016), mastitis tespitinde sütleri elektronik burun sistemi ölçümüne tabi tutmuşlardır. Sensör tepkilerine göre mastitik-olmayan (M-O) / mastitik (M) sütlerin ayırt edilmesinde yapay sinir ağları kullanılmıştır. Sonuçlar 12 sensör içerisinde 8 sensörün süt örneklerine tepki verdiğini göstermiştir.

Gıda Kalite Kontrolde Yapay Zeka Uygulamaları

Günümüzde kalite kontrol analizlerinde gıdaların doku, lezzet, raf ömrü ve duyuşal özelliklerinin değerlendirilmesi, sınıflandırılmasında yapay zeka modellerinin kullanımı yaygınlaşmıştır (Chhetri, 2024).

Doku, gıda kabulünü etkileyen parametrelerden biridir. Yapay sinir ağı modellemesi kullanılarak gıda dokusu ve kalite tahmin modelleri oluşturulabilmektedir. Elektronik koku ve tat alma cihazları gibi yapay duyuşal sistemlerin uygulanması, koku, aroma ve lezzet gibi özellikleri değerlendirmede ilgi görmüştür (Lan vd., 2022). Bu teknolojiler, gelecekte duyuşal değerlendirmelerden daha tarafsız ve standartlaştırılmış bir yöntem sağlamaktadır (Liu vd., 2020). YZ destekli duyuşal değerlendirme, gıda kalitesini değerlendirmeyi, duyuşal tanımlayıcılar kullanarak gıda ürünlerini sınıflandırmayı ve ayırt etmeyi, dijital dil ve burun teknolojisini kullanarak bunları analiz etmeyi içermektedir. YZ'yı duyuşal değerlendirmeye dahil etmek, biyolojik duyuşal reseptörleri taklit eden görsel sistemlere, basınç/mechanik ve termo/sıcaklık sensörlerine olan artan ihtiyaca karşılık gelmektedir. Bu, gıdanın değerlendirilmesinde birçok duyuşal değerlendirmeye hitap edebilir (Torricco ve Borssato, 2023; İkram vd., 2024).

Literatürler incelendiğinde gıda kalite kontrollerinde yapay zeka destekli uygulamalarla ilgili birçok çalışmanın yapılmış olduğu görülmektedir. Goyal ve Kumar Goyal (2012) peynirin 30 °C'de raf ömrünü tahmin etmek için yapay sinir ağı modelini sensörlerle birlikte kullanmışlardır. Yapay sinir ağına çok değişkenli verileri mükemmel bir performansla kullandığını bildirmişlerdir.

Çiğ süt kalitesini doğrudan etkileyen faktörlerden biri çiğ sütün depolama sıcaklığıdır. Yapılan bir çalışmada sinir ağı ve bulanık mantık modelinin çiğ süt depolama sıcaklığını tahmin etmede ve çiğ süt depolama sürecindeki çiğ süt sıcaklığının değişimini izlemede iyi bir performans gösterdiği bildirilmiştir. Çiğ sütün sıcaklık değişimlerini tahmin etmek için sinir ağı, kararlar almak için tahmin sıcaklığını geçmiş verilerle karşılaştıran bulanık mantık algoritmaları kullanılmıştır. Özellikle bozulma başlamadan önce çiğ sütün izlenmesi ve uyarı sisteminin oluşturulması ile üreticiler kısa mesaj uyarı (SMS) alabilmişlerdir. Bu teknolojilere nesnelerin interneti'nin (IOT) eklenmesi ile sıcaklık takibinde izlenebilir-

lik sağlanmıştır (Ma vd., 2018). Yapılan bir çalışmada, farklı yapay sinir ağ algoritmaları uygulanarak, ayvaların kurutma işlemi sırasında nem oranları başarılı bir şekilde modellenmiştir (Chasiotis vd., 2020). Omari ve ark. (2018) yapay sinir ağı modelini kurutma işlemi sırasında mantarların nem içeriğini tahmin etmede kullanmışlardır (Gonzalez vd., (2017). Bilgisayarlı görüntüleme algoritmaları, yakın kızılötesi spektroskopisi ve makine öğrenimi algoritmaları kullanarak biranın kimyasal bileşenlerini %95'lik yüksek bir genel doğrulukla sınıflandırabilmişlerdir. Kaveh vd (2018), patates, sarımsak ve kavun kurutmada konvektif sıcak hava kurutucusunda nem yayılımı ve özgül enerji tüketiminin tahmini için uyarlanabilir nöro-bulanık çıkarım sistemi ve yapay sinir ağ modelini kullanmışlardır. Villager-Aguilar vd. (2020) bilgisayarlı görüş sistemini bulanık mantık ve yapay sinir ağı ile birlikte kullanarak, bulanık mantık için %88'lik maksimum doğruluk ve yapay sinir ağı için %100'lük bir doğrulukla dolmalık biberlerin olgunluğunu tahmin eden bir yapay görme sistemini başarıyla geliştirmişlerdir. Başka bir çalışmada çikolatanın fizikokimyasal analizi (pH, brix, viskozite ve renk) ve duyu özellikleri (beş tat duyusu) nin tespiti için yakın kızılötesi spektroskopisi (NIRS) kullanılmıştır. Elde edilen bu veriler ve sonuçlar, çikolatanın fizikokimyasal parametrelerini ve duyu özelliklerini tahmin etmek için yapay sinir ağı modeli geliştirmek için kullanılmıştır. Geliştirilen modellerin, kimyasal parametreleri kullanarak çikolatanın duyu özelliklerini düşük maliyetle ve doğru bir şekilde belirlediği belirtilmiştir (Gunaratne vd., 2019).

Gıda aroması, duyu kaliteyi, tüketici tercihlerini ve gıda kabul edilebilirliğini etkileyen önemli bir özelliktir. Aromayı geleneksel deneysel yöntemlerle değerlendirmek ve düzenlemek zaman alıcıdır ve büyük miktarda veriyi işleyebilmek zordur. Hesaplamalı tekniklerin hızla gelişmesi ve gıda aroması alanındaki verilerin giderek artmasıyla, yüksek tahmin yeteneği ve doğruluğa sahip makine öğrenimi modelleri, gıda aromasının tahmininde ve düzenlenmesinde önemli araçlar haline gelmiştir (Bouysset vd., 2020). Fu vd. (2025), isticridyelerden umami peptitlerinin hızlı bir şekilde tanımlanmasında makine öğreniminin etkinliğini ve e- dil ile tat reseptörleri etkileşimlerini incelemişlerdir. Makine öğrenimi araçlarının moleküler yapı ve duyu değerlendirmeyi birleştiren entegre kullanılması isticridye hidrolizatlarından üç yeni umami peptidin tahmin edilmesini kolaylaştırmışlardır.

Gıdaların raf ömrünün belirlenmesi önemli bir gıda kalite kriteridir. E-algılama teknikleri, geleneksel laboratuvar yöntemlerine kıyasla daha hızlı bilgi sağlamak üzere tasarlanmıştır (Yakubu vd., 2022). Ruiz-Rico vd (2013), soğuk depolamada taze morina filetolarının raf ömrünü değerlendirmek için sensörden oluşan e-dil kullanmışlardır. Morina file-

toları yedi güne kadar depolanmış ve her gün e-dil ölçümleriyle birlikte fiziko-kimyasal ve mikrobiyal analizler gerçekleştirilmiştir. Yapay zeka analiz sonuçları fiziko-kimyasal ve mikrobiyal sonuçlara uygun olarak, e-dilin numuneleri depolama sürelerine göre kümelemede başarılı olduğunu göstermiştir (Ruiz-Rico vd.,2013; Grassi vd., 2023). Bougrini ve ark. (2014), pastörize süt örneklerinin, soğuk depolama süresinin tespitinde e-burun ve e-dili birlikte kullanmışlar, elde edilen veriler için kullanılan destek vektör makinası yönteminin, pastörize sütün depolama süresinin tanınmasında %100 doğruluk sağladığını bildirmişlerdir. Barbon vd. (2018) tavuk eti kalite sınıflandırmasında yakın kızıl ötesi spektroskopisinden elde edilen verileri destek vektör makinesi algoritması kullanarak %77,2 hassasiyetle karşılaştırabilmişlerdir. Jiang vd. (2017), PSE (Soluk, Sofe, Eksüdatif) ve DFD (Koyu, sert, kuru) ve normal eti ayırt etmek için yakın kızılötesi spektroskopisinden elde edilen veriler için destek vektör makinesi tabanlı yöntemler kullanılarak sınıflandırma modeli geliştirmişlerdir.

Gıda Güvenliğinde Yapay Zeka Uygulamalar

Gıda güvenliği, gıdalarda olabilecek fiziksel, kimyasal, biyolojik zararların bertaraf edilmesi için alınan tedbirler bütünüdür. Gıda güvenliği alanında gıda kaynaklı patojenlerin tespiti ve tanımlanmasında, gıda tedarik zinciri boyunca gıda güvenliği riskinin tahmini, izlenmesi ve optimizasyonunda YZ destekli birçok çalışma mevcuttur.

Yapay zeka uygulamaları patojen salgınlarını tahmin etmek ve önlemek için geçmiş verileri ve tüketici geri bildirimlerini analiz ederek gıda güvenliğine katkıda bulunabilmektedir (Dhal ve Kar, 2025). Yapılan bir çalışmada *Escherichia coli* ile kontamine olmuş tavuk etindeki bozulmalar gaz sensörleri kullanan e- burun ile tespit edilmiş, taze ve kontamine numunelerin verileri, Rastgele orman sınıflandırıcısı tarafından sırasıyla %99,25 ve %98,42 hassasiyetle sınıflandırılmış, destek vektör makinası ise taze ve kontamine numuneleri sırasıyla %98,61 ve %86,66 doğrulukla doğru bir şekilde tanımlamıştır Astuti vd., 2021). Carrillo-Gómez vd. (2021), pastörize süt örneklerinde *Escherichia coli*'yi *Klebsiella pneumoniae* ve *Salmonella enterica*'dan ayırt etmede e-dil ve e-burnu test etmişler ve sınıflandırmada destek vektör makinası algoritmaları kullanarak %94,7 başarı oranında doğru sınıflandırma sağlamışlardır.

Vajdi vd. (2019), balık bozulmasını optimum sınıflandırıcı ile tespit etmek amacıyla balık uçucu maddelerini tespit etmek üzere gaz sensörü içeren elektronik bir burun geliştirmişlerdir. Kodogiannis ve Alshejari (2016), yaptıkları çalışmada e- burunun performansını farklı depolama sıcaklıklarında aerobik koşullarda depoladıkları dana etinin bozulması-

nın izlenmesinde kullanmışlardır. Bulanık mantık modellemesiyle dana etinin kalite sınıflandırılması yapılmış ve bu metodoloji koku bileşenlerinden mikrobiyal popülasyonu tahmin etmek için geliştirilmiştir.

Yapay zeka, son yıllarda gıda sahteciliği (taklit, tağşiş) sorununu ele almak için kullanılmaktadır. Gıdada sahtecilik gıda güvenliği açısından önemli sorunlardan biridir. (Othman vd., 2023a). Sahtecilik, genellikle tüketicileri veya yetkilileri aldatmak amacıyla gerçek ürünlere benzeyecek şekilde yapılmış sahte veya taklit malların üretimi ve satışı anlamına gelir. Yapay zeka, gerçek ve sahte ürünlerin veri kümelerini kullanarak, algoritmaları gıdaların bileşimlerindeki farklılıkları tanıyacak şekilde eğiterek gıda sahteciliğini tespit edebilir. Yapay zeka ne kadar fazla gerçek ve sahte ürünle karşılaşır, yeni verilere uyum sağlama kapasitesi zamanla hassasiyetini artırabilir. (Othman vd., 2023a).

Gıda sahteciliğiyle mücadelede yenilebilir yağ, et, meyve, sebze ve içecek endüstrilerinde kusur tespitinde YZ'nın giderek daha fazla kullanıldığı bildirilmiştir (Mavani vd., 2022a). Bu yöntem, manuel inceleme veya geleneksel laboratuvar tekniklerinde gözden kaçabilecek sahteciliği objektif bir şekilde tespit etmek için önemli bir potansiyel olarak görülmektedir (Aslam vd., 2023; Das vd., 2025). Bu konuda yapılan literatür çalışmaları vardır. Izquierdo vd. (2020), termografik kamera ve evrişimli sinir ağı kullanarak saf bal ve sahte bal örneklerini sınıflandırmada %95'e kadar doğruluk elde ettiklerini bildirmişlerdir. Kiani vd. (2017), sahte safranı tanımlamak için bilgisayarlı görme sistemini e- burunla birlikte kullanmıştır. Amsaraj vd. (2021), destek vektör makinası tabanlı regresyon modeli ve kızılötesi spektroskopisi-FT-IR kullanarak sütte yapılan birden fazla sahtekarlığın (nişasta, üre ve sakkaroz katılması) eş zamanlı olarak %92 doğrulukta tahmin edilebildiğini bildirmiştir.

Bozulmuş ete renk ve kür maddeleri uygulayarak taze et özelliği kazandırmak yapılan hilelerden biridir. Jo vd. (2023), taze görünmesi için sahtecilik uygulanmış sığır etini tespit etmek için derin öğrenmeye dayalı bir spektroskopik yöntem denemişlerdir. Renklendirme ve kütleme çözeltisiyle muamele edilen sahte grup ve böyle bir muamele görmeyen standart grup olarak iki grup oluşturmuşlar ve her iki gruptan toplanan spektral verilerle derin öğrenme modelini eğitmişlerdir. Derin öğrenme modeli, spektral bilgileri kullanarak sahtecilik yapılmış sığır eti sınıflandırması için optimum bir desen oluşturabilmiştir. Bu çalışmada spektral yöntem ve derin öğrenmenin birlikte kullanımıyla, tüketici sağlığının ve gıda güvenliğinin korunması desteklenmiştir.

Zheng vd.,2021, koyun eti kıymasının domuz eti kıymasıyla karıştırılması sahteciliğinin tespitinde termal görüntüleme ve evrişimsel sinir

ağını birlikte kullanarak tahmin modeli belirlemişlerdir. Modelin doğrulama ve test setlerinin doğruluğunun sırasıyla %99,97 ve %99,99 olduğunu, evrimsel sinir ağı ile birleştirilen termal görüntülemenin, farklı numunelerin sınıflandırılmasında ve sahtecilik oranının kantitatif tahmininde iyi sonuçlar elde edildiğini bildirmişlerdir.

da Silva Medeiros vd., 2023, tereyağının taşışın tespitinde sınıflandırma modelleri (destek vektör makinası) ile yakın kızılötesi (NIR) spektrometrenin potansiyelini araştırmışlar, regresyon modellerinin süt yağının diğer yağlarla yer değiştirme yüzdesini tahmin etmede %90'dan fazla doğruluk gösterdiğini belirtmişlerdir.

Sonuç

Son yıllarda, YZ tabanlı teknolojiler gıda tedarik zincirinde önem kazanmaya başlamıştır. Giderek artan sayıda gıda işletmesi, ürün kalitesini artırmak, tüketici ihtiyaçlarını karşılamak, gıda israfını önlemek amacıyla yapay zeka ve akıllı sistemlerden yararlanacaktır. Çiftlikten pazara kadar geleneksel kalite kontrol yöntemleri zamanında tespit ve izlenebilirlik konusunda yavaştır ve genellikle maliyetlidir. Geleneksel kalite kontrol yöntemleriyle karşılaştırıldığında, yapay zeka teknolojisi büyük miktarda veriyi hızla toplayabilir ve ayrıntılı analizler yapabilir, tedarik zincirinin tüm aşamalarında kaynak kullanımını iyileştirebilir, üreticilerin ve operatörlerin uygun kararlar almasına yardımcı olabilir

Yapay zeka, gıda kalite göstergelerini izlemek ve tahmin etmek için makine öğrenimleri, görüntü işleme ve sensörlerden gelen verileri kullanır. Yapay zekayı blok zinciri ve IoT tabanlı sistemlere dahil ederek, izlenebilirliği takip etme, değişiklikleri kontrol etme, güvenlik kontrolü sağlanabilir, veri analizi ve modellemesi geliştirilebilir. YZ, tedarik zincirinin her noktasından gelen verileri hızlı ve anında izleyerek ve analiz ederek olası riskleri belirleyebilir, erken uyarı sağlayabilir ve harekete geçebilir. Örneğin, yapay zeka hızlı ve anında işlenen ve erişilebilen verilere dayanarak nakliye rotalarını ayarlayabilir ve depo düzenlerini iyileştirebilir. Ayrıca, yapay zeka ile birleştirilen blockchain ve nesnelerin İnterneti (IoT) teknolojisi, nakliye sırasında ürünlerin güvenliğini ve kalitesini sağlamak için gıda nakliye sürecinin hızlı ve anında izlenmesini, takip edilmesini sağlayabilir. Sensör teknolojisi sıcaklık ve nem gibi çevresel faktörleri izleyebilir ve yapay zeka sensörler aracılığıyla toplanan bu verileri analiz ederek zamanında geri bildirim ve ayarlamalar yapabilir

YZ sistemleri, verileri analiz etmek, öğrenmek ve bu öğrenmeye dayalı tahminler veya kararlar almak için algoritmalar ve istatistiksel modeller kullanmaktadır. Belirli bir sorun için doğru öğrenme algoritmasını seçmek, öğrenme modelinin başarısı için kritik öneme sahiptir. Tek bir

algoritma tüm sorunları çözme yeteneğine sahip değildir. Yapılan birçok literatür çalışmasında çeşitli algoritmaların bir kategorizasyon görevi için test edildiği ve en iyisinin performans ölçütlerine göre seçildiği karşılaştırmalı bir yaklaşım benimsenmiştir.

Sayısız faydasına rağmen, yapay zeka uygulamalarında bazı engeller bulunmaktadır. Yüksek uygulama maliyetleri ve teknolojik karmaşıklık, özellikle sınırlı kaynaklara sahip küçük ölçekli çiftçiler ve işletmeler için önemli engeller oluşturmaktadır. Blockchain, nesnelerin interneti (IoT) teknolojisi gibi teknolojileri YZ ile entegre etmek için altyapıya, teknik uzmanlığa ve eğitime önemli yatırımlar yapılması gerekmektedir. Gelecekteki araştırmalar, algoritmaların belirli uygulamalar (örneğin, tarım ürünlerindeki kusurları belirleme ve gıdalardaki sahteciliği tespit etme) için eğitildiği ve değerlendirildiği ve ardından pratik uygulama için onaylandığı bir standart geliştirmeye odaklanmalıdır. Birden fazla sensör türünü entegre etmek, çeşitli sensörlerden veri toplamak ve her bir sensörün kullanımında avantajlarını ve sınırlamalarını değerlendirmek için daha çok çalışmaya ihtiyaç vardır. Güvenilir analitik teknikler geliştirildikçe, yz teknolojisi bu sorunlara yenilikçi çözümler sunulabilir.

Kaynakça

- Aguilar, E., Bolaños, M., Radeva, P. (2018). Exploring food detection using CNNs. In *Computer Aided Systems Theory–EUROCAST 2017: 16th International Conference, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, February 19-24, 2017, Revised Selected Papers, Part II* 16, 339-347.
- Ahmed, S. ve Broek, N. T. (2017). Blockchain could boost food security. *Nature*, 550(7674), 43-43.
- Akın, E. ve Şahin, M. E. (2024). Derin Öğrenme ve Yapay Sinir Ağı Modelleri Üzerine Bir İnceleme. *EMO Bilimsel Dergi*, 14(1), 27-38.
- Altaş, İ. H. (1999). Bulanık mantık: Bulanıklılık kavramı. *Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e*, 62, 80-85.
- Amsaraj, R., Ambade, N. D., Mutturi, S. (2021). Variable selection coupled to PLS2, ANN and SVM for simultaneous detection of multiple adulterants in milk using spectral data. *International Dairy Journal*, 123, 105172.
- Aslam, R., Sharma, S. R., Kaur, J., Panayampadan, A. S., Dar, O. I. (2023). A systematic account of food adulteration and recent trends in the non-destructive analysis of food fraud detection. *Journal of Food measurement and Characterization*, 17(3), 3094-3114.
- Astuti, S. D., Tamimi, M. H., Pradhana, A. A., Alamsyah, K. A., Purnobasuki, H., Khasanah, M., ... Syahrom, A. (2021). Gas sensor array to classify the chicken meat with E. coli contaminant by using random forest and support vector machine. *Biosensors and Bioelectronics: X*, 9, 100083.
- Azeem, M. F., Hanmandlu, M., Ahmad, N. (2000). Generalization of adaptive neuro-fuzzy inference systems. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 11(6), 1332-1346.
- Barbin, D. F., Kaminishikawahara, C. M., Soares, A. L., Mizubuti, I. Y., Grespan, M., Shimokomaki, M., Hirooka, E. Y. (2015). Prediction of chicken quality attributes by near infrared spectroscopy. *Food chemistry*, 168, 554-560.
- Barbon Jr, S., Costa Barbon, A. P. A. D., Mantovani, R. G., Barbin, D. F. (2018). Machine learning applied to near-infrared spectra for chicken meat classification. *Journal of Spectroscopy*, 2018(1), 8949741.
- Belson, W. A. (1959). Matching and prediction on the principle of biological classification. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 8(2), 65-75. <https://www.ibm.com/think/topics/random-forest>
- Ben Ayed, R., Hanana, M. (2021). Artificial intelligence to improve the food and agriculture sector. *Journal of Food Quality*, 2021(1), 5584754.
- Bougrini, M., Tahri, K., Haddi, Z., El Bari, N., Llobet, E., Jaffrezic-Renault, N., Bouchikhi, B. (2014). Aging time and brand determination of pasteurized milk using a multisensor e-nose combined with a voltammetric e-tongue. *Materials Science and Engineering: C*, 45, 348-358.
- Bouysset, C., Belloir, C., Antonczak, S., Briand, L., Fiorucci, S. (2020). Novel scaffold of natural compound eliciting sweet taste revealed by machine learning. *Food chemistry*, 324, 126864.

- Bovo, M., Agrusti, M., Benni, S., Torreggiani, D., Tassinari, P. (2021). *Random Forest Modelling of Milk Yield of Dairy Cows under Heat Stress Conditions. Animals* 11, 1305.
- Carrillo-Gómez, J. K., Acevedo, C. M. D., García-Rico, R. O. (2021). Detection of the bacteria concentration level in pasteurized milk by using two different artificial multisensory methods. *Sensing and Bio-Sensing Research*, 33, 100428.
- Chasiotis, V.K., Tzempelikos, D.A., Filios, A.E., Moustris, K.P. (2020). Artificial neural network modelling of moisture content evolution for convective drying of cylindrical quince slices. *Comput Electron Agric* 172(7), 105074.
- Chamara, N., Islam, M. D., Bai, G. F., Shi, Y., Ge, Y. (2022). Ag-IoT for crop and environment monitoring: Past, present, and future. *Agricultural Systems*, 203, 103497. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103497>
- Chen, G. ve Pham, T. T. (2000). *Introduction to fuzzy sets, fuzzy logic, and fuzzy control systems*. CRC press.
- Chen, L.J., Cu,i L.Y., Xing, L., Han, L.J. (2008). Prediction of the nutrient content in dairy manure using artificial neural network modeling. *Journal of Dairy Science*, 91(12), 4822- 4829.
- Chhetri, K. B. (2024). Applications of artificial intelligence and machine learning in food quality control and safety assessment. *Food Engineering Reviews*, 16(1), 1-21. <https://doi.org/10.1007/s12393-023-09363-1>.
- Class, L. C., Kuhnen, G., Rohn, S., Kuballa, J. (2021). Diving deep into the data: a review of deep learning approaches and potential applications in foodomics. *Foods*, 10(8), 1803.
- Çerkez, M. ve Kızıldemir, Ö. (2020). Yiyecek –içecek İşletmelerinde yapay zeka kullanımı. *Türk Turizm Araştırmaları Dergisi*, 4(2), 1264-1278)
- da Silva Medeiros, M. L., Brasil, Y. L., Cruz-Tirado, L. J. P., Lima, A. F., Godoy, H. T., Barbin, D. F. (2023). Portable NIR spectrometer and chemometric tools for predicting quality attributes and adulteration levels in butteroil. *Food control*, 144, 109349. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109349>.
- Das, P., Altemimi, A. B., Nath, P. C., Katyal, M., Kesavan, R. K., Rustagi, S., ... Mohanta, Y. K. (2024). Recent advances on artificial intelligence-based approaches for food adulteration and fraud detection in the food industry: Challenges and opportunities. *Food Chemistry*, 142439.
- Dayan, A. ve Yılmaz, A. (2022). Doğal dil işleme ve derin öğrenme algoritmaları ile makine dili modellemesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 13(3), 467-475. <https://doi.org/10.24012/dumf.1131565>.
- de Oliveira, E. M., Leme, D. S., Barbosa, B. H. G., Rodarte, M. P., Pereira, R. G. F. A. (2016). A computer vision system for coffee beans classification based on computational intelligence techniques. *Journal of Food engineering*, 171, 22-27.
- Deng, L., Yu, D. (2014). Deep learning: methods and applications. *Foundations and trends® in signal processing*, 7(3–4), 197-387.

- Dhal, S.B. ve Kar, D. (2025). Leveraging artificial intelligence and advanced food processing techniques for enhanced food safety, quality, and security: a comprehensive review. *Discov Appl Sci* 7, 75. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06472-w>
- Ding, H., Tian, J., Yu, W., Wilson, D. I., Young, B. R., Cui, X., ... Li, W. (2023). The application of artificial intelligence and big data in the food industry. *Foods*, 12(24), 4511.
- Estelles-Lopez, L., Ropodi, A., Pavlidis, D., Fotopoulou, J., Gkousari, C., Peyrodie, A., ... Mohareb, F. (2017). An automated ranking platform for machine learning regression models for meat spoilage prediction using multi-spectral imaging and metabolic profiling. *Food research international*, 99, 206-215.
- Fuentes, S., Gonzalez Viejo, C., Tongson, E., Lipovetzky, N., Dunshea, F.R. (2021). Biometric physiological responses from dairy cows measured by visible remote sensing are good predictors of milk productivity and quality through artificial intelligence. *Sensors*, 21(20), 6844.
- Fu, B., Li, M., Chang, Z., Yi, J., Cheng, S., Du, M. (2025). Identification of novel umami peptides from oyster hydrolysate and the mechanisms underlying their taste characteristics using machine learning. *Food Chemistry*, 142970.
- Gao, J., Nuytens, D., Lootens, P., He, Y., Pieters, J. G. (2018). Recognising weeds in a maize crop using a random forest machine-learning algorithm and near-infrared snapshot mosaic hyperspectral imagery. *Biosystems engineering*, 170, 39-50
- Gonzalez Viejo, C. ve Fuentes, S. (2022). Digital assessment and classification of wine faults using a low-cost electronic nose, near-infrared spectroscopy and machine learning modelling. *Sensors*, 22(6), 2303.
- Gonzalez Viejo, C., Fuentes, S., Torrico, D., Howell, K., Dunshea, F. R. (2018). Assessment of beer quality based on foamability and chemical composition using computer vision algorithms, near infrared spectroscopy and machine learning algorithms. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(2), 618-627.
- Goyal, S., & Kumar Goyal, G. (2012). Shelflife prediction of processed cheese using artificial intelligence ANN technique. *Hrvatski časopis za prehrambenu tehnologiju, biotehnologiju i nutricionizam*, 7(3-4), 184-187).
- Grassi, S., Benedetti, S., Casiraghi, E., Buratti, S. (2023). E-sensing systems for shelf life evaluation: A review on applications to fresh food of animal origin. *Food Packaging and Shelf Life*, 40, 101221.
- Gunaratne, T.M., Viejo, C.G., Gunaratne, N.M., Torrico, D.D., Dunshea, F.R., Fuentes, S. (2019). Chocolate quality assessment based on chemical fingerprinting using near infra-red and machine learning modeling. *Foods* 8(10):1–11. <https://doi.org/10.3390/foods8100426>
- Ha, D., Sun, Q., Su, K., Wan, H., Li, H., Xu, N., ... Wang, P. (2015). Recent achievements in electronic tongue and bioelectronic tongue as taste sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 207, 1136-1146.

- Helo, P. ve Hao, Y. (2022). Artificial intelligence in operations management and supply chain management: An exploratory case study. *Production Planning & Control*, 33(16), 1573-1590.
- Hill, B. (2023). Taking the help or going alone: ChatGPT and class assignments.
- Ikram, A., Mehmood, H., Arshad, M. T., Rasheed, A., Noreen, S., Gnedeka, K. T. (2024). Applications of artificial intelligence (AI) in managing food quality and ensuring global food security. *CyTA - Journal of Food*, 22(1). <https://doi.org/10.1080/19476337.2024.2393287>.
- Isık, A. H., Alakus, F., Eskicioğlu, Ö. C. (2021). Hayvancılıkta robotik sistemler ve yapay zekâ uygulamaları. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9(6), 370-382.
- Izquierdo, M., Lastra-Mejías, M., González-Flores, E., Cancilla, J. C., Pérez, M., Torrecilla, J. S. (2020). Convolutional decoding of thermographic images to locate and quantify honey adulterations. *Talanta*, 209, 120500.
- İnalpulat, M., Kızıl, Ü., Bilgücü, E., Genç, L. (2016). Süt Somatik Hücre Sayısının E-Burun ile Belirlenmesi. Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2(1), 22-35. <https://doi.org/10.28979/comufbed.307873>
- Jaison, F. ve Ramaiah, N. S. (2022). A survey on traceability in food safety system using blockchain. *Journal of Discrete Mathematical Sciences and Cryptography*, 25(3), 793-799.
- Javaid, M., Haleem, A., Khan, I. H., Suman, R. (2023). Understanding the potential applications of Artificial Intelligence in Agriculture Sector. *Advanced Agrochem*, 2(1), 15-30.
- Jiang, H., Yoon, S. C., Zhuang, H., Wang, W., Yang, Y. (2017). Evaluation of factors in development of Vis/NIR spectroscopy models for discriminating PSE, DFD and normal broiler breast meat. *British Poultry Science*, 58(6), 673-680.
- Jo, E., Lee, Y., Lee, Y., Baek, J., Kim, J. G. (2023). Rapid identification of counterfeited beef using deep learning-aided spectroscopy: Detecting colourant and curing agent adulteration. *Food and Chemical Toxicology*, 181, 114088.
- Kaur, P., Harnal, S., Tiwari, R., Upadhyay, S., Bhatia, S., Mashat, A., Alabdali, A. M. (2022). Recognition of leaf disease using hybrid convolutional neural network by applying feature reduction. *Sensors*, 22(2), 575.
- Kaveh, M., Sharabiani, V. R., Chayjan, R. A., Taghinezhad, E., Abbaspour-Gilandeh, Y., Golpour, I. (2018). ANFIS and ANNs model for prediction of moisture diffusivity and specific energy consumption potato, garlic and cantaloupe drying under convective hot air dryer. *Information Processing in Agriculture*, 5(3), 372-387.
- Khan, M. I. H., Sablani, S. S., Nayak, R., Gu, Y. (2022). Machine learning-based modeling in food processing applications: State of the art. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 21(2), 1409-1438.
- Kiani, S., Minaei, S., Ghasemi-Varnamkhasti, M. (2017). Integration of computer vision and electronic nose as non-destructive systems for saffron

- adulteration detection. *Computers and Electronics in Agriculture*, 141, 46-53.
- Kim, H. M. ve Laskowski, M. (2018). Toward an ontology-driven blockchain design for supply-chain provenance. *Intelligent Systems in Accounting, Finance and Management*, 25(1), 18-27.
- Kodogiannis, V. S. ve Alshejari, A. (2016). Neuro-fuzzy based identification of meat spoilage using an electronic nose. In *2016 IEEE 8th International Conference on Intelligent Systems (IS)* (pp. 96-103). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IS.2016.7737406>.
- Konstantakopoulos, F. S., Georga, E. I., Fotiadis, D. I. (2023). A review of image-based food recognition and volume estimation artificial intelligence systems. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, 17, 136–152. <https://doi.org/10.1109/RBME.2023.3283149>
- Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., Bochtis, D. (2018). Machine Learning in Agriculture: A Review. *Sensors*, 18(8), 2674. <https://doi.org/10.3390/s18082674>.
- Lan, T., Wang, J., Yuan, Q., Lei, Y., Peng, W., Zhang, M., ... Ma, T. (2022). Evaluation of the color and aroma characteristics of commercially available Chinese kiwi wines via intelligent sensory technologies and gas chromatography-mass spectrometry. *Food Chemistry: X*, 15, 100427
- Loucks, D. P. (2023). Meeting climate change challenges: searching for more adaptive and innovative decisions. *Water Resources Management*, 37(6), 2235-2245.
- Liu, J., Zuo, M., Low, S. S., Xu, N., Chen, Z., Lv, C., ... Men, H. (2020). Fuzzy evaluation output of taste information for liquor using electronic tongue based on cloud model. *Sensors*, 20(3), 686.
- Ma, P., Tsai, S., He, Y., Jia, X., Zhen, D., Yu, N., ... Wei, C. I. (2024). Large language models in food science: Innovations, applications, and future. *Trends in Food Science & Technology*, 104488
- Ma, W., Fan, J., Li, Q., Tang, Y. (2018). A raw milk service platform using BP Neural Network and Fuzzy Inference. *Information Processing in Agriculture*, 5(3), 308-319. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2018.04.001>.
- Marini, F. (2009). Artificial neural networks in foodstuff analyses: Trends and perspectives A review. *Analytica Chimica Acta*, 635(2), 121-131).
- Mavani, N. R., Ali, J. M., Othman, S., Hussain, M. A., Hashim, H., Rahman, N. A. (2022a). Application of artificial intelligence in food industry—a guideline. *Food Engineering Reviews*, 14(1), 134-175.
- Mavani, N. R., Ali, J. M., Othman, S., Hussain, M. A., Hashim, H., Rahman, N. A. (2022). Application of artificial intelligence in food industry—a guideline. *Food Engineering Reviews*, 14(1), 134-175.
- McCulloch, W. S. ve Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *The bulletin of mathematical biophysics*, 5, 115-133.
- Meenu, M., Kurade, C., Neelapu, B. C., Kalra, S., Ramaswamy, H. S., Yu, Y. (2021). A concise review on food quality assessment using digital image

- processing. *Trends in Food Science & Technology*, 118, 106-124.. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.09.014>
- Memmedova, N. (2012). Süt Sığırlarında Mastitisin Bazı Yapay Zekâ Yöntemleri Kullanılarak Erken Dönemde Tespiti. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Zootekni Anabilim Dalı. Konya.
- Nargesi, M. H., Amiriparian, J., Bagherpour, H., Kheiralipour, K. (2024). Detection of different adulteration in cinnamon powder using hyperspectral imaging and artificial neural network method. *Results in Chemistry*, 9, 101644).
- Neugebauer, M., Akdeniz, C., Demir, V., Yurdem, H. (2023). Fuzzy logic control for watering system. *Scientific Reports*, 13(1), 18485.
- Nunes, C. A., Ribeiro, M. N., de Carvalho, T. C., Ferreira, D. D., de Oliveira, L. L., Pinheiro, A. C. (2023). Artificial intelligence in sensory and consumer studies of food products. *Current Opinion in Food Science*, 50, 101002.
- Omari A., Behrooz-Khazaei N., Sharifian, F. (2018). Drying kinetic and artificial neural network modeling of mushroom drying process in microwave-hot air dryer. *J Food Process Eng* 41(7):110. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12849> .
- Othman, S., Mavani, N. R., Hussain, M. A., Abd Rahman, N., Ali, J. M. (2023 a). Artificial intelligence-based techniques for adulteration and defect detections in food and agricultural industry: A review. *Journal of Agriculture and Food Research*, 12, 100590. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100590>.
- Ouyang, L., Wu, J., Jiang, X., Almeida, D., Wainwright, C., Mishkin, P., ... Lowe, R. (2022). Training language models to follow instructions with human feedback. *Advances in neural information processing systems*, 35, 27730-27744.
- Pandey, D. K. ve Mishra, R. (2024). Towards sustainable agriculture: Harnessing AI for global food security. *Artificial Intelligence in Agriculture*..
- Porep, J. U., Kammerer, D. R., Carle, R. (2015). On-line application of near infrared (NIR) spectroscopy in food production. *Trends in Food Science & Technology*, 46(2), 211-230.
- Press, W. H. (2007). *Numerical recipes 3rd edition: The art of scientific computing*. Cambridge university press..
- Press, W., Teukolsky, S., Vetterling, W., Flannery, B. (2007). *Numerical Recipes: The art of Scientific Computing*, Thrid Edition in C++.
- Press, William H., Teukolsky, Saul A., Vetterling, William T., Flannery, Brian P., *Numerical Recipes, The Art of Scientific Computing*, 3.bs., Cambridge University Press, 2007;883.
- Ruiz-Rico, M., Fuentes, A., Masot, R., Alcañiz, M., Fernández-Segovia, I., Barat, J. M. (2013). Use of the voltammetric tongue in fresh cod (*Gadus morhua*) quality assessment. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 18, 256-263.
- Satoła, A. ve Satoła, K. (2024). Performance comparison of machine learning models used for predicting subclinical mastitis in dairy cows: Bagging, boosting, stacking, and super-learner ensembles versus single machine

- learning models. *Journal of Dairy Science*, 107(6), 3959-3972.
- Shahbazi, Z. ve Byun, Y. C. (2020). A procedure for tracing supply chains for perishable food based on blockchain, machine learning and fuzzy logic. *Electronics*, 10(1), 41.
- Sharma, R., Nath, P. C., Lodh, B. K., Mukherjee, J., Mahata, N., Gopikrishna, K., ... Bhunia, B. (2024). Rapid and sensitive approaches for detecting food fraud: A review on prospects and challenges. *Food Chemistry*, 139817.
- Singh, A., Vaidya, G., Jagota, V., Darko, D. A., Agarwal, R. K., Debnath, S., Potrich, E., Khan, R. (2022). Recent advancement in postharvest loss mitigation and quality management of fruits and vegetables using machine learning frameworks. *Journal of Food Quality*, 2022, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2022/6447282>.
- Sofu, A., Demir, N., Ekinçi, F. Y. (2007). Gıda Bilimi ve Teknoloji Alanında Yapay Zeka Uygulamaları. *Gıda*, 32(2), 93-99.
- Suykens, J. A. ve Vandewalle, J. (1999). Least squares support vector machine classifiers. *Neural processing letters*, 9, 293-300.
- Thapa, A., Nishad, S., Biswas, D., Roy, S. (2023). A comprehensive review on artificial intelligence assisted technologies in food industry. *Food Bioscience*, 103231.
- Tassis, L.M., Tozzi de Souza, J.E., Krohling, R.A. (2021) A deep learning approach combining instance and semantic segmentation to identify diseases and pests of coffee leaves from in-field images. *Comput Electron Agric* 186:106191. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106191>.
- Teixeira, A. C., Ribeiro, J., Morais, R., Sousa, J. J., Cunha, A. (2023). A Systematic Review on Automatic Insect Detection Using Deep Learning. *Agriculture*, 13(3), 713. <https://doi.org/10.3390/agriculture13030713>.
- Toro, M., Weller, D., Ramos, R., Diaz, L., Alvarez, F. P., Reyes-Jara, A., ... Adell, A. D. (2022). Environmental and anthropogenic factors associated with the likelihood of detecting Salmonella in agricultural watersheds. *Environmental Pollution*, 306, 119298
- Tuvay, N.H. ve Ermetin, O. (2023). Yapay zekâ teknolojilerinin hayvancılıkta kullanımı. *Hayvansal Üretim* 64(1): 48-58. <https://doi.org/10.2918/5/hayuretim.1034328>.
- Torrico, D. D., Mehta, A., Borssato, A. B. (2023). New methods to assess sensory responses: A brief review of innovative techniques in sensory evaluation. *Current opinion in food science*, 49, 100978.
- Qu, J.H., Liu, D., Cheng, J.H., Sun, D.W., Ma, J., Pu, H., Zeng, X.A. (2015) Applications of near-infrared spectroscopy in food safety evaluation and control: a review of recent research advances. *Crit Rev Food Sci Nutr* 55(13):1939–1954. <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.871693>.
- Vajdi, M., Varidi, M. J., Varidi, M., Mohebbi, M. (2019). Using electronic nose to recognize fish spoilage with an optimum classifier. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 13, 1205-1217.

- Villaseñor-Aguilar, M. J., Bravo-Sánchez, M. G., Padilla-Medina, J. A., Vázquez-Vera, J. L., Guevara-González, R. G., García-Rodríguez, F. J., Barranco-Gutiérrez, A. I. (2020). A maturity estimation of bell pepper (*Capsicum annuum* L.) by artificial vision system for quality control. *Applied Sciences*, 10(15), 5097.
- Yakubu, H. G., Kovacs, Z., Toth, T., Bazar, G. (2022). Trends in artificial aroma sensing by means of electronic nose technologies to advance dairy production—a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(2), 234-248.
- Yan, J., Guo, X., Duan, S., Jia, P., Wang, L., Peng, C., Zhang, S. (2015). Electronic nose feature extraction methods: A review. *Sensors*, 15(11), 27804-27831.
- Zheng, M., Zhang, Y., Gu, J., Bai, Z., Zhu, R. (2021). Classification and quantification of minced mutton adulteration with pork using thermal imaging and convolutional neural network. *Food Control*, 126, 108044. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108044>.
- Zatsu, V., Shine, A. E., Tharakan, J. M., Peter, D., Ranganathan, T. V., Alotaibi, S. S., ... Nayik, G. A. (2024). Revolutionizing the food industry: The transformative power of artificial intelligence-a review. *Food Chemistry: X*, 101867.
- Zhou, Q., Zhang, H., Wang, S. (2022). Artificial intelligence, big data, and blockchain in food safety. *International Journal of Food Engineering*, 18(1), 1-14.
- <https://www.ibm.com/think/topics/random-forest>

Bölüm 11

AKILLI TRAFİK YÖNETİM SİSTEMLERİ VE ÜLKEMİZDE AKILLI TRAFİK SİSTEM UYGULAMALARININ DURUMU

M. Akif KUNT¹, Haluk GÜNEŞ²

1 Associate Prof. Dr., Kutahya Dumlupınar University, Tavşanlı Vocational School, Motorized Vehicle and Transporting Technologies Department, ORCID: 0000-0001-5710-7253, mehmetakif.kunt@dpu.edu.tr

2 Associate Prof. Dr., Kutahya Dumlupınar University, Tavşanlı Vocational School, Motorized Vehicle and Transporting Technologies Department, ORCID: 0000-0002-0915-0924, haluk.gunes@dpu.edu.tr

1. GİRİŞ

Günümüzde hızla artan şehirleşme faaliyetleri ve artan motorlu taşıt sayısı Türkiye’de trafik yoğunluğunu ciddi bir sorun haline getirmiştir. Türkiye’de özellikle büyükşehirlerde meydana gelen nüfus artışı, plansız şehirleşme ve ulaşım altyapısındaki yetersizlikler trafik sıkışıklığının temel nedenlerini oluşturmaktadır. Özellikle İstanbul, Ankara, İzmir gibi metropol büyükşehirlerde sabah ve akşam saatlerinde yaşanan yoğunluklar bireylerin günlük hayatını olumsuz etkilemekte birlikte ekonomik ve çevresel maliyetler meydana getirmektedir. Trafik sıkışıklığı uzun seyahat süreleri, hava kirliliği, yakıt tüketimi artışı ve psikolojik stres gibi pek çok soruna neden olmaktadır. Yoğun trafiğin neden olduğu fazla yakıt tüketimi ve beraberinde meydana gelen zaman kayıplarının ülke ekonomisine de büyük zararları olmaktadır. Düzensiz trafik akışı ve sürücülerin maruz kaldığı stres, trafik kazalarının artmasına neden olurken yol güvenliğini de tehdit etmektedir. Türkiye’de özellikle büyükşehirlerde büyük sorunlar oluşturan trafik yoğunluğunu azaltmaya yönelik çeşitli önlemler alınmasına rağmen, kalıcı çözümler için çok daha kapsamlı ve akıllı ulaşım sistemlerine geçiş gerekmektedir. İfade edilen sorunları çözmek amacıyla akıllı trafik yönetim sistemleri, toplu taşıma kullanımının teşvik edilmesi ve altyapı yatırımlarının artırılması gibi yenilikçi yaklaşımlar, trafik problemlerinin çözümüne katkı sağlayabilir. Akıllı sürdürülebilir şehir uygulamaları özellikle yoğun nüfuslu kent bölgeleri ve bu bölgelerin enerji, sağlık, ulaşım alanlarında meydana gelen gerçek sorunlara bir dizi umut veren çözümler sunmaktadır (Lombardi (2012)). Bu bakımdan yapay zeka destekli trafik yönetimi, akıllı sinyalizasyon sistemleri ve otonom ulaşım çözümleri, Türkiye’de trafik sıkışıklığını azaltmak adına büyük bir potansiyele sahiptir. İfade edilen çözümler arasında yer alan şehirlerde günden güne artan trafik sorunlarını çözmek için çok önemli bir konuma gelmiştir. Trafik ışıklarının yapay zeka ile modellenmesinin temel gereklilikleri şunlardır:

1.1 Trafik Yoğunluğunun Azaltılması

Şehir içi ve şehirlerarası karayollarında trafik ışıkları sabit zaman döngülerine sahiptir ve trafik yoğunluğundaki değişimlerine uyum sağlayamamaktadır. Yapay zeka destekli sistemler yardımıyla trafik akışının analiz edilerek ışık sürelerinin dinamik olarak düzenlenmesi ile gereksiz taşıt beklemleri önlenabilmektedir. Trafik sıkışıklığının artması, örneğin; taşımacılık sektöründeki şirketlerde ürünlerin taşınması için daha fazla zaman ve ücret kaybına neden olmaktadır. Bundan dolayı insanlar yollarda fazla vakit kaybederek, araçlar gereğinden fazla yakıt tüketerek ve çevreyi kirleterek ciddi oranda yaşam kalitesini azaltmaktadır [Chou, CH. ve Teng, JC.].

1. Yakıt Tasarrufu ve Emisyonların Azaltılması: Trafik sıkışıklığı nedeniyle araçların dur-kalk sıklığının artması araç yakıt tüketimini ve atmosfere atılan karbon emisyonlarını artırmaktadır. Yapay zeka teknolojileri ile optimize edilen trafik ışıkları sayesinde araçlar daha akıcı bir şekilde ilerleyerek yakıt tüketimini azaltabilmektedir.

2. Seyahat Sürelerinin Kısaltılması: Dinamik trafik yönetim sistemleri, sürücülerin gereksiz yere ışıklarda beklemesini engelleyerek seyahat sürelerini optimize ederek zaman tasarrufu sağlamaktadır.

3. Acil Durum Araçlarına Öncelik Verilmesi: Ambulans, itfaiye ve polis araçları gibi geçiş üstünlüğü olan acil durum araçlarının daha hızlı geçiş yapabilmesi için yapay zeka destekli sistemler, trafik ışıklarını otomatik olarak yönlendirebilir.

4. Otonom Araçlarla Uyum Sağlanması: Yapay zeka destekli trafik sistemlerinin otonom araçlara entegre edilmesi trafik güvenliği bakımından daha güvenli ve verimli bir ulaşım ağı oluşturabilir.

5. Kazaların Azaltılması: Trafik kameralarından ve sensörlerden gelen verileri analiz edebilen yapay zeka sistemleri, kaza riski yüksek bölgeleri tespit ederek bu bölgelerde önleyici önlemler alınarak trafik güvenliği artırabilir.

İfade edilen nedenlerle, yapay zeka teknolojisi ile trafik ışıklarının sinyalizasyon sistemlerinin modellenmesi, şehirlerin ulaşım sistemlerinin daha verimli, çevre dostu ve güvenli hale getirmek için giderek daha önemli bir ihtiyaç haline gelmiştir. Bu çalışmada akıllı trafik yönetim teknolojilerinin trafik ışıklandırma sistemlerinde kullanımının taşıt yakıt tasarrufu ve emisyonlarına etkileri ve örnek şehir uygulamaları incelenmiştir.

2.TAŞIT YAKIT TASARRUFU VE EMİSYON AZALIMI

Trafik sıkışıklığı belirli bir yol ağında yoğun araç kullanımı, altyapı yetersizliği, trafik kazası, yol çalışmaları, zaman odaklı yoğunluk, toplu taşıma yetersizliği ve iklimsel yağışlar gibi sebeplerle trafik akışının yavaşlaması, duraklamalar olması ve seyahat süresinin uzaması durumudur. Bu durum özellikle büyük şehirlerde karşılaşılan en büyük ulaşım sorunlarından birisidir. Araçların gereksiz yere dur-kalk yapması araç motorlarının verimsiz çalışma aralığında çalışmasına neden olarak hem yakıt tüketimini artırmakta hem de hava kirliliğine yol açmaktadır. Yapay zeka destekli trafik ışıklarının modellenmesi ve akıllı trafik yönetim sistemleri bu sorunların çözümünü en aza indirmek için önemli fırsatlar sunmaktadır.

2.1 Yakıt Tüketiminin Azaltılması

Taşıt yakıt tüketimi, bir aracın hareketi sırasında motorun harcadığı enerji yoğunlukla çevresel koşullara bağlıdır. Trafik sıkışıklığı durumlarında araçların sık sık durup tekrar hareket etmek zorunda kalması, aracın daha fazla yakıt tüketmesine neden olur. Yapay zeka destekli trafik ışıkları, trafik akışını optimize ederek dur-kalk sıklığını azaltma potansiyeline sahiptir.

- **Sürekli ve Akıcı Trafik Akışı:** Akıllı trafik sistemleri, trafik ışıklarını gerçek zamanlı taşıt verileri yardımıyla optimize ederek araçların daha az durmasını ve sabit hızda ilerlemesini sağlar. Örneğin, mesai başlangıcı yada mesai çıkışı gibi yoğun saatlerde ana arterlerdeki yeşil ışık süresinin uzatılması veya düşük yoğunlukta gereksiz kırmızı ışık bekleme sürelerinin azaltılması, araçların daha az yakıt tüketmesine yardımcı olur.

- **Gereksiz Rölantinin Önlenmesi:** Trafikte uzun süre bekleyen araçlar, relantide gereksiz yakıt tüketir. Yapay zeka sistemleri sayesinde araçların yerinde bekleme süreleri, relanti süreleri azaltılarak yakıt tasarrufu ve taşıt kaynaklı emisyon salınımı azaltılabilir.

- **Yakıt Verimliliğinin Artırılması:** Trafik sıkışıklığının önlenmesi, sürücülerin daha ekonomik sürüş teknikleri kullanmasına imkan tanır. Trafik ortalama seyir hızının artması, araç yakın takip mesafelelerinin artması, ani frenleme ve hızlanmalar azaldığında, yakıt tüketimi daha verimli hale gelmektedir.

2.2 Emisyonların Azaltılması

Fosil yakıt kullanan araçlar kullanılan yakıtın C taşıması, eksik yanma reaksiyonları sebebiyle karbon dioksit (CO₂), azot oksitler (NO_x) ve partikül maddeler gibi zararlı emisyonlar üretmektedir. Bu gazlar, küresel ısınmaya ve hava kirliliğine katkıda bulunarak çevreye zarar vermektedir. Yapay zeka ile yönetilen trafik ışıkları ve akıllı trafik sistemleri, emisyonların azaltılmasında etkili olabilir.

- **Daha Az Karbon Salınımı:** Trafikte gereksiz yere bekleyen araçlar, her saniye atmosfere zararlı gazlar salmaktadır. Araçların sıkışık trafikte sık sık dur kalk yapması içten yanmalı motorları en verimsiz çalıştırdıkları motor hızları ve yüklerinde çalışmak durumunda bırakmaktadır. Akıcı trafik akışı sayesinde dur-kalk yapan araç sayısı azaldığında, karbon emisyonları da düşmektedir.

- **Hava Kalitesinin İyileştirilmesi:** Yapay zeka destekli sistemlerin özellikle büyük şehirlerde trafik ışıklarının sürelerini belirlemesi

hava kirliliğini azaltarak insan sağlığına olumlu katkı sağlayabilir. Trafik sıkışıklığının azaltılmasıyla egzoz gazlarının yoğun olduğu bölgelerde hava kalitesi iyileşir.

- **Elektrikli Araçlar İçin Daha Uygun Koşullar:** Yapay zeka sistemleri aynı zamanda elektrikli araçların enerji verimliliğini artırmak için de kullanılabilir. Akıllı trafik ışıklarının trafikteki bekleme ve durma sürelerini düzenlemesi elektrikli araçların batarya tüketimini optimize edilmesinin, sürdürülebilir ulaşımın önünü gelişmesine katkı sağlayabilir.

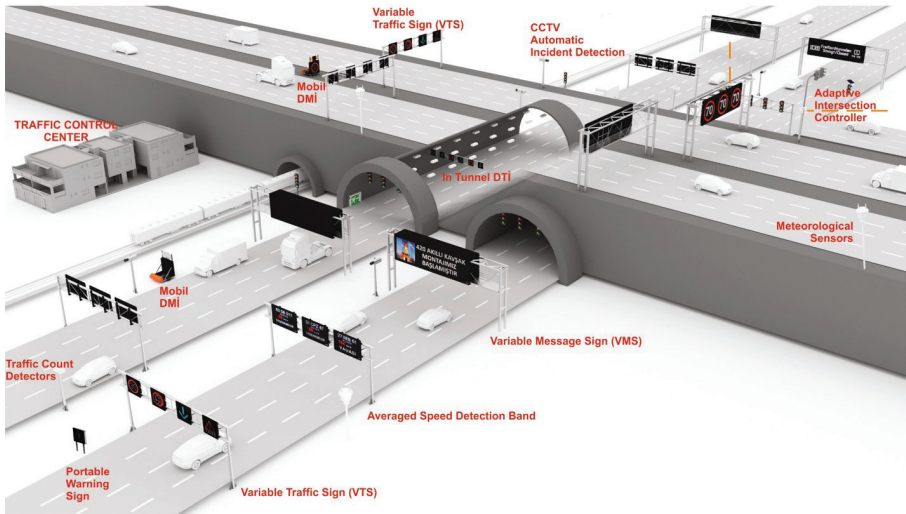
3. GERÇEK HAYATTAN ÖRNEKLER VE KAZANIMLAR

Dünya genelinde yapılan araştırmalar, akıllı trafik yönetim sistemlerinin yakıt tüketimi ve emisyon salınımı konusunda büyük faydalar sağladığını göstermektedir. Dünya genelinde akıllı trafik sistemi konusunda literatüre geçmiş be başarıya ulaşmış bazı akıllı trafik sistemi uygulamaları aşağıda verilmiştir.

3.1 Los Angeles Akıllı Trafik Sistemi

Los Angeles şehrinde ulaştırma teknolojileri LADOT (LA Ulaşım Departmanı) öncülüğünde geliştirilen ATSAC (Advanced Transportation System and Coordination) sistemiyle kontrol edilmektedir. Bu merkezî sistem, şehir genelindeki sinyalize kavşaklarda çevrim içi döngü dedektörleri vb kaynaklardan alınan gerçek zamanlı trafik verilerini toplayarak sinyal zamanlamasını dinamik olarak ayarlamaktadır (LADOT (2014)). Akıllı trafik sisteminde görevli mühendisler, kontrol merkezindeki büyük ekranlar sayesinde trafik yoğunluk haritalarını izlemektedir. Trafik akışında anormallik tespit edilmesi durumunda (kaza, acil durum vb.) otomatik uyarılar almakta ve kavşaklardaki kameralarla sahayı gözlemleyerek müdahale etmektedirler. ATSAC merkezi şehir içinde yaklaşık 4.600 adet sinyalize kavşağı kontrol etmektedir. Sinyalize kavşaklarda 23.800'e yakın trafik sensörü (çoğunluğu indüktif döngü dedektörleri) veri almaktadır. Sistemde araç yoğunlukları yol yüzeylerine monte edilmiş indüktif döngü dedektörleriyle ölçülmektedir. Yolların ana arterlerinde ve kritik kavşak noktalarında ise kamera sistemleriyle görüntüler alınmaktadır. Trafik akış sistemine müdahale gerektiğinde kavşaklarda bulunan mikroışlemcili sinyal kontrol cihazları yardımıyla ATSAC merkezinden gelen sinyallerin faz ve çevrim süreleri değiştirilerek trafik akışı optimize edilmektedir. Kontrol merkezinde hızlı veri alışverişi için fiber optik kablo sistemleri, kablosuz/DSRC iletişim altyapısı kurulması planlanmaktadır (Booz (1999)). Yakın zamanda yaygınlaşmaya başlayan otonom bağlantılı araçların trafik ışıklandırmaları ile ilgili bilgi sahibi olması için V2I (Araçtan altyapı) sistemi sisteme ilave edilecektir. İtfaiye ve ambulans gibi

özel statülü araçların siren açması durumunda sistem bu araçlara öncelik vermektedir. Sistemin trafik kazalarını azaltma konusundaki yetkinliği ise sınırlı kalmıştır. 2025 yılında teorik olarak sistem sayesinde trafik kazalarının sıfırlanması hedeflenirken pratik uygulamalarda kaza sayısı azalmamıştır. Genel beklentinin aksine 2023 yılı verilerine göre şehirde kaza sayısı %8 artmıştır. Bu sonuçlara göre akıllı sinyal sistemlerinin tek başına kaza oranlarını azaltmadığını göstermektedir. Akıllı trafik kontrol sistemleri trafik altyapısını geliştirmesine karşın kazaları azaltma konusunda **insan davranışlarına**, toplum **trafik kültürüne**, **denetimine** ve **yaya güvenliğine** de bağlıdır. Bu nedenle akıllı sinyalizasyon sistemleri sadece bir araç olmakla birlikte tek başına yeterli olmamaktadır.



Şekil. Akıllı trafik ulaşım sistemleri (Ortana (2016))

3.2 Kopenhag Akıllı Trafik Sistemi

Akıllı trafik yönetim sistemlerinden biriside Kopenhag akıllı trafik sistemidir. Kopenhag, şehri sürdürülebilir ulaşım ve akıllı şehircilik alanında dünya çapında öncü şehirlerden birisidir. Kopenhag şehri karbon salınımında nötr olma hedefi doğrultusunda akıllı trafik sistemleri, bisiklet altyapısı ve entegre ulaşım çözümleriyle dikkat çekmektedir. Kopenhag şehri şehrin genelinde kurduğu Wi-Fi erişim noktaları ve sensörler yardımıyla yolu kullananların hareketlerini izleyebilmektedir. Mobil cihazlardan gelen sinyallerinde kullanıldığı sistemde trafik akışı, yaya hareketlilikleri ve CO₂ emisyonları analiz edilebilmektedir (Dormehl (2016)). Şehirde bulunan akıllı sokak lambaları yardımıyla bisik-

letlerin yoğun olduğu kavşaklardaki ışık yoğunluğunu otomatik olarak artırmaktadır. Şehrin 380 kilometreden fazla özel bisiklet yoluna sahip olması önemli bir özelliğidir. Şehirde trafik ışıkları bisikletlilerin ortalama hızlarına göre belirlenmektedir. Kavşak noktalarında bisikletlilere taşıtlardan önce geçiş hakkı verilmektedir. Kopenhag şehri 2025 yılında karbon nötr şehri olmayı hedeflemektedir. Bu hedef doğrultusunda şehirdeki toplu taşıma, yaya ve bisiklet ulaşımı, karbon emisyonları konuları yeniden yapılandırılmıştır. Şehirdeki tüm toplu taşıma araçlarının elektrikli hale getirilmesi toplu taşıma konusundaki hedeftir. Şehirde yapılan yolculukların %75'inin yaya, bisiklet veya çevreci toplu taşıma araçlarıyla yapılması yaya ve bisiklet ulaşımı konusundaki hedeftir (Maynard (2024)).

Özellik	Kopenhag	Los Angeles
Trafik Yaklaşımı	Yaya ve bisiklet odaklı	Araç odaklı
Akıllı Sistemler	Sensör tabanlı, bisiklet öncelikli	Sinyal koordinasyonu, araç trafiği odaklı
Emisyon Azaltımı	%75 azalma (2005-2024)	Sınırlı ilerleme
Güvenlik Politikası	Entegre altyapı ve kullanıcı davranışı odaklı	Teknoloji odaklı, davranış değişikliği sınırlı
Ulaşım Hedefi	%75 yaya/bisiklet/toplu taşıma	Araç trafiğini optimize etme



Şekil 2. Kopenhag akıllı şehir bisiklet yolları [Çevre ve Şehircilik Bakanlığı]

3.3 Türkiye’de Akıllı Ulaşım Sistemlerinin Durumu

Türkiye’de akıllı ulaşım sistemleriyle ilgili politikalar Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı’nın öncülüğünde belirlenmektedir. İlk olarak 2014 yılında hazırlanan akıllı ulaşım sistemleri strateji belgesi, bu alandaki çalışmaların temelini oluşturmuştur. Oluşturulan 2020-2023 Ulusal Akıllı Şehirler Stratejisi ve Eylem Planı ile akıllı ulaşım sistemlerinin şehircilik politikalarına entegrasyonunu planlamaktadır. Bu plan sayesinde akıllı ulaşım sistemlerinin yaygınlaştırılması, standartlarının belirlenmesi ve konuyla ilgili yerli teknolojilerin geliştirilmesi amaçlanmaktadır (Önder (2020)).

3.4 Trafik Yönetim Sistemleri

Türkiye’de özellikle büyükşehirlerde, genel trafik akışını izleyen ve yöneten akıllı trafik sinyalizasyon sistemleri, dinamik yönlendirme tabelaları ve trafik kontrol merkezleri oluşturulmuştur. Bu merkezlerde gerçek zamanlı verilerin toplanarak trafik yoğunluklarının azaltılması amaçlanmaktadır.



Şekil 3. Trafik yönetim merkezi

Toplu Taşıma Bilgilendirme Sistemleri

Büyükşehirlerde kullanılan akıllı durak sistemleri toplu taşıma araçlarını kullanan yolculara araçların tahmini varış süreleri hakkında bilgiler vermektedir. Metro, tranvay gibi taşıma araçlarında kullanılan elektronik biletleme sistemleri, sefer saatlerinin dijital ekranlarda gösterilmesi ve mobil uygulamalar üzerinden sefer bilgilerine erişim gibi uygulamalar,

akıllı ulaştırma sistemlerinin toplu taşıma alanındaki popüler örneklerindendir. Bu sistemler sayesinde yolcuların seyahatleri daha planlı ve verimli hale gelmektedir.

Araç Takip ve Yönetim Sistemleri

Belediyeler ve özel sektör kuruluşları, araç filo yönetimi ve takipleri için GPS tabanlı konum izleme sistemlerinin yaygın olarak kullanmaktadır. Bu takip sistemleri firma veya kurum araçlarının güncel konumlarını izleyerek işlevsel verimliliği artırmakta ve yakıt tüketimini optimize etmektedir.

Yaya ve Bisikletli Ulaşım Destek Sistemleri

Ülkemizde bazı şehirlerde, yaya geçitlerine akıllı sensörler ve bisiklet yollarında trafik ışıklarına entegre sistemler kurulmuştur. Bu uygulamalar sayesinde yaya ve bisikletli güvenliği artırılmıştır.

4. SONUÇ

Türkiye’de özellikle büyükşehir belediyeleri başta olmak üzere birçok yerel yönetim, akıllı ulaşım sistemleri uygulamalarını kullanarak trafik yoğunluğunu azaltma, yol güvenliğini artırma ve toplu taşıma verimliliğini yükseltme amacıyla çeşitli trafik projelerini uygulamaya geçirmiştir. Özellikle İstanbul, Ankara, Konya, Gaziantep, Erzurum ve Eskişehir gibi büyük şehirlerde akıllı sinyalizasyon, araç takip sistemleri, dinamik yönlendirme tabelaları ve entegre mobil uygulamalar aracılığıyla kent içi ulaşım daha şeffaf, öngörülebilir ve kullanıcı odaklı hâle gelmiştir. Ancak bu gelişmelere rağmen bu sistemin istenilen yapıya kavuşması için çözülmesi gereken bazı yapısal ve teknik sorunlar bulunmaktadır. Özellikle uygulama yapan şehirler arasında oluşan farklı standartlar, verilerin merkezi bir sistemde tam olarak toplanamaması, akıllı ulaşım sistemleriyle ilgili yasal düzenlemelerin hâlâ sınırlı olması ve teknolojiye erişimdeki bölgesel potansiyel farklılıkları akıllı ulaşım sistemin ölçeklenebilirliğini ve sürdürülebilirliğini olumsuz etkileyebilmektedir.

Akıllı Ulaşım Sistemleri şehirlerin dijital dönüşüm sürecinde temel unsurlarından biri hâline gelerek küresel boyutta hızla yayılmıştır. Kentleşme ve nüfus yoğunluğunun artması, çevresel kaygılar ve enerji verimliliği ile ilgili yüksek beklentiler akıllı ulaşım sistemi uygulamalarının tercihten ziyade zorunluluk hâline gelmesini sağlamıştır. ABD, Almanya, Japonya, Güney Kore ve İsveç gibi gelişmiş ülkelerde akıllı ulaşım sistemleri otonom araçlar, yapay zeka destekli trafik yönetimi, araç-arac (V2V) ve araç-altyapı (V2I) iletişimi gibi ileri düzey teknolojilerle de entegre edilmiştir. Akıllı ulaşım sistemleri sadece trafik sorunlarını çöz-

menin yanı sıra taşıt emisyonlarının azaltılması, acil durum müdahaleleri, verimli toplu taşıma ve lojistik zincirlerinin optimizasyonu gibi çok katmanlı faydalar sunmaktadır. Gelişmekte olan ülkelerde akıllı ulaşım sistemi yatırımları, çoğunlukla trafik yoğunluğunu azaltmak ve toplu taşıma sistemlerini modernleştirmek amacıyla planlanmaktadır. Meydana gelen finansman eksiklikleri, teknolojik uyumluluk problemleri, kurumların kapasite eksiklikleri ve yasal çerçevenin sınırlı olması bu ülkelerde projelerinin sürdürülebilirliğini zorlaştırmaktadır. Bu sorunlara rağmen Hindistan, Brezilya, Güney Afrika ve Endonezya gibi ülkeler, bölgesel ihtiyaçlara göre uygun akıllı ulaşım sistemleri çözümleri geliştirmiş ve önemli neticeler almıştır.

KAYNAKLAR

- Lombardi P. , Giordano S. , Farouh , H. , Yousef, A. ve , W. (2012). Modeling the smart city performance.. *Innovation: The European Journal Of Social Science Research*, 25(2), 137-149.
- Chou, , Teng, C. V. ve Jc., (2002). A fuzzy logic controller for traffic junction signals. *Information Science*, 143, 73-97.
- Ladot, (2024, March). Atsac 21st century automated signal control. Ladot. <https://ladot.lacity.gov/projects/transportation-technology/atsac#:~:text=LADOT%20runs%20one%20of%20the,also%20supports%20LA%20Metro%20to>.
- Transportation, C. O. L. A. D. O. (2019, March). U.S. department of transportation automated driving system demonstration grants “Los Angeles autonomous electric transit bus”. U.S. Department of Transportation Automated Driving System Demonstration Grants. chrome-extension://efaidnbmnnpbpcjpcglefindmkaj/<https://www.transportation.gov/sites/dot.gov/files/docs/policy-initiatives/automated-vehicles/351241/53-los-angeles.pdf>
- Hamilton, B. &. (1999). Los Angeles spread spectrum radio traffic signal interconnect practical lessons learned evaluation report. Federal Highway Administration California Department of Transportation City of Los Angeles.
- Ortana, (2025, Nisan). Akıllı trafik sistemleri. Ortana. <http://www.ortana.com/new/index.php/tr/cozumlerimiz/its>
- Dormehl L. (2016, November). The road to tomorrow: streets need to be as smart as the cars driving on them. Wired. <https://www.wired.com/story/smart-cars-need-smart-streets/>
- Maynard M. (2024, September). How cities are clamping down on traffic to help fight emissions. Time. <https://time.com/7020410/traffic-emissions/>
- T. C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2025, Nisan). Danimarka | Kopenhag bisiklet yolları projesi. Akıllı Şehirler Portali. <https://www.akillisehirler.gov.tr/2023/08/14/danimarka-kopenhag-bisiklet-yollari-projesi/>
- Önder H G ve Akdemir F. (2020). Digital dimension of urban transportation: transportation 4.0.. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulama Dergisi*, 3(2), 202-215.

Bölüm 12

BULANIK MOORA YÖNTEMİ: ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME SÜREÇLERİNDE BULANIKLIKLA BAŞA ÇIKMAK

Müslüm ÖZTÜRK¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, Kilis, mozturk@kilis.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0003-1941-3115>

1. GİRİŞ

Günümüzde kararlık sistemlerin yönetimi ve çözümüne ilişkin karar verme süreçleri, çoğunlukla birbirleriyle çelişen çok sayıda kriteri dikkate almak zorundadır. Bu bağlamda, Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemleri, karar vericilere rasyonel, sistematik ve karşılaştırılabilir bir yapı sunarak daha sağlıklı kararların alınmasını mümkün kılmaktadır (Triantaphyllou, 2000). Ancak bu yöntemler, çoğunlukla karar verici yargılarının kesin ve sayısal biçimde ifade edildiğini varsayar. Oysa gerçek yaşamda bilgi çoğunlukla belirsiz, eksik veya dilsel ifadelerle dayalıdır.

Bu noktada bulanık mantık, Zadeh'in (1965) öncülüğünde geliştirilen yapıyla klasik mantık sistemlerinin ötesine geçerek, belirsizlik altında karar verme süreçlerine esneklik kazandırmıştır. Bulanık mantığın sağladığı bu avantaj, çok ÇKKV ile entegre edildiğinde, belirsizliğin etkili biçimde modellenmesine olanak tanır. Böylece öznel değerlendirmeler, deneyim temelli kararlar veya dilsel veriler sayısallaştırılabilir hale gelir (Zimmermann, 2001).

Bu tür belirsiz ortamlarda kullanılan çok güçlü ÇKKV yöntemlerinden biri de MOORA (Multi-Objective Optimization on the basis of Ratio Analysis) yöntemidir. Brans ve Zavadskas (2006) tarafından önerilen MOORA yöntemi, ÇKKV problemlerinde normalizasyon ve oran analizine dayalı yapıyla hem hesaplama kolaylığı hem de yorumlanabilirlik açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Klasik MOORA yönteminde karar verici görüşleri kesin sayılarla ifade edilirken, bu durum belirsizlik içeren karar ortamlarında yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, klasik yöntemin bulanık mantıkla geliştirilmiş versiyonu olan Bulanık MOORA, karar vericilerin belirsizlik ve öznel değerlendirmelerinin daha etkin biçimde modele dahil edilmesini sağlar (Büyükoçkan and Güteryüz, 2016; Mardani ve ark., 2015).

Bulanık MOORA, karar matrisinde yer alan verilerin üçgen bulanık sayılar (TFN) ya da diğer bulanık sayı temsilleriyle ifade edilmesini temel alır. Böylece niteliksel ve niceliksel verilerin birlikte değerlendirilmesi mümkün hale getirir. Bu yöntem, özellikle enerji yönetimi (Govindan ve ark., 2014), sürdürülebilirlik tedarik zinciri (Büyükoçkan ve ark., 2019), üretim sistemleri (Karaböçek ve ark., 2015) ve sağlık sektörü gibi uygulamalarda başarıyla kullanılmaktadır. Hem yöntemsel esnekliği hem de farklı problem türlerine

uygulanabilirliği sayesinde, Bulanık MOORA, karar analizi literatüründe giderek artan bir şekilde yer bulmaktadır.

Bu kitap bölümünde, önce klasik MOORA yönteminin temel ilkeleri ve matematiksel yapısı ele alınacaktır. Daha sonra bulanık mantığa ÇKKV sürecine entegrasyonu detaylandırılacak ve Bulanık MOORA yönteminin adım adım uygulama süreci açıklanacaktır. Daha sonra Bulanık MOORA yöntemi, bir örnek uygulama ile desteklenerek, yöntemin güçlü ve zayıf yönleri tartışılacak ve diğer yöntemlerle karşılaştırmalı bir değerlendirmesi yapılacaktır. Böylece, Bulanık MOORA'nın hem kuramsal temeli hem de pratikte uygulanabilirliği bütünsel bir biçimde sunulmuş olacaktır.

2. ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME (ÇKKV) VE MOORA'NIN TEMELLERİ

Karmaşık karar problemleri, çoğu zaman birden fazla kriterin aynı anda dikkate alınmasını gerektirir. Bu durumlarda, karar vericinin yalnızca tek bir amaca değil, birçok ölçüte göre en iyi seçeneği belirlemesi beklenir. Bu tür çok boyutlu karar problemlerini çözmek için geliştirilen yöntemlerin genel adı ÇKKV yöntemleridir (Keeney and Raiffa, 1993). ÇKKV yaklaşımları, alternatiflerin belirli sayıda kriter altında değerlendirilmesini, karşılaştırılmasını ve en uygun sonucun elde edilmesini amaçlayan sistematik yöntemlerdir.

ÇKKV yöntemleri genel olarak iki ana gruba ayrılır: çok amaçlı optimizasyon ve çok ölçütlü değerlendirme yaklaşımlarıdır. İlk grupta, her bir kriter matematiksel olarak optimize edilmeye çalışılırken; ikinci grupta, kriterler arasında ağırlıklandırma yapılarak alternatiflerin sıralanması ya da en iyisinin seçilmesi hedeflenir (Hwang and Yoon, 1981). Bu kapsamda, AHP, TOPSIS, VIKOR, ELECTRE, PROMETHEE ve MOORA gibi yöntemler farklı yapı ve varsayımlar altında geliştirilmiş, çeşitli alanlarda uygulanmıştır (Triantaphyllou, 2000; Mandalini ve ark., 2015).

Bu yöntemler arasında MOORA yöntemi, hem basitliği hem de güçlü sıralama performansı ile öne çıkan bir modeldir. Bramers ve Zavadskas (2006) tarafından önerilen bu yöntem, çok sayıda kriter altında değerlendirilen alternatiflerin normalize edilmesi ve ardından fayda/maliyet ayrımı yapılmak suretiyle toplam skorların hesaplanması temeline dayanır. MOORA yöntemi, özellikle aşağıdaki yönleriyle dikkat çeker:

- Hızlı ve hesaplama işlemlerinin kolay olması,
- Normalize edilmiş değerlerle çalıştığı için kıyaslanmalarına daha açıl olması,
- Hem fayda hem de maliyet kriterlerini birlikte değerlendirilmesi.
- Ağırlık versiyonunun da uygulanabilir olması (W-MOORA).

2.1. Klasik MOORA Yönteminin Matematiksel Temelleri

Klasik MOORA yönteminin temel adımları şu şekilde özetlenebilir:

1. Karar Matrisi (X): $X = [x_{ij}]$ şeklinde ifade edilen karar matrisinde, i alternatifleri ($i = 1, \dots, m$) ve j kriterleri ($j = 1, \dots, n$) temsil eder.

2. Normalize Edilmiş Karar Matrisi (R): Her bir değer aşağıdaki şekilde normalize edilir:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (1)$$

3. Fayda ve Maliyet Kriterlerinin Ayrıştırma: Fayda kriterleri için doğrudan r_{ij} , maliyet kriterleri için negatif işaretli değerlendirme yapılır.

4. Toplam Skorların Hesaplanması: Klasik MOORA'da toplam skorların hesaplanması için aşağıdaki formül kullanılır.

$$y_i = \sum_{j \in J_B} r_{ij} - \sum_{j \in J_C} r_{ij} \quad (2)$$

Burada J_B fayda kriterleri kümesi, J_C maliyet kriterleri kümesidir.

5. Alternatiflerin Sıralanması: Elde edilen y_i değerleri sıralanarak en uygun alternatif seçilir.

Bu yapı, kullanıcıların sezgisel olarak kolayca anlayabileceği ve yorumlayabileceği bir sistem sunar. Ayrıca, MOORA yöntemi daha sonra ağırlıklandırma yapılmış versiyonu olan W-MOORA ile de genişletilmiştir (Brauers and Zavadskas, 2010). Bu versiyonda her kriterin önem derecesi (ağırlığı) dikkate alınır.

2.2. Klasik MOORA Yönteminin Uygulama Alanları

Klasik MOORA yöntemi, aşağıdaki alanlarda yaygın biçimde kullanılmaktadır:

- Mühendislik tasarım problemleri (Bezars ve ark., 2008)
- Enerji ve çevre yönetimi (Mardani ve ark., 2016)
- Tedarikçi seçimi ve lojistik kararlar (Büyükoğuz and Güler, 2016)
- İnsan kaynakları ve personel seçimi (Karahasevici ve ark., 2015)

Bu çeşitlilik, yöntemin esnekliğini ve farklı sektörlerdeki uygulanabilirliğini göstermektedir. Ancak MOORA'nın klasik hali, karar verici görüşlerinin belirsizlik içerdiği durumlarda yetersiz kalabilmekte; bu nedenle, sonraki bölümde ele alınacağı üzere, bulanık mantık ile entegrasyon ihtiyacı doğmaktadır.

3. KLASİK MOORA YÖNTEMİNİN MATEMATİKSEL YAPISI

MOORA yöntemi, çok sayıda kriter altında birden fazla alternatifin değerlendirilmesini sağlayan oran analizine dayalı bir karar verme tekniğidir. Yöntemin temel felsefesi, kriterler arasında karşılaştırılabilirlik sağlamak amacıyla tüm kriter değerlerini normalize etmek ve fayda ile maliyet kriterlerini ayrı ayrı değerlendirilerek nihai bir sıralama elde etmektir (Bezars and Zavadskas, 2006).

Klasik MOORA yöntemi aşağıdaki temel adımlardan oluşur:

3.1. Karar Matrisinin Oluşturulması

Karar matrisi, m adet alternatifin n adet kritere göre değerlendirilmesiyle elde edilen ve aşağıdaki şekilde ifade edilen matristir:

$$X = [x_{ij}] \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

Burada x_{ij} , i -inci alternatifin j -inci kriter altındaki performans değerini ifade eder. Bu değerler sayısal, ölçülebilir ya da değerlendirilmeye dayalı olabilir.

3.2. Normalize Edilmiş Karar Matrisi

Kriterlerin ölçüm birimleri farklı olabileceğinden, öncelikle her bir kriter değeri normalize edilerek birimden bağımsız hale getirilir. Klasik MOORA yönteminde vektör normuna dayalı normalize işlemi uygulanır:

$$r_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m n_{kj}^2}} \quad (4)$$

Bu işlem sonucunda elde edilen r_{ij} , normalize edilmiş performans değerini ifade eder. Bu değerler, tüm kriterler için karıştırılabilir hale gelir.

3.3. Fayda ve Maliyet Kriterlerinin Ayrımı

MOORA yönteminde kriterler iki gruba ayrılır:

- Fayda (Benefit) kriterleri: Yüksek olması tercih edilir (örneğin enerji verimliliği).
- Maliyet (Cost) kriterleri: Düşük olması tercih edilir (örneğin yatırım maliyeti).

Fayda kriterleri kümesi J_p , maliyet kriterleri kümesi ise J_c olarak tanımlanır.

3.4. Skorların Hesaplanması (Toplam Performans Değeri)

Her bir alternatif için normalize değerler üzerinden bir "net skor" hesaplanır. Bu skor, fayda kriterlerinin toplamından maliyet kriterlerinin toplamının çıkarılmasıyla elde edilir:

$$y_i = \sum_{j \in J_p} r_{ij} - \sum_{j \in J_c} r_{ij} \quad (5)$$

Burada:

- y_i : i -inci alternatifin genel skoru,
- r_{ij} : normalize edilmiş değer.

Bu işlem her alternatif için gerçekleştirilir.

3.5. Alternatiflerin Sıralanması

Elde edilen y_i skorlarına göre alternatifler büyükten küçüğe sıralanır. En yüksek skora sahip olan alternatif, karar verici açısından en uygun seçenek olarak değerlendirilir.

3.6. Ağırlıklı MOORA (W-MOORA) Yaklaşımı

Karar vericiler, kriterlerin eşit öneme sahip olmadığını düşünüyorsa, her bir kriter için bir ağırlık (w_j) belirlenebilir. Bu durumda normalize matris, kriter ağırlıkları ile çarpılarak ağırlıklı skorlar elde edilir:

$$r_j^{(0)} = \sum_{j \in J_0} w_j * r_j - \sum_{j \in J_1} w_j * r_j \quad (6)$$

Bu versiyum özellikle AHP, Entropi veya FAHP gibi yöntemlerle elde edilen kriter ağırlıklarıyla birlikte sıkça kullanılmaktadır.

3.7. Klasik MOORA Yönteminin Özellikleri

- **Hesaplama Kolaylığı:** MOORA, lineer hesaplamalara dayandığı için Excel gibi basit araçlarla bile kolayca uygulanabilir.
- **Esneklik:** Ağırlıklandırılmay versiyum sayesinde karar vericinin tercihleri sisteme entegre edilebilir.
- **Farklı Uygulama Alanlarına Uygunluk:** Mühendislik, teknik zinciri, enerji, sağlık, ulaşım gibi birçok alanda kullanılabilir.
- **Kriter Sayısındaki Artışa Karşı Dayanıklılık:** Kriter sayısı arttıkça da stabil sonuçlar üretme eğilimindedir.

4. BELİRSİZLİKLE MÜCADELEDE BULANIK MANTIK

Gerçek dünyadaki karar verme süreçleri, çoğu zaman belirsizlik, eksik bilgi, ölçülemeyen kavramlar ve öznel yargılarla şekillenir. Klasik karar verme yöntemleri, bu tür belirsizlikleri dikkate almadan yalnızca kesin sayısal verilerle işlem yapar. Oysa insan düşüncesi doğası gereği bulanıktır, kavramlar tam olarak "doğru" veya "yanlış", "iyi" veya "kötü" gibi kesin sınıflara ayrılmaz. Bu noktada, bulanık mantık (fuzzy logic), klasik mantığın ikili (0 veya 1) değer sistemine alternatif olarak geliştirilmiş bir yaklaşımdır (Zadeh, 1965).

4.1. Bulanık Mantık Temelleri

Bulanık mantık, Lotfi A. Zadeh tarafından 1965 yılında "fuzzy sets" kavramı ile literatüre kazandırılmıştır. Klasik küme teorisinde bir öğe ya bir kümeye aittir (1) ya da değildir (0). Oysa bulanık küme temsinde bir öğe, bir kümeye belirli bir üyelik derecesi ile ait olabilir. Bu üyelik derecesi [0,1] aralığında sürekli değerler alabilir. Örneğin, bir kişinin "uzun" olma derecesi tam olarak 1 ya da 0 değil, 0.6 ya da 0.8 gibi değerlerle ifade edilebilir. Bulanık mantık, karar verme problemlerinde özellikle şu durumlarda avantaj sağlar:

- Dilsel değerlendirmeler ("çok iyi", "orta", "kötü" gibi)
- İnsan yargılarının modellenmesi
- Sayısal olmayan veya ölçülemeyen verilerin işlenmesi (belirsizlik)

- Elstek, belirsiz veya kısmen güvenilir bilgilerin değerlendirmesi

4.2.  yelik Fonksiyonları ve Bulanık Sayılar

Bulanık mantığın uygulamasında en yaygın kullanılan araçlardan biri bulanık sayılardır. Bunlar, özellikle üçgen bulanık sayılar (Triangular Fuzzy Numbers - TFN) ve yamuk bulanık sayılar (Trapezoidal Fuzzy Numbers-TzFN) biçiminde ifade edilir.

4.2.1. Üçgen Bulanık Sayı (TFN)

Bir TFN,   parametre ile tanımlanır:

$$\tilde{A} = (l, m, u)$$

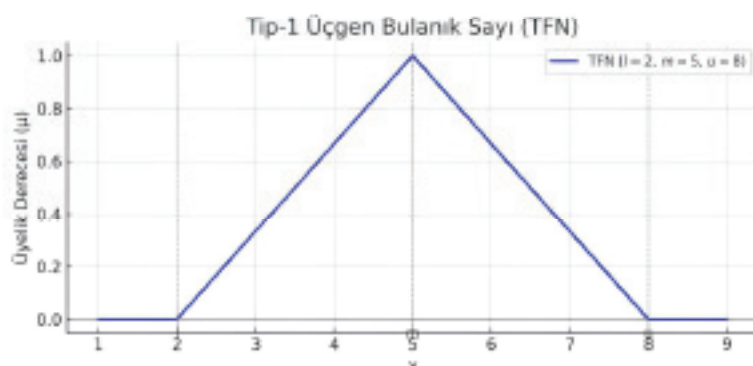
Burada:

- l : alt sınır (minimum değer),
- m : en okan değer (modos),
- u : Üst sınır (maksimum değer).

 yelik fonksiyonu:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0 & x < l \\ \frac{x-l}{m-l} & l \leq x \leq m \\ \frac{u-x}{u-m} & m \leq x \leq u \\ 0 & x > u \end{cases} \quad (7)$$

Bu yapı, katı vericilerin belirsizliğini ifade etmede  lk ka sezgiseldir. Şekil 1’de Tip-1  gen bulanık kümeye ait grafik yer almaktadır.



Şekil 1. Bir  gen tip-1 bulanık grafiği

4.2.2. Yarımk Bulanık Sayı (TrFN)

Yarımk bulanık kümeler, dört parametre ile ifade edilir:

$\tilde{B} = (l, m, n, u)$ şeklinde tanımlanır.

Burada:

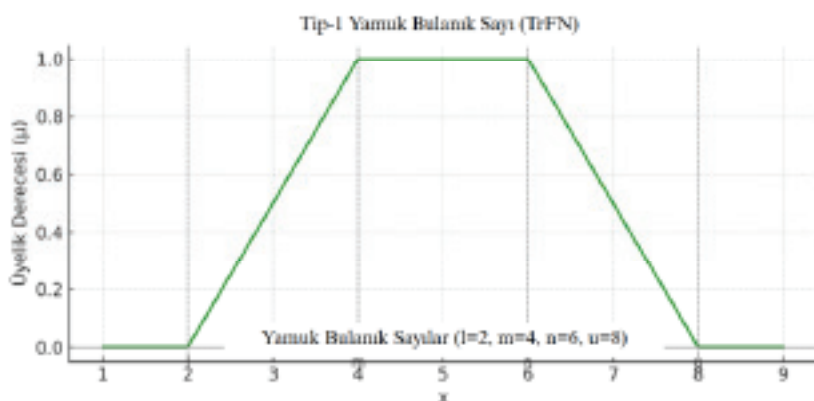
- l : başlangıç noktası – üyelik derecesi 0'dan farklı olmaya başladığı nokta
- m : tam üyeliğin başladığı nokta (üye olma derecesi 1 olur)
- n : tam üyeliğin sona erdiği nokta (hala üye olma derecesi 1'dir)
- u : üyeliğin sona erdiği noktadır (üye olma derecesi tekrar 0'a düşer)

Burada m ile n arasında üyelik derecesi 1 olan bir plato bulunur. Bu tür yapılar, daha esnek bir belirsizlik modellemesi sağlar.

Üyelik fonksiyonu:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq l \\ \frac{x-l}{m-l}, & l < x < m \\ 1, & m \leq x \leq n \\ \frac{n-x}{n-u}, & n < x < u \\ 0, & x \geq u \end{cases} \quad (8)$$

Şekil 2'de Tip-1 yarımk bulanık kümeye ait grafik yer almaktadır.



Şekil 2. Bir yarımk tip-1 bulanık grafiği

Bu fonksiyon, özellikle uzman değerlendirmelerinde ya da belirsizlik içeren sistemlerde, daha esnek ve gerçekçi modelleme imkân sağlar.

4.3. ÇKKV Yöntemlerinde Bulanık Mantık Kullanımı

ÇKKV problemlerinde karar verici görüşleri çoğunlukla dilsel değişkenler şeklinde ifade edilir. Örneğin:

- "Yatırım maliyeti yüksek"
- "Çevresel etki çok düşük"
- "Enerji verimliliği orta düzeyde"

Bu tür ifadeler sayısal olarak modellenemese karar süreçleri sektöre uyarılabilir. Bulanık mantık sayesinde bu dilsel değişkenler uygun bulanık sayılar ile temsil edilerek karar modellerine dâhil edilebilir.

4.4. MOORA Yöntemiyle Entegrasyonun Gerekliliği

Klasik MOORA yöntemi, tüm verilerin net ve sayısal olduğu varsayımıyla çalışır. Ancak bir problem durumunda;

- Değerlendirmeler öznel olabilir.
- Veriler sayısal değil niteliksel olabilir.
- Kriterler uzman görüşüne dayanabilir.

Bu gibi nedenlerle MOORA yönteminin bulanık mantık ile entegrasyonu, yöntemsel esnekliği artırır ve gerçek hayat problemlerine daha yakın çözümler üretir (Mardani ve ark., 2015). Bulanık MOORA'da karar matrisi, klasik sayılar yerine bulanık sayılarla oluşturulur. Böylece insan odaklı ve belirsizlik içeren karar süreçleri daha sağlıklı biçimde modellenir.

5. BULANIK MOORA YÖNTEMİNİN GELİŞİMİ

Klasik MOORA yöntemi, karar verme süreçlerinde sayısal verilerin işlenmesinde oldukça etkili bir yöntemdir. Ancak karar ortamları her zaman kesin ve ölçülebilir bilgilerle sınırlı değildir. Uzman görüşlerinin, deneyimlerin, dilsel ifadelerin ve sezgisel değerlendirmelerin önemli olduğu alanlarda, klasik MOORA yöntemi yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenle, MOORA'nın bulanık mantıkla genişletilmesi gerekliliği doğmuştur.

Bulanık MOORA yöntemi, klasik MOORA yönteminin karar matrisi aşamasında kullanılan kesin sayısal verilerin yerine bulanık sayılar kullanılmasıyla esnektir. Böylece hem nicel hem de nitel verilerle çalışmak mümkün hale gelir. Yöntemin gelişimi, aşağıda belirtilen dört ana ekseninde şekillenmiştir:

5.1. İlk Yaklaşımlar ve Literatürdeki Uygulamalar

Bulanık MOORA yöntemine ilişkin ilk sistematik çalışmalar, 2010'lu yılların başında görülmeye başlamıştır. Özellikle tedarikçi seçimi, insan kaynakları yönetimi, sürdürülebilirlik analizi, risk değerlendirme ve enerji planlaması gibi karar verici görüşlerinin belirlenmesi olduğu alanlarda uygulamalar hızla artmıştır.

- Karaböşevir ve ark. (2015), personel seçiminde bulanık MOORA yöntemini kullanarak dilsel değerlendirmeleri üçgen bulanık sayılara dönüştürmüş ve karar vericilerin belirsiz yargılarını modellemiştir.
- Büyüktürkcan ve Güleriyüz (2016), yeşil tedarik zinciri yönetiminde bulanık MOORA'yı entegre ederek çevresel belirsizliklerin değerlendirilmesinde esnek bir yapı sunmuştur.
- Rami ve Gang (2019), sürdürülebilir enerji planlamasında, bulanık MOORA ile alternatiflerin performanslarını çok boyutlu kriterler altında analiz etmişlerdir.

Bu çalışmalar, yöntemin pratik karar verme süreçlerinde geniş bir uygulama alanına sahip olduğunu göstermektedir.

5.2. Kullanılan Bulanık Sayı Türleri

Bulanık MOORA yöntemi, farklı türde bulanık sayılarla uygulanabilir.

En yaygın olanlar:

- Üçgen Bulanık Sayılar (TFN): En sık kullanılan modeldir. Hesaplamanın kolay ve sezgisel yorumu güçlüdür.
- Yarımk Bulanık Sayılar (TrFN): Özellikle dilsel değişkenlerde daha esnek yapı sağlar.
- Aralık Bulanık Sayılar: Belirsizliğin daha geniş ifade edilmesi gereken durumlarda tercih edilir.

- **Tip-2 Bulanık Sayılar:** Daha ileri düzey uygulamalarda, özellikle uzman görüşleri arızasında çelişki varsa kullanılır (Zhang and Lin, 2014).

Çoğu uygulamada TFN yeterli olurken, artan model karmaşıklığına paralel olarak daha gelişmiş yapılar da tercih edilmektedir.

5.3. Gelişim Aşamaları ve Entegrasyon Çeşitleri

Bulanık MOORA yönteminin gelişimi yalnızca karar matrisinin bulanıklaştırılmasıyla sınırlı kalmamış, aynı zamanda çeşitli ÇKKV yöntemleriyle hibrit yapıların oluşturulmasıyla daha ileri düzey modellere evrilmiştir. Aşağıda bu gelişim trendleri kısaca özetlenmiştir:

- **Bulanık AHP + MOORA:** Kriter ağırlıklarının bulanık AHP ile elde edilmesi ve MOORA ile sıralama yapılması (Govindan ve ark., 2014).
- **Bulanık Entropi + MOORA:** Objektif ağırlıklandırma yöntemi olan entropi ile kriterlerin belirsizliğe göre ağırlıklandırılması (Sharma and Kumar, 2020).
- **DEMATEL + Bulanık MOORA:** Kriterler arası ilişkilerin nedensel analize belirlenmesi ve MOORA ile alternatif sıralaması yapılması.
- **Tip-2 Bulanık MOORA:** Karar vericiler arasındaki görüş uyumsuzluklarına daha hassas modelleyebilmek için önerilen üst seviye bulanıklaştırma yaklaşımı.

Bu tür hibrit yaklaşımlar sayesinde yöntem hem karar verici sayısı hem de belirsizlik düzeyi arttıkça daha tutarlı sonuçlar verebilmektedir.

5.4. Güncel Eğilimler ve Gelişen Yaklaşımlar

Literatürde son yıllarda Bulanık MOORA yönteminin aşağıdaki gelişim alanlarında daha fazla kullanıldığı gözlemlenmektedir:

- Sürdürülebilirlik değerlendirmeleri (çevresel-ekonomik-sosyal üçlü yapı)
- Kentsel planlama ve altyapı kararları
- Sağlık sistemleri yönetimi
- Afet ve risk yönetimi uygulamaları

- Tutarlık zincirlerinde kırılganlık ve esneklik analizi

Yöntemin bu alanlarda giderek artan şekilde kullanılması, karar vericilerin belirsizlik içeren durumlarda daha etkili bça çıkabilmesi açısından MOORA'nın bulanık versiyonunun önemini ortaya koymaktadır.

6. BULANIK MOORA YÖNTEMİNİN UYGULAMA ADIMLARI

Bulanık MOORA yöntemi, klasik MOORA algoritmasının adımlarını temel alır; ancak bu adımlar, karar matrisinde yer alan değerlerin bulanık sayılarla ifade edilmesi ve bu değerlerin işlenmesine yönelik özel matematiksel işlemlerle genişletilmiştir. Bu yöntem, karar vericilerin belirsiz, eksik ya da dilsel değerlendirmelerle ifade ettiği kriter puanlarının, sayısal kırılganlıklarla analiz edilmesine olanak tanıır.

Aşağıda, bulanık MOORA yönteminin adımları sistematik bir biçimde açıklanmıştır:

Adım 1: Problemin Tanımlanması ve Yapılandırılması

İlk aşamada:

- m adet alternatif belirlenir: $A_1, A_2, \dots, A_m$
- n adet alternatif belirlenir: $C_1, C_2, \dots, C_n$
- Kriterlerin fayda veya maliyet türü oldukları tanımlanır.
- Her bir kriterin önemli karar vericilere belirlenir (eğer ağırlıklı versiyon kullanılabılacaksa).

Adım 2: Bulanık Karar Matrisinin Oluşturulması

Her alternatifin her bir kriter altındaki performansı, genellikle üçgen bulanık sayılar (TFN) ile temsil edilir:

$$\tilde{x}_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})$$

Burada:

- l_{ij} : minimum değer
- m_{ij} : en olası değer
- u_{ij} : maksimum değer

Karar vericilerin dilsel ifadeleri uygun TPN'lere dönüştürülerek bu matris elde edilir.

Adım 3: Bulanık Karar Matrisinin Normalize Edilmesi

Her bir bulanık değerin normalize edilmesi için fayda ve maliyet kriterleri farklı biçimlerde ele alınır:

3.1. Fayda Kriterleri için:

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{l_{ij}}{u_j^+}, \frac{m_{ij}}{m_j^+}, \frac{n_{ij}}{n_j^+} \right) \quad (9)$$

3.2. Maliyet Kriterleri için:

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{r_j^-}{u_{ij}}, \frac{m_j^-}{m_{ij}}, \frac{u_j^-}{l_{ij}} \right) \quad (10)$$

Burada:

- u_j^+, m_j^+, n_j^+ : ilgili kriterdeki en yüksek değerler (fayda için)
- u_j^-, m_j^-, n_j^- : ilgili kriterdeki en düşük değerler (maliyet için)

Bu şekilde, her değer 0–1 aralığında normalize edilir.

Adım 4: Normalize Edilen Değerlerin Ağırlıklandırılması

Eğer kriterlerin önem dereceleri biliniyorsa (örneğin AHP, Entropi, SWARA gibi yöntemlerle belirlenmişse ve karar vericiler tarafından belirli oranlarda alınmışsa), normalize bulanık değerler kriter ağırlıklarıyla çarpılır:

$$\tilde{v}_{ij} = w_j \otimes \tilde{r}_{ij} \quad (11)$$

Bulanık sayıların skaler çarpımı şu şekilde yapılır:

$$w_j \otimes (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij}) = (w_j * l_{ij}, w_j * m_{ij}, w_j * u_{ij}) \quad (12)$$

Adım 5: Toplam Performans Skorlarının Hesaplanması

Her alternatif için fayda ve maliyet kriterleri ayrı ayrı toplanır:

5.1. Fayda kriterleri toplamı:

$$\tilde{B}_i = \sum_{j \in B} \tilde{v}_{ij} \quad (13)$$

5.2. Maliyet kriterleri toplamı:

$$\tilde{C}_i = \sum_{j \in C} \tilde{v}_{ij} \quad (14)$$

5.3. Net skur hesaplanması (bulanık çıkarma işlemi):

$$\tilde{S}_i = \tilde{B}_i \ominus \tilde{C}_i \quad (15)$$

Burada; bulanık çıkarma işlemi şöyle yapılır:

$$(l_1, m_1, u_1) \ominus (l_2, m_2, u_2) = (l_1 - u_2, m_1 - m_2, u_1 - l_2) \quad (16)$$

Adım 6: Bulanık Skorların Keskinleştirilmesi (Defuzzification)

Bulanık skorlar tek bir sayıya indirgenerek sıralama yapılır. En yaygın yöntemlerden biri Gravitational Center (Ağırlık Merkezi) yöntemidir:

$$C_i = \frac{l_i + m_i + u_i}{3} \quad (17)$$

Bu C_i değerleri sıralanarak alternatiflerin performansları belirlenir. En yüksek C_i değerine sahip olan alternatif, en uygun seçenek olarak değerlendirilir.

Adım 7: Alternatiflerin Karşılaştırılması ve Sonuçların Yorumlanması

Elde edilen C_i değerleri sıralanır ve:

- En iyi alternatif belirlenir.
- Alternatifler arasındaki farkların derecesi analiz edilir.
- Karar vericiye dayanıklılık analizi yapılarak öneri sunulabilir.

7. ÖRNEK UYGULAMA: KENTSEL ALANLARDA SÜRDÜRÜLEBİLİR TOPLU TAŞIMA ALTERNATİFLERİNİN SEÇİMİ

Küresel ölçekte artan kentselleşme, toplu taşıma sistemlerinin hem çevresel hem de sosyal açıdan sürdürülebilir olmasına zorunlu kılmaktadır. Bu doğrultuda, belediyeler ve şehir planlamacıları, karbon salınımını azaltan, ekonomik işletme maliyetine sahip ve toplumca benimsenen alternatifleri değerlendirmek zorundadır. Bu örnek uygulamada, bir kentsel bölgede sürdürülebilir toplu taşıma alternatiflerinden en uygun olanının seçimi problemi ele alınmakta ve çözümde Bulanık MOORA yöntemi kullanılmaktadır.

7.1. Problemin Tanımı ve Alternatifler

Belediye yönetimi, aşağıdaki beş toplu taşıma alternatifinden en sürdürülebilir olanı seçmeyi planlamaktadır:

- A1: Dizel Otobüsler
- A2: Hibrit Otobüsler
- A3: Elektrikli Otobüsler
- A4: Hafif Raylı Sistem (Tramvay)
- A5: Metru Sistemi
-

7.2. Kriterlerin Belirlenmesi

Bu uygulamada alternatifler Tablo 1’de yer alan altı sürdürülebilirlik kriterine göre değerlendirilecektir:

Tablo 1. Sürdürülebilir toplu taşıma alternatiflerinin seçiminde kullanılacak kriterler

Kriter Kodu	Kriter Adı	Kriter Türü
C1	Karbon Emisyonu (kg/km)	Maliyet
C2	İşletme Maliyeti (TL/km)	Maliyet
C3	Emisji Verimliliği (km/kWh veya km/fitre)	Fayda
C4	Sosyal Kabul ve Konfor Düzeyi (mln/et)	Fayda
C5	Yolcu Kapasitesi	Fayda
C6	Altyapı Uyumu ve Kurulum Kolaylığı	Fayda

7.3. Uzman Değerlendirmeleri ve Bulanık Karar Matrisi

Üç uzmandan oluşan karar verici komitesi her kriter için her alternatif hakkında dilsel değerlendirme almış ve bunlar üçgen bulanık sayılara dönüştürülmüştür. Kullanılan dilsel terimler ve bu dilsel terimlere karşılık gelen üçgen bulanık değerler Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Alternatiflerin seçimi probleminde kullanılan uzman dilsel terimler ve bunlara ait tip-1 üçgen bulanık değerler

Dilsel Terim	Üçgen Bulanık Değerler
Çok Kötü	(0.0, 0.0, 0.2)
Kötü	(0.0, 0.2, 0.4)
Orta	(0.2, 0.5, 0.8)
İyi	(0.6, 0.8, 1.0)
Çok İyi	(0.8, 1.0, 1.0)

Uzmanlar tarafından alternatiflerin kriterlere göre değerlendirilmesine ait karar matrisi Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Alternatiflerin kriterlere göre uzman değerlendirilmesi ait karar matrisi

Alternatifler/Kriterler	C1	C2	C3	C4	C5	C6
A1	Çok iyi	Çok iyi	Orta	Kötü	Orta	Kötü
A2	İyi	İyi	İyi	Çok iyi	İyi	İyi
A3	Kötü	Orta	Çok iyi	Çok iyi	İyi	Orta
A4	Orta	İyi	Çok iyi	İyi	Çok iyi	İyi
A5	Kötü	Orta	İyi	Orta	Çok iyi	İyi

Aşağıda Tablo 4'te ise uzman kuritesinde alternatiflerin kriterlere göre değerlendirilmesi ait üçgen bulanık değerlerin karşılıkları verilmiştir.

Tablo 4. Alternatiflerin kriterlere göre değerlendirilmesi ait üçgen bulanık değerler

Alternatifler/ Kriterler	C1	C2	C3	C4	C5	C6
A1	(0.8, 1.0, 1.0)	(0.8, 1.0, 1.0)	(0.2, 0.5, 0.8)	(0.0, 0.2, 0.4)	(0.2, 0.5, 0.8)	(0.0, 0.2, 0.4)
A2	(0.4, 0.6, 0.8)	(0.4, 0.6, 0.8)	(0.4, 0.6, 0.8)	(0.8, 1.0, 1.0)	(0.4, 0.6, 0.8)	(0.4, 0.6, 0.8)
A3	(0.0, 0.2, 0.4)	(0.2, 0.5, 0.8)	(0.8, 1.0, 1.0)	(0.8, 1.0, 1.0)	(0.4, 0.6, 0.8)	(0.2, 0.5, 0.8)
A4	(0.2, 0.5, 0.8)	(0.4, 0.6, 0.8)	(0.8, 1.0, 1.0)	(0.4, 0.6, 0.8)	(0.8, 1.0, 1.0)	(0.4, 0.6, 0.8)
A5	(0.0, 0.2, 0.4)	(0.2, 0.5, 0.8)	(0.4, 0.6, 0.8)	(0.2, 0.5, 0.8)	(0.8, 1.0, 1.0)	(0.4, 0.6, 0.8)

7.4. Normalizasyon ve Ağırlıklandırma

Bulanık normalizasyon işlemi, kriterin türüne (fayda veya maliyet) göre farklılık gösterir. Bu örnekte her üçgen tip-1 bulanık sayı değeri (l, m, u), kriter başlı normalize edilir.

- **Fayda Kriterleri (C3–C6):** Fayda kriterleri için Eşitlik 9 kullanılarak alternatiflerin kriterlere göre normalize işlemleri yapılır. Fayda kriteri açısından alternatiflerin kriterlere göre normalize edilmiş değerler Tablo 5'te verilmiştir.
- **Maliyet Kriterleri (C1, C2):** Maliyet kriterleri için Eşitlik 10 kullanılarak alternatiflerin kriterlere göre normalize işlemleri yapılır. Maliyet kriteri açısından alternatiflerin kriterlere göre normalize edilmiş değerler Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Alternatiflerin kriterlere göre değerlendirilmesi ait normalize edilmiş bulanık karar matrisi

Alternatifleri Kriterler	C1 (Maliyet)	C2 (Maliyet)	C3 (Fayda)
A1	(0.080, 0.300, 0.580)	(0.300, 0.500, 1.000)	(0.280, 0.500, 1.800)
A2	(0.080, 0.333, 1.000)	(0.350, 0.833, 2.000)	(0.480, 0.600, 1.800)
A3	(0.080, 1.000, 0.080)	(0.350, 1.800, 4.000)	(0.880, 1.000, 1.250)
A4	(0.080, 0.400, 2.000)	(0.350, 0.833, 2.000)	(0.880, 1.000, 1.250)
A5	(0.080, 1.000, 0.080)	(0.350, 1.800, 4.000)	(0.480, 0.600, 1.800)
Alternatifleri Kriterler	C4 (Fayda)	C5 (Fayda)	C6 (Fayda)
A1	(0.080, 0.300, 0.580)	(0.300, 0.500, 1.000)	(0.080, 0.333, 1.800)
A2	(0.880, 1.000, 1.250)	(0.400, 0.600, 1.000)	(0.580, 1.000, 1.800)
A3	(0.880, 1.000, 1.250)	(0.400, 0.600, 1.000)	(0.250, 0.833, 1.800)
A4	(0.480, 0.600, 1.000)	(0.800, 1.800, 1.250)	(0.580, 1.000, 1.800)
A5	(0.280, 0.500, 1.000)	(0.800, 1.800, 1.250)	(0.580, 1.000, 1.800)

Tablo 5, ağırlıklandırma adımının temelini oluşturur. Şimdi bu normalize değerler, her bir kriterin ağırlığıyla çarpılarak ağırlıklı normalize bulanık

karar matrisine dönüştürülebilir. Bunun için Eşitlik 11 kullanılarak ağırlıklı normalize edilmiş bulanık karar matrisi hesaplanır. Uzman görüşleri doğrultusunda her bir kriterin ağırlığı aşağıdaki şekilde belirlenmiştir.

C1: 0.25, C2:0.20, C3:0.15, C4:0.15, C5:0.15 ve C6:0.10 dir. Bu kriter ağırlıkları kullanılarak hesaplanmış olan ağırlıklı normalize edilmiş bulanık karar matrisi Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Ağırlıklı normalize edilmiş bulanık karar matrisi

Alternatifler/ Kriterler	C1 (0.25)	C2 (0.20)	C3 (0.15)
A1	(0.080, 0.050, 0.125)	(0.040, 0.100, 0.200)	(0.030, 0.075, 0.150)
A2	(0.080, 0.083, 0.250)	(0.050, 0.167, 0.400)	(0.060, 0.090, 0.150)
A3	(0.080, 0.350, 0.000)	(0.050, 0.300, 0.800)	(0.120, 0.150, 0.188)
A4	(0.080, 0.100, 0.500)	(0.050, 0.167, 0.400)	(0.120, 0.150, 0.188)
A5	(0.080, 0.350, 0.000)	(0.050, 0.300, 0.800)	(0.060, 0.090, 0.150)
Alternatifler/ Kriterler	C4 (0.15)	C5 (0.15)	C6 (0.10)
A1	(0.080, 0.080, 0.075)	(0.030, 0.075, 0.150)	(0.000, 0.033, 0.100)
A2	(0.120, 0.150, 0.188)	(0.060, 0.090, 0.150)	(0.050, 0.180, 0.200)
A3	(0.120, 0.150, 0.188)	(0.060, 0.090, 0.150)	(0.035, 0.083, 0.200)
A4	(0.060, 0.090, 0.150)	(0.120, 0.150, 0.188)	(0.050, 0.180, 0.200)
A5	(0.030, 0.075, 0.150)	(0.120, 0.150, 0.188)	(0.050, 0.180, 0.200)

7.5. Toplam Performans Skorlarının Hesaplanması. Bu aşamada; Tablo 5'ten yararlanılarak Eşitlik 13, 14, 15 kullanılarak toplam performans skorları hesaplanmış ve her alternatif için hesaplanan değerler Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Her alternatif için hesaplanan toplam performans skorları

Alternatifler	Fayda Toplamı B_i	Maliyet Toplamı C_i	Net Skor $S_i = B_i - C_i$
A1	(0.060, 0.313, 0.583)	(0.848, 1.150, 0.325)	(0.835, 0.063, 0.523)
A2	(0.280, 0.420, 0.675)	(0.858, 1.250, 0.650)	(0.838, 1.170, 0.625)
A3	(0.310, 0.471, 0.675)	(0.858, 1.450, 0.880)	(0.808, 0.023, 0.625)
A4	(0.350, 0.480, 0.725)	(0.858, 1.267, 0.980)	(-0.545, 0.223, 0.675)
A5	(0.280, 0.415, 0.625)	(0.858, 1.450, 0.880)	(-0.548, -0.035, 0.625)

7.6. Beklenen Skorların Sıralanması. Bu adımda; Tablo 7’den yararlanılarak ve Eşitlik 16 kullanılarak bir önceki adımda hesaplanmış olan net skorlar keskin değerlere dönüştürülür. Eşitlik 16 kullanılarak hesaplanmış keskin değerler (C_i) Tablo 8’de verilmiştir.

Tablo 8. Her alternatif için hesaplanan toplam performans skorlarının keskinleştirilmesi (defuzzification)

Alternatifler	Net Skor (S_i)	Keskinleştirilmiş (Defuzzification) Değeri (C_i)
A1	(0.035, 0.063, 0.523)	0.287
A2	(0.030, 0.170, 0.625)	0.275
A3	(0.080, 0.023, 0.625)	0.216
A4	(-0.545, 0.223, 0.675)	0.118
A5	(-0.540, -0.035, 0.625)	0.017

7.7. Alternatiflerin Karşılaştırılması ve Sonuçların Yürütülmesi

Bir önceki adımda hesaplanan C_i değerlerine bakılarak alternatiflerin sırala işlemi yapılır. Burada en yüksek C_i değerine sahip alternatif, en iyi alternatif olarak belirlenir. Bu göre ele alınan alternatiflerimizin sırala performansları Tablo 9’da verilmiştir.

Tablo 9. Alternatiflerin sıralama performansları

Alternatifler	(C ₂) Skorları	Sıralama Performansları
A2: Hibrit Otobüsler	0.275	1
A3: Elektrikli Otobüsler	0.216	2
A1: Dizel Otobüsler	0.207	3
A4: Hafif Raylı Sistem	0.118	4
A5: Metro Sistemi	0.017	5

7.8. Sonuçların Analizi ve Yorumlar

Bu çalışmada, kentsel alanlarda sürdürülebilir toplu taşıma alternatiflerinin seçimi amacıyla Bulanık MOORA yöntemi uygulanmıştır. Karar matrisinin oluşturulması, kriterlerin bulanık sayılarla modellenmesi, normalize edilmesi, ağırlıklandırılması ve net performans skorlarına hesaplanması aşamaları sistematik şekilde yürütülmüştür. Son aşamada keskinleştirme (defuzzification) işlemi ile alternatiflerin kesin skorları elde edilmiş ve alternatiflerin sıralaması yapılmıştır. Elde edilen net skorların keskinleştirilmesi (defuzzification) sonuçlarına göre alternatiflerin performans sıralaması Tablo 9'da verilmiştir. Buna göre uzman değerlendirmeleri doğrultusunda uygulanan Bulanık MOORA yöntemine göre elde edilmiş bulgular neticesinde aşağıdaki yorumlar yapılabilir:

- Hibrit Otobüsler (A2), sürdürülebilirlik kriterleri ve diğer kriterlerin genel dengesi bakımından en yüksek net skor değerini elde etmiş ve böylece en uygun toplu taşıma alternatifi olarak belirlenmiştir. Bu durum, hibrit teknolojinin karbon emisyonlarını azaltma, enerji verimliliğini artırma ve işletme maliyetlerini makul seviyede tutma potansiyelinin bir yansımasıdır.
- Elektrikli Otobüsler (A3) performans sıralamada ikinci sırada yer alması, yüksek enerji verimliliği ve sosyal kabul gibi fayda kriterlerinde güçlü performans göstermiştir. Ancak maliyet kriterlerindeki göreceli yüksek değerler, sıralamadaki hafif gerilemeye neden olmuştur.
- Dizel Otobüsler (A1) ise beklenildiği üzere karbon emisyonları ve çevresel etkileri nedeniyle daha düşük fayda skorlarına sahip olmasına karşın, işletme maliyetlerinin görece uygunluğu sebebiyle üçüncü sırada yer almıştır.

- Hafif Raylı Sistem (A4) ve Metro (A5) altyapı ve kurulum kolaylığı gibi kriterlerde avantajlı olmalarına rağmen, yüksek yatırım maliyetleri ve uzun geri dönüş süreleri nedeniyle sıralamada daha düşük performans göstermiştir.

7.9. Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada, kentsel alanlarda sürdürülebilir toplu taşıma alternatiflerinin seçimi için Bulank MOORA yöntemi kullanılmış ve çok kriterli, belirsizlik içeren karar süreçlerinde etkinliği gösterilmiştir. Analiz sonuçları, hibrit otobüslerin çevresel ve ekonomik kriterler bakımından en uygun alternatif olduğunu ortaya koymuştur. Elektrikli otobüsler ve diesel otobüsler ise sırasıyla ikinci ve üçüncü tercih olarak belirlenmiştir. Hafif raylı sistem ve metro gibi altyapı ağırlıklı seçenekler, yüksek yatırım maliyetleri ve uzun kurulum süreleri nedeniyle sıralamada daha düşük performans göstermiştir.

7.9.1.Bulguların Değerlendirilmesi

Hibrit otobüslerin birinci sırada yer alması, mevcut literatürle uyumlu bir sonuçtur. Sierzechna ve ark. (2014) ve Lin and Wu (2018) gibi çalışmalar, hibrit teknolojinin karbon emisyonlarını azaltırken maliyetleri de dengeleyerek sürdürülebilir ulaşımada önemli bir rol oynamadığını vurgulamaktadır. Elektrikli otobüslerin ikinci sırada olması ise, bu teknolojinin çevre dostu olması ve enerji verimliliğinin yüksek olmasına rağmen, altyapı eksiklikleri ve yatırım maliyetlerinin hala önemli bir engel olduğunu göstermektedir (Tran ve ark., 2019; Li ve ark., 2020).

Diesel otobüslerin üçüncü sırada yer alması, kısa vadeli ekonomik avantajlarının sürdürülebilirlik hedefleriyle çatıştığını ortaya koymaktadır. Bu bulgu, Govindan ve ark. (2013) tarafından sürdürülebilirlik kriterlerine göre yapılan çalışmalarda paralellik göstermektedir.

Altyapı yatırıma gerektiren hafif raylı sistem ve metro seçeneklerinin düşük sıralaması ise, yüksek sermaye maliyetleri ve uzun geri dönüş sürelerinin toplu taşıma projelerinde önemli kısıtlayıcı faktörler olduğunu teyit etmektedir. Büyüksökan ve Çifçi (2012) tarafından önerilen bulank çok kriterli karar verme modellerinin bu tür karmaşık projelerde kullanılmasının gerekliliği bu bağlamda daha anlamlı hale gelmektedir.

7.9.2. Yöntemsel Katkılar ve Uygulanma Alanları

Bulanık MOORA yöntemi, bulanık mantık ile klasik MOORA yaklaşımının entegre ederek, karar vericilerin belirsiz ve subjektif verilerle de etkin kararlar almalarına sağlamaktadır. Bu yöntem, kentsel ulaşım alanında karar destek sistemlerine yeni bir perspektif kazandırmakta ve sürdürülebilirlik kriterlerinin çok boyutlu değerlendirilmesine olanak tanımaktadır.

7.9.3. Sınırlılıklar ve Gelecek Çalışmalar

Çalışmada kullanılan kriterler ve ağırlıklar, karar vericilerin görüşleri ve literatür ışığında belirlenmiştir ancak farklı şehirler veya ülkelerde kriterlerin önemi değişebilir. Ayrıca, alternatiflerin performans değerleri bulanık sayılarla modellenirken, veri kaynaklarındaki belirsizlik ve özensizlik etkileri göz önünde bulundurulmalıdır.

Gelecekte, Bulanık MOORA yöntemi diğer bulanık çok kriterli karar verme teknikleri (örneğin Tip-2 Bulanık TOPSIS, Bulanık VIKOR) ile karşılaştırılarak performans analizi yapılabilir. Ayrıca, gerçek uygulamalardan elde edilen veri setleriyle modelin geçerliliği ve uyarlama kabiliyeti test edilebilir.

8. YÖNTEMİN GÜÇLÜ YÖNLERİ, KISITLARI VE DİĞER YÖNTEMLERLE KARŞILAŞTIRILMASI

8.1. Yöntemin Güçlü Yönleri

Bulanık MOORA yöntemi, çok kriterli karar verme süreçlerinde bulanık mantığın esnekliği ile MOORA'nın etkin sıralama mekanizmasını bir araya getirmektedir. Bu birleşim, belirsizlik ve subjektifliğin yoğun olduğu karar ortamlarında şu avantajları sağlar:

- **Belirsizlik Yönetimi:** Bulanık sayılar, karar vericilerin kesin olmayan, bulanık veya subjektif değerlendirmelerini matematiksel olarak ifade etmesine olanak tanır. Bu sayede, gerçek hayattaki karmaşık ve kesin olmayan veriler etkin şekilde işlenir (Zadeh, 1965).
- **Çok Kriterli Analiz:** MOORA yöntemi, kriterler arası etkileşimleri dikkate alarak fayda ve maliyet kriterlerini birlikte değerlendirebilme yeteneğine sahiptir. Bu, karar problemlerinde kapsamlı bir performans analizi sağlar (Braners and Zavadskas, 2010).

- **Basitlik ve Uygulanabilirlik:** Yöntem, diğer bazı karmaşık çok kriterli karar tekniklerine göre daha az hesaplama gerektirir ve sonuçları yorumlamak görece daha kolaydır. Bu da karar vericilerin sürece daha hızlı adapte olmasını sağlar.
- **Esneklik:** Bulanık MOORA, farklı alanlardaki karar problemlerine uyarlanabilir; farklı bulanık sayı türleri (örneğin üçgen veya yamuk) ile kullanılabilir.

3.2. Yöntemin Kusurları

Her ne kadar Bulanık MOORA birçok avantaj sağlasa da, bazı sınırlamaları da mevcuttur. Bunlar;

- **Ağırlıklandırma Hassasiyeti:** Kriter ağırlıkları karar vericiler tarafından belirlenirken subjektiflik ve hata riski mevcuttur. Yanlış ağırlıklandırma, sonuçların doğruluğunu etkileyebilir.
- **Bulanık Sayıların İşlenmesi:** Bulanık sayılarla yapılan işlemler matematiksel olarak karmaşıktır ve doğru uygulanması uzmanlık gerektirir. Özellikle çok sayıda kriter ve alternatif olduğunda hesaplama yavaşlığı artabilir.
- **Tek Yöntem ile Sınırlılık:** MOORA yöntemi sıralama için etkili olsa da, belki alternatif çok kriterli yöntemlerle kıyaslandığında bazı durumlarda farklı sonuçlar üretebilir. Bu nedenle, karşılaştırmalı analizler yapılması tavsiye edilir.

3.3. Diğer Yöntemlerle Karşılaştırılması

Bulanık MOORA, çok kriterli karar verme alanında kullanılan diğer popüler yöntemlerle kıyaslandığında bazı öne çıkan özelliklere sahiptir:

- **Bulanık TOPSIS:** TOPSIS, ideal çözüme olan uzaklığı ölçerek sıralama yapar. MOORA ise fayda ve maliyet kriterlerini doğrudan normalize ederek toplam performansı hesaplar. MOORA'nın hesaplama basitliği, TOPSIS'e göre tercih sebebi olabilir (Zavadskas ve ark., 2014).
- **Bulanık VIKOR:** VIKOR yöntemi, uzlaşma çözümünü sunar ve karar vericilerin risk tercihlerine göre esneklik sağlar. MOORA ise daha deterministik bir sıralama sağlar. Eğer karar vericiler uzlaşmaya açık ise VIKOR tercih edilebilir (Opricovic and Tzeng, 2004).

- Bulanık AHP: AHP, kriter ağırlıklarının belirlenmesinde uzman görüşlerini sistematik olarak alır ancak büyük alternatif setlerinde karmaşıklık artar. MOORA ise ağırlıklar sabit olduğunda doğrulanı sıralama yapar ve daha hızlı sonuç verir.

Bu karşılaştırmalar, karar probleminin doğasına, karar vericilerin tercihlerine ve veri yapısına bağlı olarak uygun yöntemin seçilmesinde rehberlik eder. Ayrıca, hibrit yaklaşımlar ile farklı yöntemlerin kombinasyonu da performansı artırabilir.

9. GELECEKTEKİ ARAŞTIRMA ALANLARI VE UYGULAMALAR

Bulanık MOORA yöntemi, çok kriterli karar verme problemlerinde belirsizliklerin etkili yönetilmesine olanak tanıyan güçlü bir araçtır. Ancak, bu alandaki gelişmeler ve karmaşık karar süreçlerinin artan ihtiyaçları doğrultusunda, aşağıdaki araştırma alanları ve uygulama fırsatları ön plana çıkmaktadır:

9.1. Gelişmiş Bulanık Modellerin Entegrasyonu

Tip-1 bulanık mantık temelli MOORA yaklaşım birçok uygulamada başarıyla kullanılmış olsa da, daha karmaşık belirsizliklerin modellenmesi için Tip-2 bulanık mantık ve diğer genişletilmiş bulanık setlerin entegrasyonu önemlidir. Bu modeller, karar vericilerin daha fazla belirsizlik ve bulanıklık durumunu ifade etmesine imkân tanıyacaktır (Mendel, 2017).

9.2. Hibrit Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri

Bulanık MOORA yöntemi, diğer bulanık çok kriterli yöntemlerle (örneğin Bulanık TOPSIS, Bulanık VIKOR, Bulanık AHP) hibrit şekilde birleştirilerek karar süreçlerinin doğruluğu ve güvenilirliği artırılabilir. Bu tür hibrit yaklaşımlar, farklı karar problemlerine özgü güçlü yönlerin bir araya getirilmesini sağlar (Zavadskas and Turskis, 2011).

9.3. Gerçek Zamanlı ve Büyük Veri Uygulamaları

Endüstri 4.0 ve akıllı şehir uygulamalarının yaygınlaşmasıyla birlikte, karar destek sistemlerinin gerçek zamanlı veri işleme kapasitesine sahip olması gerekmektedir. Bulanık MOORA'na büyük veri ve akıllı sistemlerle entegrasyonu, dinamik ve karmaşık karar ortamlarında etkinlik sağlayabilir (Kumar ve ark., 2020).

9.4. Sektörel Uygulamaların Çeşitlendirilmesi

Bulanık MOORA yöntemi, enerji yönetimi, sağlık hizmetleri, tedarik zinciri optimizasyonu, çevre yönetimi gibi farklı sektörlerde uygulanabilir. Özellikle sürdürülebilirlik ve çevresel etkilerin kritik olduğu alanlarda yöntemin uygulanabilirliği artırılmalıdır (Govindan ve ark., 2013).

9.5. Karar Verici Davranışlarının Modellemesi

Karar vericilerin psikolojik ve bilişsel süreçleri, karar sonuçlarını doğrudan etkiler. Bulanık MOORA yönteminin, insan faktörünü daha iyi yönetmek için davranışsal karar modelleriyle entegrasyonu, karar kalitesini artırabilir (Kabraman ve ark., 2007).

9.6. Yanlış ve Araç Geliştirme

Bulanık MOORA ve benzeri yöntemlerin kullanımını kolaylaştırmak üzere kullanıcı dostu yazılım ve araçların geliştirilmesi, yaygınlaşmasını ve pratik uygulamalarda kullanılabilirliğini artıracaktır. Açık kaynak kodlu ve görsel ara yüzü uygulamalar, karar vericiler için büyük fayda sağlayacaktır.

10. SONUÇ

10.1. Genel Özet

Bu yazımızda, Bulanık MOORA yöntemi detaylı bir şekilde ele alınmış; yöntemin temel kavramları, hesaplama adımları ve bulanık mantık ile MOORA'nın entegrasyonu anlatılmıştır. Kentel alanlarda sürdürülebilir toplu taşıma alternatiflerinin seçimi üzerine gerçekleştirilen örnek uygulama ile yöntem pratiğe dökülmüş ve farklı alternatiflerin performansları karşılaştırılmıştır. Analiz sonucunda hibrit otobüslerin en uygun seçenek olduğu belirlenmiş, elektrikli ve dizel otobüsler ise sıralamada ikinci ve üçüncü sırada yer almıştır. Altyapı yatırım gerektiren hafif raylı sistem ve metro sistemi ise yüksek maliyet ve uzun yatırım süreleri nedeniyle daha düşük performans göstermiştir.

10.2. Yöntemin Genel Değerlendirmesi

Bulanık MOORA yöntemi, belirsizliklerin yoğun olduğu karmaşık karar problemlerinde hem bulanık mantığın esnekliğini hem de MOORA yönteminin etkin sıralama kabiliyetini bir araya getirerek güçlü bir analiz aracı sunmaktadır. Yöntemin kolay uygulanabilir olması, hesaplama

süreçlerinin nispeten basitliği ve belirsizliklerin sistematik şekilde modellenmesi, karar vericiler için önemli avantajlardır. Ancak, kriter ağırlıklarının belirlenmesinde ve bulanık sayıların matematiksel işlemlerinde dikkatli olunması gerekmektedir. Ayrıca, yöntemin farklı bulanık türleri ve hibrit modellerle zenginleştirilmesi, sonuçların güvenilirliğini arttırabilecektir.

10.3. Karar Vericilere Öneriler

- **Belirsizliklerin Dikkate Alınması:** Karar süreçlerinde kesin ve net verilerin olmaması durumlarında Bulanık MOORA gibi bulanık mantık temelli yöntemlerin kullanılması, karar kalitesini arttıracaktır.
- **Kriter Ağırlıklarının Doğru Belirlenmesi:** Ağırlıklar karar sürecinin doğrudan etkilendiğinden, uzman görüşlerine dayalı sistematik yöntemler (örneğin Bulanık AHP veya Entropi) ile belirlenmesi önerilir.
- **Alternatiflerin Kapsamlı İncelemesi:** Sadece ekonomik veya çevresel değil, sosyal kabul, altyapı uyumu gibi çok boyutlu kriterleri dikkate alınması önerilir.
- **Hibrit Yaklaşımların Değerlendirilmesi:** Farklı çok kriterli karar verme yöntemlerinin entegrasyonu, özellikle karmaşık ve belirsiz karar ortamlarında performansı yükseltebilir.
- **Yöntemin Sürekli Güncellenmesi:** Veri ve çevresel koşullar değiştiğinde kriterler ve ağırlıklar yeniden gözden geçirilmeli, karar destek sistemleri güncel tutulması önerilir.

KAYNAKÇA

- Bruma, W. K., and Zavadskas, B. K. (2006). The MOORA method and its application to privatization in a transition economy. *Control and Cybernetics*, 35(2), 445–469.
- Bruma, W. K., and Zavadskas, B. K. (2010). Project management by the MOORA method. *Technological and Economic Development of Economy*, 16(4), 613–640.
- Bruma, W. K., Ginevicius, R., and Zavadskas, B. K. (2008). The European Union in a transition economy. *Transformations in Business and Economics*, 7(2), 21–37.
- Büyükoğlu, G., and Çiftçi, G. (2012). A novel fuzzy multi-criteria decision framework for sustainable supplier selection with incomplete information. *Computers and Industrial Engineering*, 62(2), 138–150.
- Büyükoğlu, G., and Güleriyüz, S. (2016). Evaluation of the green supply chain management practices: A fuzzy MOORA approach. *Production Planning and Control*, 27(16), 1374–1388.
- Büyükoğlu, G., Güleriyüz, S., and Molu, B. (2019). A new integrated fuzzy MCDM approach for sustainable supplier selection. *Journal of Enterprise Information Management*, 32(3), 529–554.
- Gavindan, K., Khoshrovi, R., and Jafari, A. (2013). A fuzzy multi criteria approach for measuring sustainability performance of a supplier based on triple bottom line approach. *Journal of Cleaner Production*, 47, 345–354.
- Gavindan, K., Rajendran, S., Sarkis, J., and Murugesan, P. (2014). Multi criteria decision making approaches for green supplier evaluation and selection: A literature review. *Journal of Cleaner Production*, 96, 66–83.
- Hwang, C. L., and Yoon, K. (1981). *Multiple attribute decision making: Methods and applications*. Springer-Verlag.
- Kakran, C., Cebeci, U., and Eren, D. (2007). Multi-criteria decision making using fuzzy set theory: A literature survey. *Expert Systems with Applications*, 36(3), 5271–5281.
- Karabasevic, D., Popovic, G., Stankovic, D., and Zavadskas, B. K. (2015). Hybrid MCDM model for personnel selection based on fuzzy MOORA method. *Technological and Economic Development of Economy*, 21(3), 446–466.

- Keeney, R. L., and Raiffa, H. (1993). *Decisions with multiple objectives: Preferences and value trade-offs*. Cambridge University Press.
- Li, I., Wang, C., and Zhu, X. (2020). Development and application of electric buses: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 117, 109455.
- Lin, C. C., and Wu, T. L. (2018). Evaluating hybrid electric bus investment using fuzzy multi- criteria decision making approach. *Energy*, 147, 314–323.
- Mardani, A., Jusoh, A., and Zavadskas, E. K. (2015). Fuzzy multiple criteria decision-making techniques and applications – Two decades review from 1994 to 2014. *Expert Systems with Applications*, 42(8), 4126–4148.
- Mardani, A., Zavadskas, E. K., Streimikiene, D., Jusoh, A., and Nur, K. M. (2016). Application of MCDM techniques in sustainable energy development: A systematic review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 649–675.
- Rani, P., and Garg, H. (2019). A new hybrid method based on fuzzy TOPSIS and fuzzy MOORA for selection of sustainable energy source. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 31, 331–341.
- Sharma, M., and Kumar, R. (2020). A novel intuitionistic fuzzy MCDM approach for selection of waste management technology. *Journal of Environmental Management*, 264, 110493.
- Sierzbola, W., Bakker, S., Mast, K., and Van Wee, B. (2014). The influence of financial incentives and other socio-economic factors on electric vehicle adoption. *Energy Policy*, 68, 183–194.
- Tran, M. K., Bazister, D., Bishop, J. D., and McCulloch, M. D. (2019). Realizing the electric- vehicle revolution. *Nature Climate Change*, 9(2), 108–111.
- Triantaphyllou, B. (2000). *Multi-criteria decision making methods: A comparative study*. Springer.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338–353.
- Zhang, X., and Lin, P. (2014). Interval Type-2 Fuzzy MOORA method for multi-attribute group decision making. *Applied Soft Computing*, 24, 531–540.
- Zimmermann, H. J. (2001). *Fuzzy set theory—and its applications* (4th ed.). Springer.

Bölüm 13

TÜMÜYLE ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN ELEKTRİK MOTORLARI

Haluk GÜNEŞ¹ , M. Akif KUNT²,

1 Associate Prof. Dr., Kutahya Dumlupinar University, Tavşanlı Vocational School, Motorized Vehicle and Transporting Technologies Department, ORCID: 0000-0002-0915-0924, haluk.gunes@dpu.edu.tr

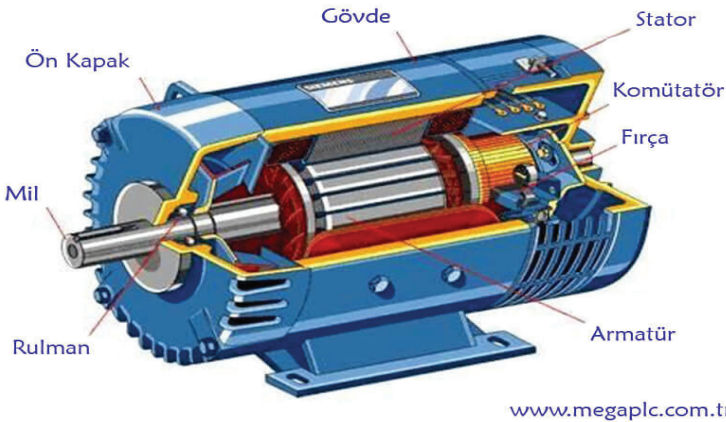
2 Associate Prof. Dr., Kutahya Dumlupinar University, Tavşanlı Vocational School, Motorized Vehicle and Transporting Technologies Department, ORCID: 0000-0001-5710-7253, mehmetakif.kunt@dpu.edu.tr

1.Giriş

EA'larda kullanılan motorlar rejeneratif frenleme etkisi oluşturabilmesi açısından geniş tork-hız karakteristiğine sahip verimi yüksek, sabit tork ve gücü uzun süre verebilecek geniş bir çalışma aralığına sahip olmalıdır. Düşük devirlerde bile yüksek torku koruyabilmeli hızlı çalışma ve ani ivmelenmelerde istenilen etkiyi sağlayabilmelidir. Mümkün olduğunca küçük boyutlarda verimi yüksek ve hafif bir motor olmalıdır. Uzun süre yüksek hızlarda sürülebilmeli, ani elektriksel güç değişimleri gibi zorlu koşullarda sıcaklığını koruyarak güvenli olmalıdır. Toz, su ve kirlilik gibi dış etkenlerden minimum düzeyde etkilenmeli ve kendisi de çevreye gürültü vermemelidir. Minimum harmonik bozulma ve düşük seviyede elektromanyetik gürültü ile çalışmalıdır. Soğutulmaya ihtiyaca en düşük seviyede kalacak şekilde uzun vadeli ve bakımı kolay bir yapıda üretilmelidir. Tüm bu özellikler göz önünde bulundurulduğunda EA'lar da genellikle dört tip motor kullanılmaktadır.

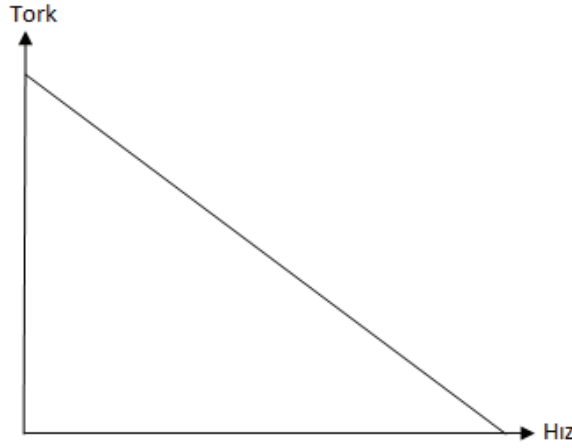
2. Doğru akım motorları

Doğru akım motorları (DCM) doğru akım elektriğini manyetik alan içerisindeki telden geçirmek suretiyle rotorunu döndürerek çalışan motorlardır. Bu tür motorlar yüksek tork verebilen, sağlam ve en önemlisi basit kontrol edilebilen motorlardır. DC akım ile çalışması direk akü voltajı ile tahrik edilmesini sağlar. Bu motorlarda elektrik voltajı değiştirilerek kolayca devirleri ayarlanabilir. Şekil 1'de genel amaçlı bir DC akım motoru ve parçaları gösterilmektedir (Mega mühendislik, 2024).



Şekil 1. DC akım motoru

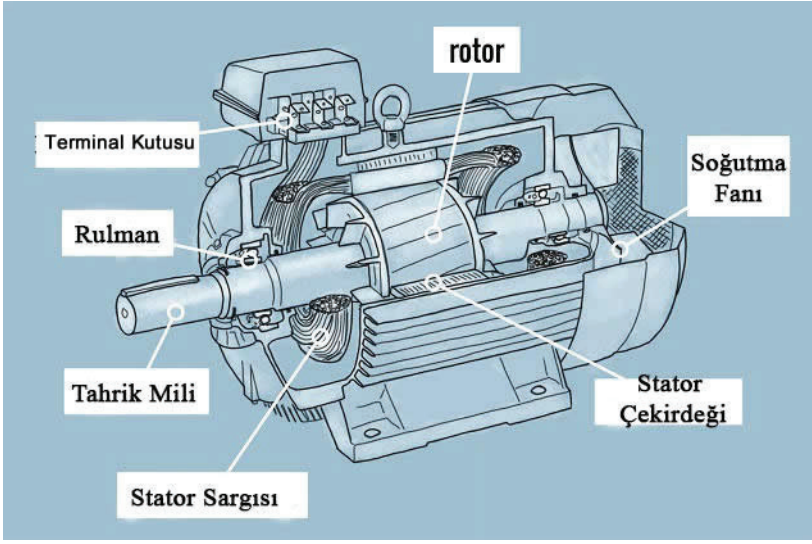
20. Yüzyılın başında EA'larda çok tercih edilmiş olmalarına karşın güç elektroniğinin gelişimi ile zaman içerisinde ilgisini kaybetmiştir. Ayrıca içerisinde fırçaların bulunması verimini rakiplerine oranla önemli ölçüde düşürmektedir. Fırçalar motor dönerken kıvılcım çıkartmaktadır. Bu durum onların tehlikeli olmasına sağlar. Günümüzde küçük boyutlu düşük güç ve hızlarda çalışabilen EA'larda tercih edilmektedir. Yeni nesil büyük güç gerektiren EA'larda boyutlarının artması sebebiyle tercih edilmemektedir. Şekil 2'de DCM'lara ait güç ve tork ilişkisi gösterilmektedir (Hashemnia & Asaei, 2008). DCM'lar düşük devirlerde daha iyi tork verirler ve hız arttıkça torkları da düşmektedir. Dolayısıyla yüksek hızlarda tasarlanan bir EA için kullanımı çok uygun değildir.



Şekil 2. DC motorların hız ve tork ilişkisi

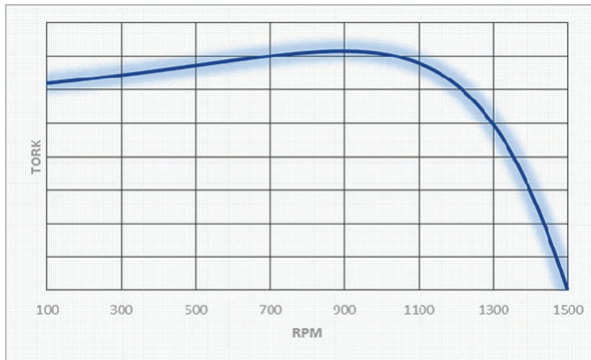
3. Asenkron motorlar (İndüksiyon motorları)

Asenkron motorlar (ASM) indüksiyon motorları (IM) gibi çalıştırlarından bu isimle de anılmaktadır. 3 fazlı veya 2 fazlı AC ile çalışırlar. 3 fazlı ASM'lar kendi kendine çalışmaya başlayabilirler. 2 fazlı olanlar ise ilk başlangıç için yardımcı sistemlere ihtiyaç duyarlar. Yapıları basit, güvenilir, dayanıklı olduklarından çok sık bakım gerektirmezler. Dolayısıyla maliyetleri düşüktür. Yapısında fırça bulunmaz dolayısıyla kıvılcım çıkartmadığından yanıcı patlayıcı ortamlarda güvenli bir şekilde kullanılabilirler. Devir sayılarını ayarlama oldukça kolaydır ve yük altında devir sayıları değişmez. Şekil 3'de tipik bir ASM'un iç yapısı gösterilmektedir (Direnc net, 2021).



Şekil 3. Asenkron motorun kesit yapısı

Bu motorlar en basit anlatımıyla statör ve rotor adı verilen 2 yapıdan oluşur. Statör 3 fazlı sarım sayısında sahiptir ve dış kısımda bulunur. İçeride ise rotor vardır. Rotorların yapısına göre ASM'lar Sincap kafesli ve bilezik tipi olmak üzere iki farklı türe sahiptir. Bu rotorlar dışında sistemin çalışması aynıdır. Sincap kafesli ASM'larda rotor alüminyumdan veya bakırdan yuvarlak kanatlar şeklinde ve her iki ucu kısa devre bilezikleri ile kısa devre yapılmıştır. Bilezik tipi ASM'larda ise üzerine açılmış kanallara üç fazlı sargılar yerleştirilmiş rotor sac bloğu ve döner bilezikler bulunmaktadır. Bu sargılara dış akım devresi döner bileziklere bağlı kömür fırçalar ile sağlanır. Şekil 4'de tipik bir sincap kafesli ASM'un tork ve hız grafiği gösterilmektedir. Bu motorlarda hız arttıkça tork düşük bir eğile de olsa arma eğilimini devam ettirir.

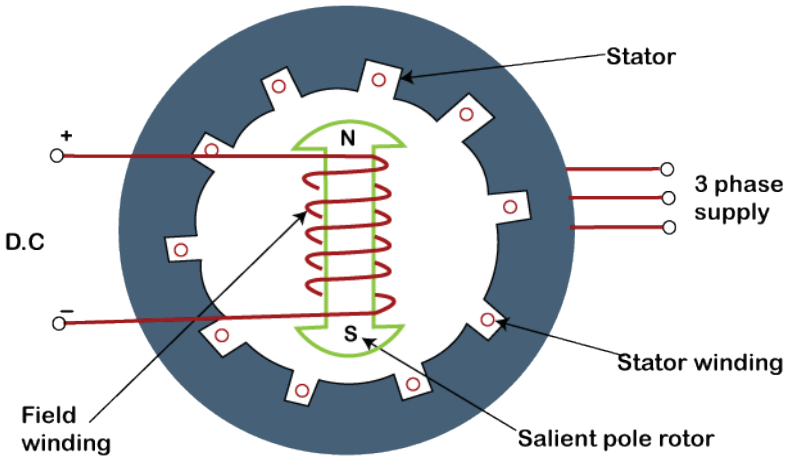


Şekil 4. Sincap kafesli ASM'un tork ve hız grafiği

Statör sargılarına 3 fazlı AC verildiğinde sargılarda AC'nin yapısı gereği dönen bir manyetik alan oluşmaktadır. Bu dönen manyetik alan içerisinde rotor manyetik alanın dönüş hızından daha düşük bir hızda dönmeye başlar. Bu sebepten dolayı bu motorlara ASM'lar denmiştir. Yani rotorun hızı hiçbir zaman statördeki manyetik alanın dönüş hızına yetiştirilemez.

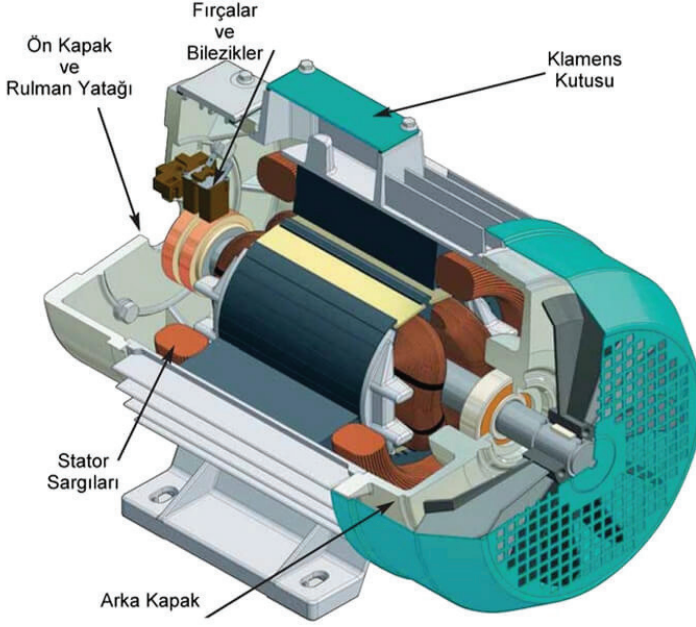
4. Senkron motorlar (SM)

Senkron motorlarda da (SM), ASM benzer döner manyetik alanını içerisinde onunla beraber dönen bir rotor bulunmaktadır. Bu açıdan bakıldığında her iki motorda çalışma prensibi olarak birbirine benzerdir. Farklılık içyapısında bulunan rotordaki manyetik alanın oluşturulmasıdır. SM'lerde Statör sargılarına AC akım uygulanırken rotor sargılarına DC akım uygulanır. Böylece rotorda sürekli kutupları aynı kalan bir elektromanyetik alan oluşturulur. Bu durum Statör ve rotordaki manyetik alanların birbirlerine kitlenmesine sebep olur. Dolayısıyla elektrik akımı verildiğinde SM dönmez. Bu motorları ilk harekete geçirmek için çeşitli yöntemler uygulanarak döndürülmesi sağlanır. Yani SM elektrik akımı verildiğinde hareket etmiyorsa bu durumunu korur, hareket ediyorsa yine bu durumunu korur. İlk hareketi verebilmek için SM motor ya ASM gibi çalıştırılıp dönüş hızına ulaştığında SM gibi çalıştırılması sağlanır ya da dışarıdan bir harici motor ile ilk hareket verilir veya statöre değişik frekanslarla elektrik verilerek yol verme işlemi yapılabilir. Şekil 5'de en temel anlamda SM'ların içyapısı gösterilmektedir (Elektrik İstanbul, 2023).



Şekil 5. SM'ların içyapısı

SM'ların en büyük avantajı sabit hızların gerekli olduğu uygulamalarda yük değişse bile hızını korumasıdır. Düşük devirlerde yüksek ve kararlı tork verebilir. İstenildiğinde hem motor hem de jeneratör olarak kullanılabilir. Yüksek güçlü motorların gerekli olduğu sistemler için uygundur. Ayrıca sabit tesislerde elektrik devrelerinin güç katsayılarını düzeltilmesinde kompanzasyon sistemi olarak da kullanılabilir. Şekil 6'da senkron motorun parçaları gösterilmektedir. (Mega mühendislik, 2022)



Şekil 6. Senkron motorunun parçaları

SM'ların en büyük dezavantajı kendi kendilerine hareket edememeleridir. Bunun için ek sistemler gerekli olabilir. ASM'lara göre pahalı olmaları da bir diğer dezavantajdır. Elektrikli araçlarda SM'ların kullanımı için daha fazla teknolojik gelişmeye ihtiyaç olduğu söylenebilir.

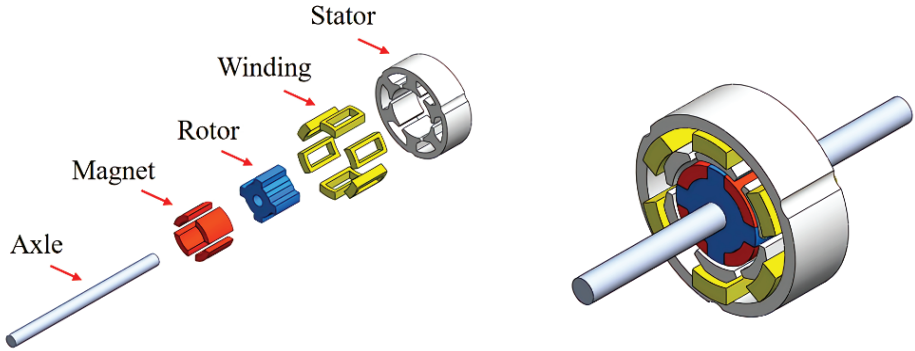
5. Sabit mıknatıslı senkrom motorlar (PMSM)

Kalıcı mıknatıslı senkrom motorlar (PMSM) Fırçasız DC motorlar (BLDC) ve ASM'ların avantajlı yanları birleştirilerek geliştirilmiş motorlardır. İçyapılarında diğerlerinde olduğu gibi bir rotor ve bir statör bulunmaktadır. Statörde AC'nın verildiği üç fazlı bobinler yer alırken rotora sabit mıknatıslar kullanılmaktadır. Şekil 7'de PMSM motorun içyapısı gösterilmektedir (Hongyu magnet, t.y.).



Şekil 7. PMSM'un içyapısı

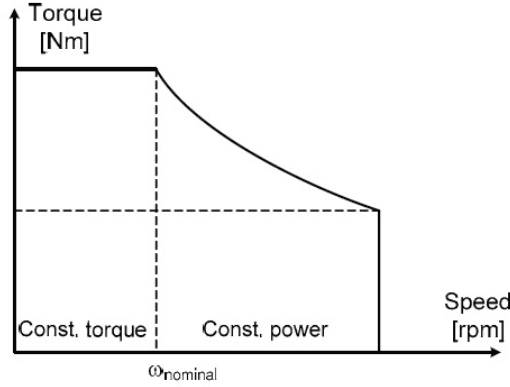
Statörleri bobinlerin yerleştiriliş şekline dağıtılmış bobinli ve dağıtılmamış bobinli PMSM'ler olarak sınıflandırılmaktadır. Diğer motorlardan farklı olarak PMSM motorlarda rotor kısmına daimi mıknatıslar yerleştirilmiştir. Bu mıknatıslar Ferrit, Alnico (Alüminyum Nikel Cobalt - AlNiCo) Alaşım, Samaryum Kobalt (SmCo) Alaşım veya Neodimyum Demir Bor (NdFeB) Alaşım olabilir. Şekil 8'de PMSM motora ait parçalar gösterilmektedir (Pang, Shi, Xie, Huang, ve Bui, 2020).



Şekil 8. PMSM motoru oluşturan parçalar

Verimlerinde önemli düzeyde artış sağlayan uyarma kayıpları yoktur ve hacim başına daha yüksek moment elde edilebilir. Diğer motorlara göre daha iyi bir dinamik performans sağlamaları ve basit yapıları ile düşük fiyatlı olması onları önemli düzeyde avantajlı yapar. Kıvılcım çıkarmada çalışmaları güvenli bir motor olmalarını sağlar. Rotorda iletken kaybı ve ısınma olmamaktadır. Şekil 9'da tipik bir PMSM'a ait tork ve hız

grafiği gösterilmektedir (Rudnicki, Czerwinski, Polok, and Sikora, 2015). Bu motorlar hızları artsa da uzun süre torklarını sabit tutabilmektedir.

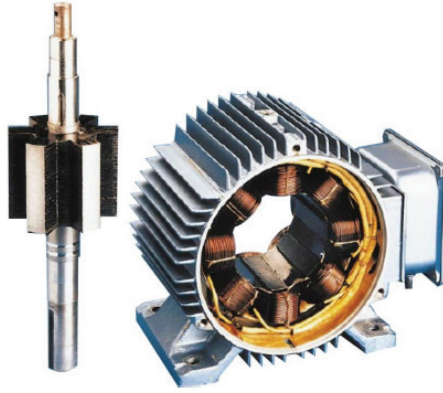


Şekil 9. PMSM'a tork ve hız grafiği

Rotor pozisyonunu ve hızını algılamak için hall effect sensörler kullanılmalıdır. Bu durum onları rakiplerine oranla dezavantajlı yapabilmektedir. Ancak gerektiğinde rejeneratif frenlemede elektrik üretebilmeleri onları EA'arda hem jeneratör hem de motor olarak kullanılmalarını sağlar. Bu özellikleri onları elektrikli direksiyon motoru, sürüş motoru ve jeneratör gibi birçok noktada popüler yapmıştır.

6. Anahtarlamalı relüktanslı motorlar (SRM)

Anahtarlamalı relüktans motorlar (SRM), rotor ve statöründe çıkıntılar bulunan yapısı oldukça basit motorlardır. Statorda bobinler bulunurken rotorda bobin veya sabit mıknatıs bulunmamaktadır. Stator sargıları karşılıklı kutuplara sarılmış ve birbirlerine seri bağlanmıştır. Çalışması için mutlaka sürücü devreye, güç elektroniğine ve konum belirleme sensörlerine ihtiyaç vardır (Fenercioğlu ve Tarımer. 2005). Statördeki kutup sayısı ve rotordaki çıkıntıların sayısı belirli oranlarda yapılabilmektedir. Tek fazlı olarak 2/2, 4/4, 6/6, 8/8, çift fazlı olarak 4/2, 8/4, 6/4, 8/6, üç fazlı olarak 6/4, 8/6, 15/8, 24/16, dört fazlı olarak 8/6, 16/12 gibi birçok dizilime sahip SRM üretilir. Şekil 10'da bir SRM rotor ve stator yapısı gösterilmektedir (Elektrikport.com, 2016).



Şekil 10. SRM'ye ait stator ve rotor yapısı

Rotorda sargı veya daimi mıknatıs olmaması tasarımını basitleştirmiştir ve soğutulması kolaydır. Fazlar birbirlerinden bağımsız çalışırlar. Dolayısıyla fazlardan birisi bile arıza yapsa çalışmasına devam edebilir. Güç, tork ve verimleri yüksektir. Fırçasız çalıştığı için yüksek devirlere çıkabilir. Günümüzde 100W-300 kW güçlerde ve 250 rpm -50000 rpm hızlar arasında SRM'ler üretilmektedir.

Bu avantajlarının yanı sıra dezavantajları da bulunmaktadır. Fazların uyarılması sıralaması için sensörler kullanılmalıdır. Stator endüktansının büyük olması anahtarlama anında sargı uçlarında büyü gerilimler oluşturur. Fazlar arası gecikme olursa moment dalgalanması sebebiyle gürültülü çalışma meydana gelebilir. Düşük hızlarda moment dalgalanması çok yüksektir. Çamaşır makinelerinde, nükleer santrallerin kontrol devrelerinde, hassas hareket için robotik uygulamalarda, otomotiv sanayisinde sıklıkla kullanılabilir (Yağcı ve Güven, 2009). Şekil 11'de yüksek hızlı bir SRM için tork ve hız grafiği verilmiştir (Besharati, Widmer, Atkinson, Pickert ve Washington, 2015).

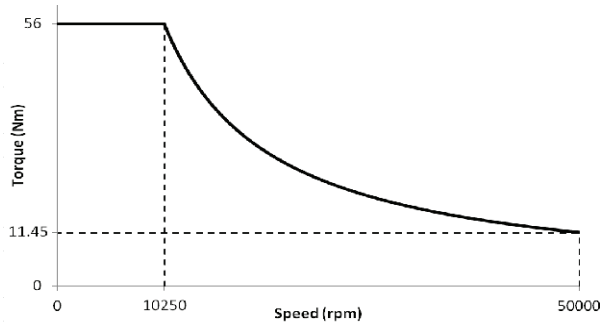


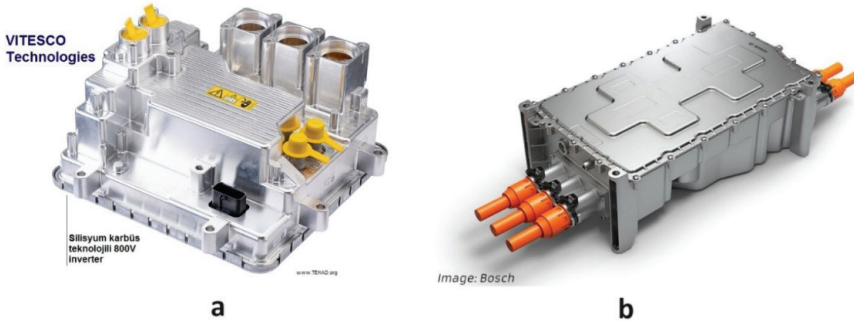
Fig. 1. Torque vs speed curve of proposed high-speed SRM.

Şekil 11. Yüksek hızlı SRM'a ait tork ve hız grafiği

7. İnvörtör ve konvertör

EA'larda elektrik enerjisini depolamak için DC ve piller kullanılır. Bu enerji DC motorlar kullanılan modellerde direk DC motorlarına hareket verebildiği gibi AC motor kullanılanlar da ise AC'a çevrilip araca hareket verebilir. Bunun yanı sıra sistem pilleri şarj ederken de AC'ı DC'a çevirerek kullanır ya da hızlı şarj istasyonlarındaki yüksek voltajlı DC akımı kullanır. Ayrıca EA'da kullanılan piller yüksek voltajlı DC depolarlar. Bununda araçtaki diğer alıcıları beslemesi için düşük voltaja çevrilmesi gerekmektedir. Bu işlemler EA kullanılırken sürekli devam eden bir dönüşüm olayıdır. Bu yüzden elektrikli araçlarda birkaç noktada invörtör ve konvertör kullanılabilir. DC-DC veya AC-AC çeviricilerine konvertör, DC-AC çeviricilerine de invörtör denilmektedir. . Şekil 12-a'da Hyunda-i'nin yeni çıkaracağı modellerde kullanacağı Vitesco firmasına ürettirdiği 800 V invörtör görülmektedir (TEHAD elektrikli ve hibrit araçlar derneği, 2021). Şekil 12-b'de ise Bosch'un yeni elektrikli araçlar için ürettiği silikon karbürlü invörtör görülmektedir (SAE international, 2021).

Şekillerden de anlaşıldığı gibi bu invörtörlerin soğutucu sıvı giriş ve çıkışları bulunmaktadır. Dolayısıyla invörtörlerin çalışma esnasında oldukça fazla sıcaklıkları artar ve performansları düşebileceği gibi zarar da görebilirler. Taşıt üzerinde onların soğutulabilmesi için ayrı bir soğutma sistemi bulunmalıdır.



Şekil 12. Bosch'un ürettiği EA'larda kullanılan invörtör

KAYNAKÇA

- Besharati, M., Widmer, J., Atkinson, G., Pickert, V. ve Washington, J. (2015). Super-high-speed switched reluctance motor for automotive traction. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. Montreal, Canada.
- Direnç.net (2021, Kasım 20). *DC ve AC Motorlar*. <https://blog.direnc.net/elektrik-motorlari-nedir-dc-ve-ac-motorlar/>
- Elektrik İstanbul (2023, Ekim 22). *Senkron Motorlar*. <https://www.electricistanbul.com/2023/10/22/senkron-motorlar/>
- Elektrikport.com (2016, 11 Ekim). Anahtarlamalı Manyetik Relüktans Motor. <https://www.elektrikport.com/makale-detay/anahtarlamali-manyetik-reluktans-motor/18630#ad-image-0>
- Fenercioğlu, A. ve Tarımer, İ. (2005). Anahtarlamalı relüktans motor tasarımlarında farklı rotor geometrilerinin motor güç ve tork üretimine etkilerinin incelenmesi. *BAÜ FBE Dergisi*, 10(1), 19-30.
- Hashemnia, N. ve Asaei, B. (2008). Comparative study of using different electric motors in the electric vehicles. *Proceedings of the International Conference on Electrical Machines, University of Tehran*. Tahran, İran.
- Hongyu magnet (t.y.). <https://tr.neodymium-mag.com/neodymium-magnets/motor-magnet/permanent-magnet-synchronous-motor-magnet.html/>
- Mega Mühendislik (2024, Ekim 17). *DC Motor Nedir? Çeşitleri Nelerdir? Nasıl Çalışır?* <https://www.megapl.com.tr/1-dc-motor-nedir-cesitleri-nelerdir/>
- Mega mühendislik (2022, Ekim 12). *Senkron Motor nedir nerelerde kullanılır?* <https://www.megapl.com.tr/1-senkron-motor-nedir-nerelerde-kullanilir/>
- Pang, D.C., Shi, Z.J., Xie, P.X., Huang, H.C. ve Bui, G.T. (2020). Investigation of an inset micro permanent magnet synchronous motor using soft magnetic composite material. *Energies*, 13, 4445.
- Rudnicki, T., Czerwinski, R., Polok, D. ve Sikora, A. (2015). Performance analysis of a pmsm drive with torque and speed control. *Proceedings of the 22nd International Conference "Mixed Design of Integrated Circuits and Systems*. Torun, Poland.
- SAE international (2021, 11 Ekim). <https://www.sae.org/news/2021/10/bosch-debuts-new-cv-specific-electric-motor-and-inverter>
- TEHAD elektrikli ve hibrit araçlar derneği (2021, 27 Nisan). <https://tehad.org/2021/04/27/hyundai-elektrikli-modelleri-icin-milyon-euroluk-inverter-siparisi/>
- Yağcı, M. ve Güven, M.E., (2009). Anahtarlamalı relüktans motorların hız kontrolündeki Titreşimlerin azaltılması. *Seçuk-Teknik Dergisi*, 8(3).