



Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi
Journal of Sustainable Engineering Applications and Technological Developments
2024, 7(2)

Editör: Dr. Öğretim Üyesi Hakan ÇAĞLAR

Aralık-2024 7(2)

ISSN: 2651-3544

İçindekiler

	Makale Adı		Makale Adı
1	İstanbul Kadıköy'deki Leed Sertifikalı Ofis Binalarının İç Mekân Çevre Kalitelerinin İncelenmesi Defne İşanç & Gözde Çakır Klasif	6	Use Of Aerogel In Brick Production: A Review Abudalrhman Aldakshe & Ahmet Celal Apay
2	Sediment Hareketinin Yoğun Olduğu Bir Kıyıda Bir Balıkçı Barınağının Tasarımı "Çarşamba Sayısal Modeli" Aslı Ülke Keskin & Mustafa Balcı	7	Enerji Sistemlerinde Metasezgisel Optimizasyon Teknikleri: Yenilikçi Algoritmalar ve Uygulama Alanları Mert Ökten
3	Siber-Biyosuç: Sentetik Biyoloji ve Geleceğin Suçları Fatma Altıntaş , Atakan Konukbay & Ahmet Koluman	8	Endüstriyel Ahşap Ürünlerin, Ahşap Hibrit Yapılarda Kullanımı Hüsna Al Adak & Ahmet Celal Apay
4	İnteraktif Mekân Kurgulu Akıllı Evlerin Hasta Bakımındaki Rolü Yağmur Söker & Fatma Ceyda Güney Yüksel	9	Derin Öğrenmeye Dayalı 2 Boyutlu İnsan Poz Tahmin Modellerinin Karşılaştırılması Cumhur Torun & Abdulkadir Karacı
5	Lityum İyon Bataryaları İçin Güvenlik Riskleri ve Çözüm Önerileri Murat Buldu , Serdar Altın & Fatih Bulut	10	Use of Granular Aerogel in Lightweight Blend Brick: On Thermal Properties and Compressive Strenght Arzu Çağlar

Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi uluslararası bilimsel hakemli bir dergidir.

Haziran ve Aralık Aylarında yılda 2 defa çevrimiçi olarak yayınlanır.

Taranmakta olunan indeks:



Baş Editör:

Dr. Öğretim Üyesi Hakan ÇAĞLAR

Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi

Editör:

Dr. Çağrı AVAN

Dr. Gökhan EKİNCİOĞLU

Dr. Şerife ÖZATA

Kastamonu Ölçme Değerlendirme Merkezi

Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi

Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi

Editör Kurulu:

Prof. Dr. Uğur ÖZCAN

Prof. Dr. Bahattin AYDINLI

Prof. Dr. Mustafa KURT

Prof. Dr. Hüseyin GÜNERHAN

Prof. Dr. Savaş CANBULAT

Prof. Dr. Serkan URANBEY

Prof. Dr. Yunus PAMUKOĞLU

Doç. Dr. Abdullah CANDAN

Doç. Dr. Ahmet BEYÇİOĞLU

Doç. Dr. Ali SAYGIN

Doç. Dr. Arzuhan Burcu GULTEKİN

Doç. Dr. Burak ARICAK

Doç. Dr. Cennet YAMAN

Doç. Dr. Gizem KARAKAN GÜNAYDIN

Doç. Dr. Gökhan SURUCU

Doç. Dr. Hüseyin Turan ARAT

Doç. Dr. Lenka KOURİMSKÁ

Doç. Dr. Arch. Milena Nanova

Doç. Dr. Arch. Panayot SAVOV

Doç. Dr. Arch. Sonia PARVANOVA-YONCHEVA

Doç. Dr. Selçuk Kürşat İŞLEYEN

Doç. Dr. Süleyman GÖKÇE

Doç. Dr. Yasin ERDOĞAN

Doç. Dr. Zeynel BAŞİBÜYÜK

Dr. Öğretim Üyesi Adem AHISKALI

Dr. Öğretim Üyesi Ali Kemal ÇAKIR

Dr. Öğretim Üyesi Asude ÇAVUŞ

Dr. Öğretim Üyesi Arzu ÇAĞLAR

Dr. Öğretim Üyesi Behçet DÜNDAR

Dr. Öğretim Üyesi Emin Sertaç ARI

Dr. Guang-jie Zhao

Dr. Öğretim Üyesi Melis ALPASLAN TAKAN

Dr. Mohamad Mazen HAMOUD-AGHA

Dr. Öğretim Üyesi Reza ABDİ

Dr. Öğretim Üyesi Tahir AKGÜL

Gazi Üniversitesi

Kastamonu Üniversitesi

Marmara Üniversitesi

Ege Üniversitesi

Kastamonu Üniversitesi

Ankara Üniversitesi

Süleyman Demirel Üniversitesi

Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi

Adana Bilim ve Teknoloji Üniversitesi

Gazi Üniversitesi

Gazi Üniversitesi

Bursa Teknik Üniversitesi

Yozgat Bozok Üniversitesi

Pamukkale Üniversitesi

Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi

Sinop Üniversitesi

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

University of Architecture Civil Eng. and Geodesy

University of Architecture Civil Eng. and Geodesy

University of Architecture Civil Eng. and Geodesy

Gazi Üniversitesi

Bayburt Üniversitesi

İskenderun Teknik Üniversitesi

Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi

Kastamonu Üniversitesi

Aydın Adnan Menderes Üniversitesi

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi

Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi

Beijing Forestry University

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Institute Polytechnique UnilaSalle

University of Bonab

Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Sediment Hareketinin Yoğun Olduğu Bir Kıyıda Bir Balıkçı Barınağının Tasarımı “Çarşamba Sayısal Modeli”

Design A Fishing Harbor On A Coast With İntense Sediment Movement “Çarşamba Numerical Model”

Aslı ÜLKE KESKİN^{1*}, Mustafa Balcı^{2*}

^{1*} Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye

ÖZET

Bu çalışmada sediment hareketinin yoğun olduğu bir kıyıda yöre balıkçılarının ihtiyaçlarını karşılayabilecek bir balıkçı barınağı tasarlamak ve sayısal modellemesini gerçekleştirmek amaçlanmıştır. Çalışma yeri olarak Samsun ili Çarşamba İlçesi seçilmiştir. Proje alanının batimetri haritası oluşturulduktan sonra mendirekleri, rıhtımları, geri sahası ve çekek yeri bulunan üç farklı balıkçı barınağı tasarlanmıştır. Bölgenin Rüzgâr ve Dalga İkliminin tespit edilebilmesi için derin deniz koşullarını sağlayan kıyıya en yakın ECMWF (Avrupa Orta Vadeli Hava Tahmin Merkezi, İngiltere) istasyonlarının verileri kullanılmıştır. Dalga transformasyonu, liman içi çalkantı, kumlanma, kirlilik, kıyıya etki konularının incelendiği Sayısal Modelleme çalışması Mike 21 programının ilgili modülleri kullanılarak yapılmıştır. Sonuç ve öneriler bölümünde Rüzgâr ve dalga iklimine bağlı olarak kıyı çizgisi değişim model sonuçlarının yorumlanması sağlanmış olup barınak girişi, basen ve giriş ağzında kumlanma problemi yaşanmayacağı, yakın kıyı çizgisinde mevcut haline göre 14 yıllık bir sürede önemli değişimler oluşmayacağı belirlenmiştir. Bu çalışmada, uzun yıllar boyunca kıyıya etkisi ve kumlanma sorunu en aza indirgenmiş bir balıkçı barınağının tasarlanması hedeflenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Barınak, Mike 21, Transformasyon, Kıyı, Karadeniz, Çarşamba

ABSTRACT

This study aims to design and perform the numerical modeling of a fishing harbor that can meet the needs of local fishermen in a coastal area with intense sediment movement. Samsun province, Çarşamba District, was chosen as the study area. After creating the bathymetric map of the project area, three different fishing harbors were designed, each including breakwaters, docks, backshore areas, and a boat launching area. To determine the Wind and Wave Climate of the region, data from the nearest ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, UK) stations providing deep-sea conditions were utilized. The Numerical Modeling study, which examines wave transformation, harbor agitation, sedimentation, pollution, and coastal impact, was conducted using relevant modules of the Mike 21 program. In the Results and Recommendations section, the interpretation of model results regarding changes in the coastline due to wind and wave climate is provided, indicating that sedimentation problems will not occur at the harbor entrance, basin, and entrance mouth, and significant changes are not expected in the near coastline within a 14-year period compared to the current state. This study aims to design a fishing harbor with minimized coastal impact and sedimentation issues over many years.

Keywords: Shelter, Mike 21, Transformasyon, Coast, Black Sea, Çarşamba

Başvuru: 02.06.2024 Revizyon Talebi: 21.07.2024 Kabul: 29.07.2024
Doi: 10.51764/smutgd.1494394

^{1*} Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye; E-mail: asli.ulke@omu.edu.tr; ORCID: 0000-0002-9676-8377

^{2*} Sorumlu Yazar: Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği, Samsun, Türkiye; E-mail: mustafabalci55@hotmail.com; ORCID: 0009-0000-6132-4306

1. GİRİŞ

Dünya kara alanının %10'u civarında bir kısmını kaplayan kıyılar; toplam nüfusun %50' sine yakınına barındırmakta ve yoğun baskı altında olan alanlardır. Kıyı alanları, doğal bir kaynak olarak insanlığa yerleşim, ulaşım, ticaret, endüstri, tarım, atık depolama ve bertaraf, hammadde temini, savunma, rekreasyon, turizm, sağlık, enerji, balıkçılık ve spor amaçlı etkinlikler gibi insanlığa ekonomik ve sosyal hizmet veren ekolojik sistemlerdir (Eruz ve Erol, 2018). Balıkçılık, iç su ve deniz kaynaklarında doğal olarak bulunan canlılardan ekonomik olarak yararlanma şekli olup, insan ve suyun bulunduğu her yörede ve bölgede yapılabilmektedir. Ülkemizin özellikle Karadeniz Bölgesinde balıkçılık önemli bir geçim kaynağıdır. Balıkçılar, avlanma ve üretim yapabilmeleri için bir barınağa ihtiyaç duymaktadırlar. Balıkçı barınakları, balıkçı teknelerinin sektörün üretim alanı olan denizlere veya iç sulara açılmasını sağlayan, ürünün karaya ulaşması, taşınması ve pazarlanması hizmetlerinin yanı sıra bakım-onarım gibi işlemlerin yapılması açısından önemli kıyı yapılarıdır (Kırkses ve Samsun, 2020).

Karadeniz Bölgesinde balıkçıların kullanabilmesi için son yıllarda sayıları artarak devam eden birçok balıkçı barınağı inşa edilmiştir. Ancak bu barınaklar, sayı ve konum olarak sektörün ihtiyacını karşılamaya yetmemektedir. Ayrıca inşa edilen barınaklarda kumlanma, kirlilik, çalkantı sorunları yaşanmakta ve barınaklar kıyı boyu sediment taşınımını etkilemektedir. Kara ile denizin birleştiği kıyı bölgesine deniz ve rüzgâr hareketlerinden kaynaklanan akımlar sonucunda doğal Sediment taşınımı meydana gelmekte olup kıyı coğrafyasında kıyının aşınması (erozyon) veya sığlaşması gibi değişimler görülebilmektedir (Süme ve Yüksek, 2017). Bunun yanında Çarşamba Delta Ovası gibi kıyılar genel olarak yükselti ve eğimi düşük, çevreyle ilgili etkileşim açısından kırılğan alanlardır (Kılar ve Çiçek, 2019).

T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü (AYGM) tarafından hazırlanan Kıyı Yapıları Planlama ve Tasarım Teknik Esaslarında (Yüksel vd, 2016); gel-git, meteorolojik veriler, dalga kabarması/alçalması, rüzgâr kabarması/alçalması, kısa ve uzun dönemli su seviyesi değişimleri gibi parametrelerin ölçülebilir olması değerlidir (Güler, Tarakçıoğlu ve Baykal, 2020). Bunların içinde; uzun dönem dalga verileri, şamandıra ve uydu gözlemleri, ampirik yöntemler, spektral dalga modellemesi ve fiziksel modellemeler ile belirlenebilmektedir. Bu veriler, deniz yapılarının tasarımı ve planlanması, kıyı erozyonu belirleme ve geliştirme çalışmaları için daha güvenilir dalga yükseklikleri belirlenebilmesine yardımcı olması ile birlikte dalga ikliminin tahminine olanak vermektedir (Tahtacı ve Ayat, 2022). Ortadoğu Teknik Üniversitesi tarafından geliştirilen Türkiye Kıyıları Rüzgâr ve Derin Deniz Dalga Atlası tahmin sonuçlarının da değerlendirilebildiği önemli veri setlerini ihtiva etmektedir (Özhan ve Abdala, 2002).

Sediment hareketinin yoğun olduğu bölgeler dâhil kıyıda yapılacak olan kıyı yapılarının denizin ve malzeme taşınım olayları ile etkilerini incelemek amacıyla çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Bunlar fiziksel ve sayısal modeller olmak üzere iki grupta incelenebilir. Fiziksel modeller, çalışma yapılacak olan kıyı bölgesinin laboratuvar ortamında ölçeklendirilmiş modelinin yapılarak, çeşitli dalga parametreleri altında davranışını incelemek amacıyla yapılmaktadır. Fiziksel modeller hem kurulması maliyet ve zaman açısından tercih edilmemekle hem de sınır koşullarının laboratuvar ortamındaki gibi sağlanamaması nedeniyle sağlıklı sonuçlar verememektedir. Bu aşamada, sediman ve diğer madde taşınımları, çalkantı analizleri, kıyı koruma ve barınak yapıları gibi tasarımların başarısı, yakın kıyıda rüzgâr, dalga, kıyı hidrodinamiğinin hususların kavranmasına ve tahminine bağlıdır. Bilişim ve Teknolojinin gelişmesi sonucu sayısal modeller önemli birer tahmin aracı olarak kullanılmaktadır (Yılmaz, 2018,).

Ülkemizde, uzun süreli ölçülmüş dalga yüksekliği verileri bulunmadığı için, sayısal modeller yardımıyla uzun süreli ölçülmüş rüzgâr hızlarından, rüzgârın etkisiyle oluşan dalga yükseklikleri tahmin edilebilmektedir. Derin denizde oluşan bu dalga yükseklikleri kıyıya kadar taşınabilmekte, kıyı yapıları ile dalga etkileşimleri, çalkantılar, rüzgâr ve kırılan dalgalar etkisiyle oluşan akıntılar, kıyı boyu sediment taşınım miktarları, kıyı çizgisi değişimleri, sayısal modeller yardımıyla başarı ile tahmin edilebilmektedir. Denizlerde yapılacak her yapay girişimden önce sonuçlarını işin yapım süresinden daha uzun zaman irdelemek daha sağlıklı olacaktır. Kıyılarıdaki yapılaşma sonucu plajlarda küçülme ve yok olma gibi olumsuzlukların yaşanması istenmeyen bir durumdur (Apaydın ve Durmaz, 2020).

Ayrıca bu çalışmada da kullanılan; limanlarda ve iskelelerde dalga dinamiklerini analiz etmek, kısa periyotlardan uzun periyotlara kadar çeşitli dalga koşullarını simüle etmek için özel olarak tasarlanan MİKE 21 BW (Dalga dinamiği modellemesi) çalkantı koşulları için güvenilir sonuçlar vermektedir. Bunun yanında yine DHI tarafından geliştirilen spektral rüzgâr-dalga modeli olan MİKE 21 SW; açık deniz ve kıyı bölgelerinde rüzgâr tarafından oluşturulan dalgaların ve swell'lerin (düşük frekanslı ve uzun periyotlu dalgalar) büyümesini, azalmasını ve dönüşümünü simüle etmektedir. MIKE 21 SW, tam spektral ve yönsel ayrık parametrik olmak üzere iki farklı formülasyonu içerir. Tam spektral formülasyon, dalga hareketi koruma denkleminde temellendirilmiştir. Yönsel

ayrık parametrik formülasyon ise dalga hareketi spektrumunun sıfırncı ve birinci anı ile parametrize edilmesine dayanır. Bu parametrisasyon frekans alanında yapılmış olup temel koruma denklemleri küçük ölçekli uygulamalar için dikdörtgen koordinatlar ve büyük ölçekli uygulamalar için polar küresel koordinatlar ile formüle edilmiştir. Tam spektral model; rüzgâr etkisiyle dalga büyümesi, doğrusal olmayan dalga-dalga etkileşimi, beyaz köpük oluşumu, dip sürtünmesi ve derinlik kaynaklı dalga kırılması nedeniyle kayıplar, derinlik varyasyonlarından kaynaklanan kırılma ve sahil etkisi, dalga-akım etkileşimi, zamanla değişen su derinliği etkisi, dalga alanı üzerinde buz örtüsünün etkisi gibi fiziksel olayları içermektedir. Yönetim denkleminin coğrafi ve spektral uzayda discretizasyonu (matematiksel veya bilimsel hesaplama yöntemlerinde sürekli bir alanın veya sürecin belli aralıklarla bölünmesi işlemi) hücre merkezli sonlu hacim yöntemi kullanılarak gerçekleştirilir. Coğrafi uzayda yapısal olmayan ağ tekniği kullanılır. Zaman entegrasyonu, dalga hareketinin yayılması için çoklu sıra açık yöntemi uygulayan kesirli adım yaklaşımı ile gerçekleştirilir.

Bu çalışma alanı, Samsun ili, Çarşamba İlçesi sınırlarında, Yeşilirmak deltasında belirlenmiştir. Yöre balıkçıların barınabileceği barınak tasarımında barınağın kıyıya olumsuz etkileri en az olacak şekilde yapılabilmesi amacı ile seçilen bölgede rüzgâr iklimi, dalga iklimi, rüzgâr ve dalga etkenli kıyusal akıntılar ve taşınım olayları, askıda katı madde taşınımı, kıyıda sediment taşınımı, dalga ilerlemesi, kıyı çizgisi değişimi/etkileşimi belirleme çalışmaları yürütülmüştür.

2. MATERYAL VE METOT

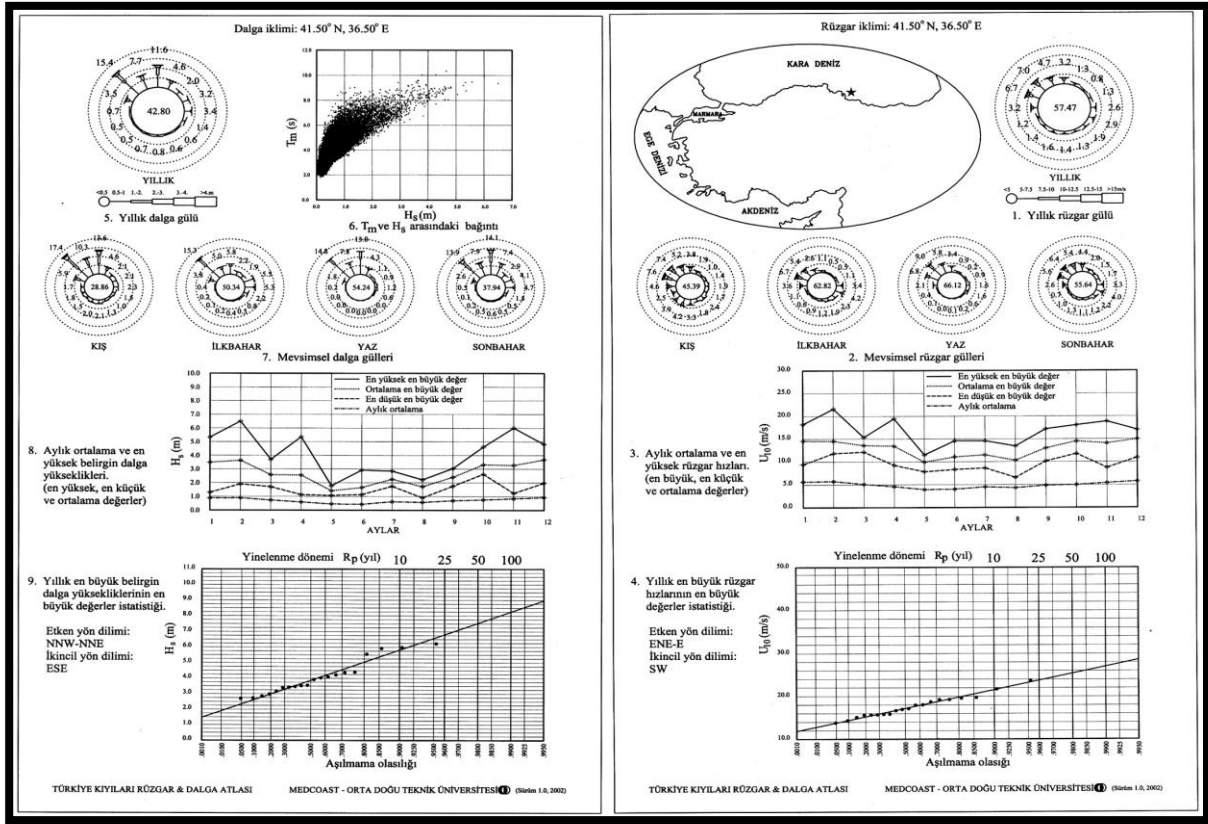
Çalışma kapsamında balıkçı barınağı tasarımı öncesi ihtiyaç duyulan veriler elde edilmiştir. Öncelikle çalışma alanının topoğrafyasını ortaya çıkarmak amacıyla Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (GNSS) ile kıyı çizgisi ölçümü gerçekleştirilmiştir. Daha sonra deniz tabanına ilişkin bilgiler elde etmek için bölgede batimetri çalışması yapılmıştır. Batimetri; okyanus, deniz, göl gibi su ortamlarının derinliğini belirlemek için yapılan bir ölçme faaliyetidir. Batimetri çalışmalarında ip iskandil, çubuk iskandil gibi klasik yöntemler ve sonar sistem, uzaktan algılama, lidar gibi modern yöntemler kullanılmaktadır.

Çalışmada batimetri yöntemi olarak sonar kullanılmıştır. SONAR (Echosounder), ses dalgalarının su içerisinde yayılma ve yansıma özellikleri kullanılarak derinlik ölçme yöntemidir. Bu yöntemde, transducer'dan üretilen sesin, deniz tabanına ulaşip geri dönmesi arasında geçen süre ölçülerek derinlik bilgisi dolaylı olarak elde edilmiş olur. Sesin tabana ulaşip geri dönmesi arasındaki geçen süre, sesin ortamdaki yayılma hızına bağlıdır. Ses hızı ve sesin suda yol aldığı süre kullanılarak transducer'dan deniz tabanına olan derinlik hesaplanır (USACE, 2013). Batimetri çalışmasında öncelikle sesin bölgedeki deniz içerisinde yayılma hızı tespiti için ses hızı ölçüm cihazı kullanılmış olup sesin su içerisinde yayılma hızı 1492 m/s olarak tespit edilmiştir. Sonrasında bu ses hızı değeri echosounder sistemindeki ölçüm bilgisayarına girilmiş ardından batimetri ölçümleri yapılmıştır. Ölçüm sonrası bölgeye ait kıyı çizgisi ve batimetri değerleri **Şekil 1**'de yer almaktadır.



Şekil 1. Çalışma alanına ait kıyı çizgisi ve batimetri

Batimetri ve kıyı çizgisi çalışmaları sonrasında derin deniz dalga ve rüzgâr iklimi verileri European Centre for Medium-Range Weather Forecasts ECMWF (Avrupa Orta Vadeli Hava Tahminleri Merkezi) ve Türkiye Kıyıları Rüzgâr ve Derin Deniz Dalga Atlasından temin edilmiştir. Şekil 2’de Türkiye Kıyıları Rüzgâr ve Derin Deniz Dalga Atlasında söz konusu bölge için 41,50°K, 36,50°D koordinatlarında belirlenen rüzgâr ve dalga iklimi yer almaktadır.



Şekil 2. Çalışma alanına ait dalga ve rüzgâr iklimi

Tasarım çalışmalarında ihtiyaç duyulan kıyı çizgisi, batimetri, dalga ve rüzgâr verileri toplandıktan sonra balıkçı barınağı tasarımına geçilmiştir. Tasarım aşamasında 2B model oluşturma imkânı veren Autodesk Autocad 2016 çizim programı kullanılarak 3 ayrı alternatif barınak çalışılmıştır.

2.1 Tasarım Balıkçı Barınağı 1

Kıyından 400 m uzaklıkta, 700m uzunluğunda ana ve tali mendirek, 320m uzunluğunda -5m yanaşma derinlikli rıhtım, 320m uzunluğunda -4m yanaşma derinlikli rıhtım, 270 m uzunluğunda -3m yanaşma derinlikli rıhtım, 20 m uzunluğunda çekek yeri, 13.300 m² geri şaha ve çalkantıyı önlemek adına basen içerisinde 150m uzunluğunda dalgakıran ayrıca dalgakıran üzerinde konumlanan rıhtım ve işletme binasından oluşan bir barınak tasarlanmıştır. Şekil 3’de 1 nolu tasarım yer almaktadır.



Şekil 3. Tasarım Balıkçı Barınağı-1

2.2 Tasarım Balıkçı Barınağı 2

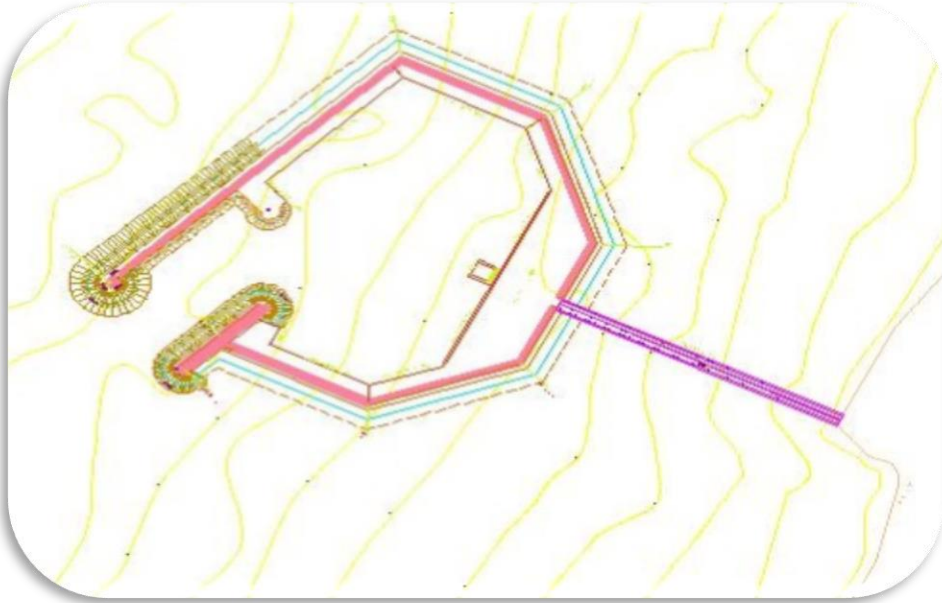
Kıydan 400 m uzaklıkta, 690m uzunluğunda ana mendirek, 390m uzunluğunda tali mendirek, 100m uzunluğunda -5m yanaşma derinlikli rıhtım, 150m uzunluğunda -4m yanaşma derinlikli rıhtım, 100 m uzunluğunda çekek yeri ve 11.500 m² geri sahadan oluşan bir barınak tasarlanmıştır. Şekil 4’de 2 nolu tasarım yer almaktadır.



Şekil 4. Tasarım Balıkçı Barınağı-2

2.3 Tasarım Balıkçı Barınağı 3

Kıydan 400 m uzaklıkta, 1058m uzunluğunda ana mendirek, 600m uzunluğunda tali mendirek, ana ve tali mendireğe bağlı 40m uzunluğunda iki adet kum tutucu mahmuz, 280m uzunluğunda -5m yanaşma derinlikli rıhtım, 345m uzunluğunda -4m yanaşma derinlikli rıhtım, 470 m uzunluğunda -3m yanaşma derinlikli rıhtım, 20m uzunluğunda çekek yeri, 20.000 m² geri sahadan oluşan bir barınak tasarlanmıştır. Şekil 5'de 3 nolu tasarım yer almaktadır.



Şekil 5. Tasarım Balıkçı Barınağı-3

2.4. Tasarımların Karşılaştırılması

Her bir alternatife ait fiziksel özellikler tablo 1'de verilmektedir.

	Tasarım-1	Tasarım-2	Tasarım-3
Ana Mendirek	700m	690m	1058m
Tali mendirek	700m	390m	600m
-5m derinlikli Rıhtım	320m	100m	280m
-4m derinlikli Rıhtım	320m	150m	345m
-3m derinlikli Rıhtım	270m	-	470m
Çekek Yeri	20m	100m	20m
Geri Saha	13.300 m ²	11.500 m ²	20.000 m ²
Mahmuz	-	-	80m
Dalgakıran	150m	-	-
İskele	400m	-	400m

Tablo 1. Tasarlanan barınakların karşılaştırılması

Balıkçı Barınakları Yönetmeliği ise her türlü balıkçı gemilerine hizmet vermek maksadı ile mendireklerle korunmuş, yeterli havuz ve geri saha ile barınacak gemilerin manevra yapabilecekleri su alanı ve derinliğe sahip, yükleme, boşaltma, bağlama rıhtımları ile suyu, elektriği, ağ kurtarma sahası, satış yeri, idare binası, ön soğutma ve çekek yeri bulunan, büyüklüğüne ve sağladığı imkanlara göre balıkçı limanı, barınma yeri veya çekek yeri olarak

adlandırılan kıyı yapılarına genel olarak balıkçı barınağı tanımını yapmaktadır. Bu haliyle oluşturulan tasarımlar balıkçı barınağında bulunması gereken özelliklere haizdir. Fakat sayısal modellemede 1 alternatif üzerinde detaylı analizler yürütülecek olmasından dolayı; Korunan su sahası geniş olan, amatör balıkçı teknelerinden gırgır tipindeki gemilere kadar her türlü balıkçı teknesine hizmet verecek kapasitede, basen içi daraltılmamış, kıyıda iskele bağlantısı bulunan Tasarım Balıkçı Barınağı 3 üzerinden sayısal modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

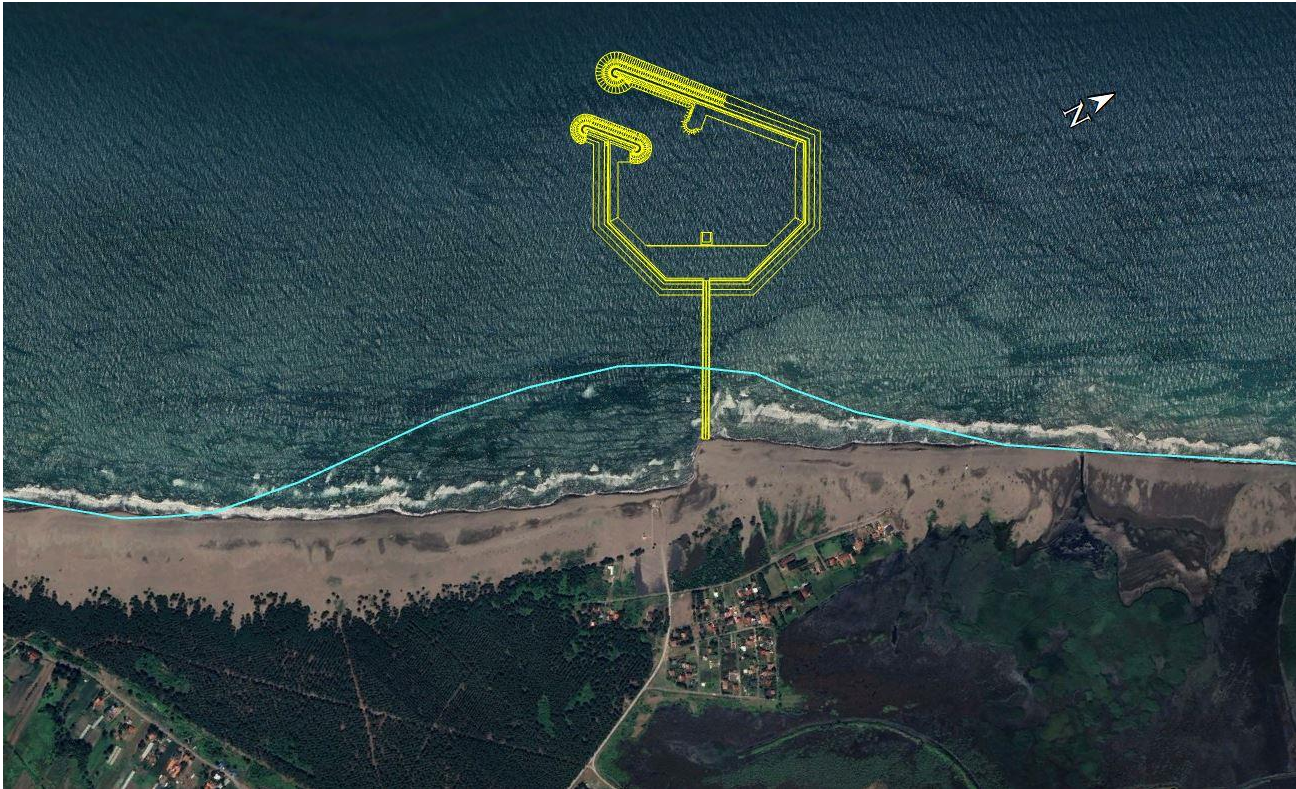
Çalışma yapılan sahada Google Earth üzerinden 20 farklı tarih incelenmiş, görüntüsü kendi içinde kayık olmayan iki tarih (07.09.2018 ve 08.07.2023 tarihleri) belirlenerek kalibrasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. ECMWF' nin 01.01.2010 ile 31.12.2023 tarihleri arasındaki Rüzgar ve Dalga verileri temsili kıyı çizgisi üzerine uygulanmış ve 14 yıl sonrasına projeksiyon tutulmuştur. Mevcut haliyle kıyıda 35metreyi bulan kıyı erozyonlarının olabileceği belirlenmiştir. Geleneksel Balıkçı Barınak tiplerinden Tasarım 2 üzerinde gerçekleştirilen sayısal modellemede kıyıda 360m 'yi bulan erozyon, 390m'yi bulan birikme meydana gelmektedir. 3 nolu tasarım barınağında ise barınak bir açık deniz dalgakıranı gibi etki göstermiş olup muska oluşumuna benzer bir etki meydana getirmiştir.



Şekil 6. Mevcut Durumda 14 yıl Sonraki Kıyı Çizgisi

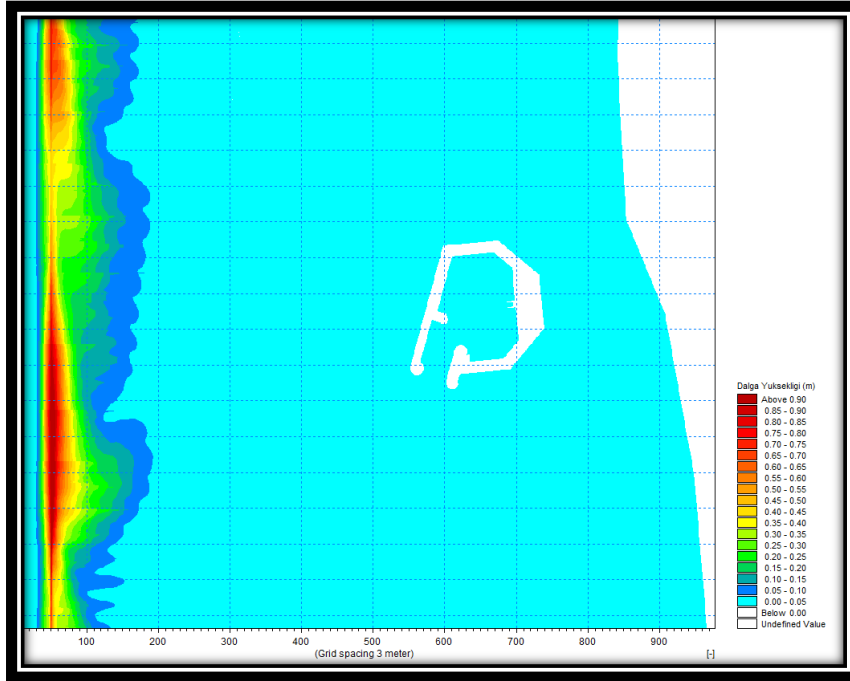


Şekil 7. Tasarım 2 uygulanırsa 14 yıl Sonraki Kıyı Çizgisi- 360m Erozyon ve 390m Birikim

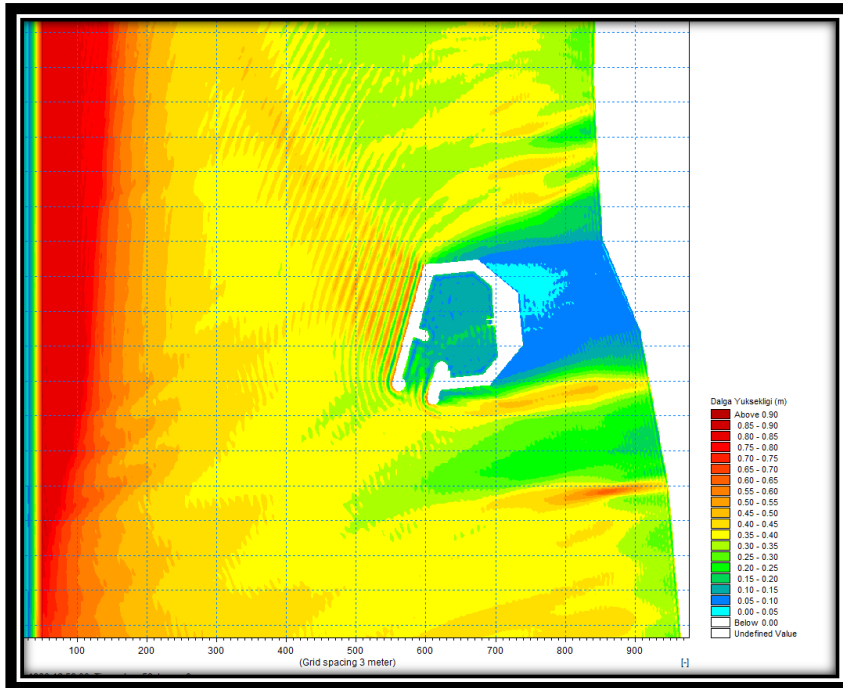


Şekil 8. Tasarım 3 uygulanırsa 14 yıl Sonraki Kıyı Çizgisi –Muska Oluşumu

Çalkantı durumunda yılda 1 kez 9 saat aşılma olasılıklı dalga log-lineer analiz yöntemiyle belirlenmektedir. Çalkantı için batı yönlü dalgaların başlangıç ve bitiş durumlarını gösterir grafiklerde ritim önlerinde 30 cm i aşmayan dalga durumları gösterilmektedir.



Şekil 9. Batı Yönlü Dalga Başlangıç Durumu



Şekil 10. Batı Yönlü Dalga Son Durumu

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bahse konu çalışma kapsamında sediment hareketinin yoğun olduğu bir kıyıda alternatif Bir Balıkçı Barınağı ve kıyıya etkilerinin analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

- Korunan su sahası geniş olan, amatör balıkçı teknesinden gırgır tipindeki gemilere kadar her türlü balıkçı teknesine hizmet verecek kapasitede, basen içi daraltılmamış, kıyıda iskele bağlantısı bulunan Tasarım Balıkçı Barınağı 3 üzerinden sayısal modelleme çalışmaları detaylandırılmıştır.
- Mevcut haliyle hiç yapı yapılmadan kıyıda 35metreyi bulan erozyonlarının olabileceği belirlenmiştir.
- Geleneksel Balıkçı Barınak tiplerinden Tasarım 2 üzerinde gerçekleştirilen sayısal modellemede kıyıda 360m 'yi bulan erozyon, 390m'yi bulan birikme meydana gelmektedir.

- Korunan su sahası geniş olan, amatör balıkçı teknesinden gırgır tipindeki gemilere kadar her türlü balıkçı teknesine hizmet verecek kapasitede, basen içi daraltılmamış, kıyıda iskele bağlantısı bulunan Tasarım Balıkçı Barınağı 3 üzerinden sayısal modelleme çalışmaları detaylandırılmıştır.
- Kıyıdan iskele ile 400m açığa taşınmış olan 3 nolu tasarım barınak; 14 yıl sonra bir dalgakıran gibi etki göstermiş olup kıyıda muska oluşumuna benzer bir şekil meydana getirmiştir.
- Delta alanlarında ve sediment hareketinin yoğun olduğu bölgelerde kıyıdan kapama derinliğine kadar uzaklaşarak Barınak tasarılmanın bir alternatif olarak değerlendirilebileceği görülmektedir.
- Rüzgâr hızı olarak kuzey yönü ile 12 derece açı yapacak şekilde kuzey-kuzeydoğu yönlü 2021 yılında 17,08m/s olarak ölçülmüştür. Veri üretilen dönem için 1999-2023 arası belirgin dalga yükseklikleri 65cm ile 4,15m arasında değişmektedir.

Teşekkür

Hali hazır ve batimetri haritası hazırlanması konularındaki desteğinden dolayı Harita Yüksek Mühendisi Eray Yılmaz'a, sayısal modelleme konularında bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan sayın Dr. Olcay Eğriboyun'a teşekkür ederim.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Yazar Katkısı Beyanı

Yazar-1: Revize, Verilerin Düzenlenmesi, Metot Oluşturma, Sonuç ve Tartışma

Yazar-2: Fikir, Orijinal Taslak Oluşturma, Yazım, Revize, Metot Oluşturma, Verilerin Düzenlenmesi, Sonuç ve Tartışma

KAYNAKLAR

- Erüz C., Erol S. (2018). "Turkish Studies Volume 13/10." *Balıkçı Barınaklarının Deniz Turizmi İçin Kullanılabilirliği: Trabzon Örneği*, 291-302.
- Tokmak Kırkses N., Samsun S. (2020). "Turkish Journal of Maritime and Marine Sciences." *Giresun ili Balıkçılık Kıyı Yapıları*, 42-50.
- Süme, V., Yüksek, Ö. (2017). "Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University." *Doğu Karadeniz kıyılarında balıkçılık kıyı yapılarının sığlaşmasının incelenmesi*, 843-852.
- Kılar, H., Çiçek, İ. (2019). "Turkish Journal of Geographical Sciences." *Kıyı Çizgisinin Gelecekteki Konumunun Belirlenmesinin Önemi: Göksu Deltası Örneği, Mersin (Türkiye)*, 193-216.
- YÜKSEL, Y., Ergin, A., ÇEVİK, E., Yalçın, A. C., Güler, I., YÜZER, N., ... AYAT, B.(2016). "Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü", *Kıyı Yapıları Planlama Ve Tasarım Teknik Esaslar*, 58-64.
- Güler, H. G., Tarakçıoğlu, G.Ö., Baykal, C. (2020). "Teknik Dergi" *Ortalama Su Seviyesi Değişimlerinin Taş Dolgu Kıyı Koruma Yapılarının Tasarımına ve Performansına Etkisi*, 9941-9966, Yazı 574.
- Tahtacı, K., Ayat, B. (2021). "Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University." *Karadeniz'in fırtınalığındaki uzun dönemli (1979-2019) değişimler*, 2147-2162
- Özhan E., Abdalla S. (2002). "Kıyı Alanları Yönetimi Türk Milli Komitesi/MEDCOAST, Orta Doğu Teknik Üniversitesi", *Türkiye Kıyıları Rüzgar ve Derin Deniz Dalga Atlası*,
- Yılmaz, N. (2017). "Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University." *Samsun Körfezi kıyı sularında rüzgar iklimi, dalga iklimi ve akıntı düzeni modellenmesi*, 279-297.
- Apaydın, A., Durmaz, M. (2020). "Journal of Engineering Sciences and Design." *Giresun-Piraziz Arasında Karadeniz Sahil Yoluna Bağlı Kıyı Çizgisi Değişimi ve Güncel Plaj Oluşumları*, 150-166.
- USACE, (2013), "Engineer Manuel Chapter 4, U.S. Army Corps of Engineers Washington", *Engineering and design hydrographic surveying*, 4.1-4.3.

Lityum İyon Bataryaları İçin Güvenlik Riskleri ve Çözüm Önerileri

Safety Risks and Solution Recommendations for Lithium Ion Batteries

Murat Buldu*¹, Serdar Altın², Fatih Bulut²

¹ Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Doktora Programı, İnönü Üniversitesi, Malatya, Türkiye

² Fizik Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnönü Üniversitesi, Malatya, Türkiye

ÖZET

Bu çalışmada lityum iyon bataryalarda gerçekleşen arıza türleri ve nedenleri incelenerek olumsuz koşulları ortadan kaldıracak veya etkilerini azaltacak çözüm önerileri sunulmuştur. Buna göre bataryanın harici arızaları mekanik, elektriksel ve termal olarak kategorize edilerek bu arızaların birbiriyle olan ilişkileri üzerinde durulmuştur. Daha sonra arızaların büyüyen oluşumuna sebep olduğu termal kaçak durumu ve bu durumun sonuçları incelenmiştir. Yine raporlanan batarya kaynaklı elektrikli araç kazalarının verileri ışığında arızaların tehlike boyutları ele alınmıştır. Ayrıca bu arızalara karşı geliştirilen yeni nesil önleyici tedbirlerin literatürdeki son haline değinilmiştir

Anahtar Kelimeler: Lityum iyon, batarya, elektrikli araç, termal kaçak

ABSTRACT

In this study, the types and causes of failures in lithium-ion batteries are examined and solution suggestions are presented to eliminate the negative conditions or reduce their effects. Accordingly, external faults of the battery are categorized as mechanical, electrical and thermal, and the relationships between these faults are emphasized. Then, the thermal runaway situation that the faults cause to grow and the consequences of this situation were examined. Again, in the light of the reported data on battery-related electric vehicle accidents, the danger dimensions of the malfunctions are discussed. In addition, the latest version of the new generation preventive measures developed against these malfunctions in the literature is mentioned.

Keywords: Lithium ion, battery, electric vehicle, thermal runaway

Başvuru: 07.07.2024 Son Revizyon: 03.09.2023 Kabul: 02.10.2024

Doi: 10.51764/smutgd.1511977

1*Sorumlu yazar: İnönü Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Malatya, Türkiye; E-mail: muratbuldu44@gmail.com; ORCID: 0009-0004-8005-1007

2 E-mail serdar.altin@inonu.edu.tr; ORCID: 0000-0002-4590-907X

3 E-mail: fatih.bulut@inonu.edu.tr; ORCID: :0000-0001-6603-2468

1. GİRİŞ

Günümüzde otomotiv sektörü; içten yanmalı ve fosil yakıtla çalışan motorların yerine elektrikli araçlar ve sıfır emisyonlu araçların kullanılmasını popüler hale getirerek çevresel negatif etkileri ve fosil yakıtlardaki kaynak sorunundan etkilenme problemlerini çözmeye çalışmaktadır (Tran vd.,2021;Cunanan vd.,2021) . Bu yönde yapılan çalışmalarda mevcut durumda elektrikli araç yapılarını Lityum-iyon batarya (LİB) yapıları oluşturmaktadır. Bunun nedeni çevrim sayısındaki uzun ömür, kendiliğinden deşarj olma durumunun düşük oranı, hafifliği, hızlı şarj yetenekleri ve geniş sıcaklık çalışma aralığı gibi yapısal özelliklerdir (Sun vd.,2020;Pfrang vd.,2017). Tüm bu sebepler ile ortaya koyulan son verilerde LİB sistemlerini bataryalı elektrikli cihazlar ve hibrit elektrikli araçların popülaritesinin Avrupa, Amerika ve Çin piyasasında önemli ölçüde artmaktadır (Spotnitz ve Franklin.,2003;Bandhauer vd.,2011).

Otomotiv sektörünün kronolojik olarak ilk ciddi LİB teknolojisiyle ilgili gelişmelerinden birisi Çin'de taksi olarak kullanılan BYD e6 serisinin bataryalarıdır. Bu seri yapısında Lityum demir fosfat (LiFePO_4) kompozisyonunu kullanmıştır (Wang vd.,2006). İlerleyen süreçlerde bataryalar farklı kompozisyonların varyasyonlarıyla otomotiv sektöründe yer bulduğu görülmektedir. Mevcut elektrikli araçlar içerisinde NMC 111, NMC 333, NMC 523, NMC 622, NMC 811 ve NCA katot malzemelerinden oluşan batarya sistemleri tercih edilmektedir (Pedro L. -2020). Burada isimlendirme $\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z)\text{O}_2$ katot malzemesinde NMC genel ismi diğer üç rakam ise Ni, Mn ve Co oranlarını göstermektedir. Örnek olarak NMC 622, $\text{Li}(\text{Ni}_{0,6}\text{Mn}_{0,2}\text{Co}_{0,2})\text{O}_2$ kompozisyonunu temsil etmektedir.

Lityum iyon bataryalar fosil yakıtlara alternatif olma yolunda ilerlerken batarya arızaları bu sektör için aşılması gereken önemli bir sorun haline geldi. Bu bağlamda yapılan çalışmalarda EV Fire Safe verilerine göre 2010 ile 2024 Haziran ayı dönemlerinde 511 raporlanmış elektrikli araç batarya yangını gözlenmiştir (EV Fire Battery Data 2024).

Bu çalışma kapsamında lityum iyon bataryalarının arıza türlerini harici arızalar ve batarya kazaları olarak iki ana başlıkta ele alarak bu arızaların birbirleriyle olan tetikleyici ilişkilerini ve bu arızalara dair çözüm önerilerini inceleyeceğiz. Buna göre harici arızalar; bataryanın dışarıdan yaşadığı fiziksel arızalardır ki bunları mekanik, termal ve elektriksel arızalar olarak nitelendirebiliriz. Bunun yanında harici arızalardan veya batarya içi koşullardan kaynaklanan batarya kazaları söz konusudur. Bu kazalar Şekil 1 içerisinde şema haline getirilmiştir.



Şekil 1. Termal kaçak sürecine giren lityum iyon batarya arızasının aşamalarının detaylı şematik hali

Şekil 1 ile batarya arızalarının aşamalarını ve bu aşamaların birbirleriyle olan ilişkilerini görmekteyiz. Buna göre mekanik arızalar sonucunda ortaya elektriksel ve termal arızalar çıkar ki bunun sonucunda patlama ve yanma gibi ciddi sonuçların olduğu termal kaçak durumu ortaya çıkabilmektedir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1 Mekanik Arızalar

Mekanik arızalar bataryanın dışarıdan aldığı darbelerin sonucunda ortaya çıkar. Genellikle araç çarpışmaları ile ortaya çıkan bu arızalar sonucunda bataryada deformasyon, ezilme ve delinme gibi durumlar oluşur.

2.1.1 Çarpışma ve Ezilme

Araç çarpışmaları esnasında batarya deformasyonlarına oldukça sık rastlanır. Bu esnada elektrikli araçtaki batarya paketinin yerleşimi, batarya paketinin çarpışma karşısındaki davranışını etkiler (Zhang vd.,2017) Batarya paketinin deformasyonu tehlikeli sonuçlara yol açabilir. Bu sonuçların ilki membran yırtılır ve dahili kısa devre (ISC) meydana gelir ikincisi ise yanıcı elektrolit sızar ve potansiyel olarak yangına neden olur.

Batarya paketinin ezilme davranışının incelenmesi için birçok araştırma malzeme düzeyinden hücre düzeyine ve paket düzeyine kadar çok ölçekli yapılmalıdır. Buna göre hücrelerin ezilmelerine dair mekanik testler tasarlanarak çalışmalar yapıldı (Sahraei vd.,2012; Greve ve Fehrenbach,2012; Lai vd.,2014; Ali vd.,2015; Sahraei vd.,2014; Xia vd.,2014).

2.1.2 Penetrasyon

Penetrasyon, araç çarpışması sırasında meydana gelebilecek diğer bir yaygın olaydır. Buna göre çivi penetrasyonunun bataryada oluşturduğu tahribat bataryayı elektrikselsel ve termal arıza sürecine sürükler. Ezilme koşullarıyla karşılaştırıldığında şiddetli ISC, delme başladığında anında tetiklenebilir. Böyle bir durumda mekanik tahribat ve elektrikselsel kısa devre aynı anda meydana gelir ve bu basit mekanik veya elektrikselsel kötüye kullanımdan daha şiddetli sonuçları olabilmektedir. Bu olumsuz durumlardan dolayı çivi penetrasyonuna dair araştırmalar ve testler literatürde geniş bir şekilde yer almaktadır.

Bu yönde yapılan araştırmalarda penetrasyonun neden olduğu ISC'nin boşalma hızını araştırılmış ve 60 saniye içerisinde %70'e kadar enerjinin yoğun bir şekilde salındığını ve bunun da kayda değer sıcaklık artışına yol açtığı görülmüştür (Maleki ve Howard.,2009). Penetrasyon sırasındaki termal tehlike çivinin konumundan etkilenebilir. Isı dağılımının yetersiz olduğu elektrotun kenarından nüfuz edilmesi daha tehlikeli olacaktır.

Ayrıca Comsol Multiphysics® programı kullanarak prizmatik bir hücrenin nüfuz etme süreci üzerine bir 2 boyutlu model oluşturulmuştur (Zavalis vd.,2012). Yapılan çalışmada lityum iyonlarının elektrolit içinde kütle taşınmasının, tepe akımını ve dolayısıyla maksimum sıcaklık artışını sınırlayan en kritik özellik olduğunu göstermişlerdir. Penetrasyon sırasında iki akım yolu vardır: birinci yol çividen veya ISC'den geçen akım iken ikinci yol elektrotlardan geçen akım veya harici kısa devre olarak verilebilir. Simülasyon sonuçları, 2 numaralı güzergahtan geçen akımın, geçiş esnasında toplam akımın yaklaşık %75'ini oluşturduğunu göstermiştir.

2.2. Elektrikselsel Arızalar

2.2.1 Harici Kısa Devre

Harici kısa devre, aşırı şarj ve aşırı deşarj, elektrik arızasının yaygın koşullarından biridir. Pilin harici kısa devresi, voltaj farkı olan elektrotların iletkenlerle bağlanmasıyla meydana gelir. Genellikle pilin deformasyonu, suya batması, iletkenin yaşlanması, yanlış kullanım ve uzun süre şarj edilmesi vb. nedenlerden kaynaklanır. Harici bir kısa devre sırasında batarya hızlı deşarj durumundadır ve deşarj akımı normal durumdan çok daha büyük olabilir. Penetrasyonla karşılaştırıldığında, genellikle harici kısa devresinde açığa çıkan ısı hücre sıcaklığında önemli bir artış oluşturmaz.

LCO katot ve anodu grafit olan bir lityum iyon pilin harici kısa devre davranışı ile ilgili yapılan araştırmada kısa devre esnasında bir gazın üretildiğini göstermiştir (Leising vd.,2001). Termal kaçak mekanizmasının harici kısa devreden kaynaklandığı ve yine aşırı sıcaklığında kısa devre sırasında oluşan ohmik ısıdan kaynaklandığını göstermişlerdir (Spotnitz ve Franklin, 2003). Harici kısa devre, en yüksek akımın lityum iyonun kütle aktarım hızıyla sınırlı olduğu hızlı bir deşarj işlemine benzediği gözlemlenmiştir.

Bu bağlamda harici kısa devreden kaynaklanan tehlikenin koruyucu elektronik cihazlarla azaltılabileceğini söyleyebiliriz. Koruyucu cihazların temel rolü, yüksek akım kısa devresinde devreyi kesmektir. Sigortalar, harici kısa devreyi engellemek için en etkili çözümdür (Kitoh ve Nemoto,1999). Pozitif termal katsayılı (PTC) cihazlar da sıcaklık anormal şekilde yükseldiğinde devreyi kesebilme özelliğine sahiptir (Smith vd.,2010). Manyetik anahtarlar, bimetalik termostatlar da harici kısa devre sırasındaki tehlikeyi önlemek için alternatiflerdir (Balakrishnan vd.,2006).

2.2.2 Aşırı Şarj

Aşırı şarj durumu bataryanın tasarlandığı kapasitesi dolduktan sonra hücrenin elektrik akımına zorlanmasıdır (Zhang vd.,2012). Aşırı şarjdan kaynaklanan termal kaçak, diğer kötüye kullanım koşullarından daha sert olabilir çünkü aşırı şarj sırasında batarya içerisinde aşırı enerji depolanır. Batarya yönetim sisteminin (BMS) üst voltaj sınırından önce şarj işlemi durduramaması, aşırı şarjın kötüye kullanılmasının olağan nedenidir. Pil paketindeki tutarsızlık, en yüksek gerilime sahip hücrenin ilk aşırı şarj edilen hücre olduğunu ve ardından diğerlerinin geldiğini göstermiştir.

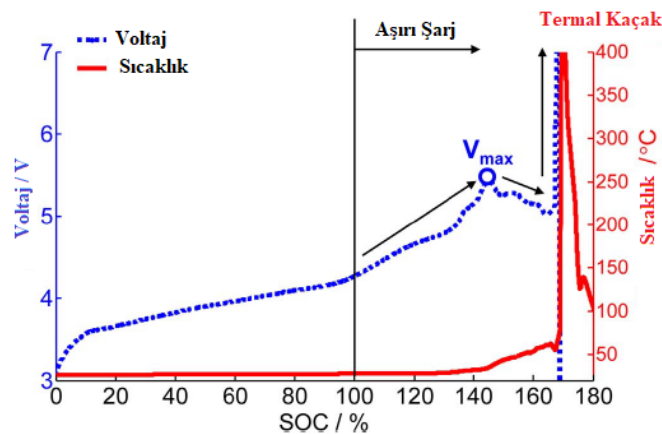
Aşırı şarj sırasında ısı ve gaz üretimi meydana gelmektedir. Isı üretimi ohmik ısı ve yan reaksiyonlardan gelir. Aşırı şarj nedenlerini ele alan çalışmada üretilen ısı miktarının şarj akımıyla pozitif bir korelasyona sahip olduğunu gözlemleyerek aşırı şarj sırasında ohmik ısının önemli bir ısı kaynağı olduğunu gösterilmiştir. (Saito vd.,2001).

Yapılan çalışmalar aşırı şarjın neden olduğu yan reaksiyonların mekanizmalarını açıkça ortaya koymaktadır (Wen vd.,2012; Lin vd.,2013). Buna göre ilk olarak batarya sistemi içerisinde aşırı lityum araya girmesi nedeniyle anot yüzeyinde lityum dendrit büyümesi hızlanır. Lityum dendrit büyümesinin başlangıcı, katot ve anodun stokiometrik oranından etkilenir. Ardından lityumun aşırı de-interkalasyonu, ısı üretimi ve oksijen salınımıyla (NCA katodu için oksijen salınımı) katot yapısının çökmesine yol açar. Oksijenin salınması, büyük gazlar üreten elektrolitin ayrışması hızlanır. İç basıncın artması nedeniyle hücrenin hava ile temas etme ihtimali artar. Hücre içindeki aktif maddelerin havayla teması, havalandırma sonrasında daha şiddetli ısı oluşumuna neden olabilir.

Aşırı şarj durumuna ait negatif koşulların incelenmesi yönünde yapılan çalışmalarda yüksek akımlarda bataryanın patladığı ve düşük akım değerlerinde ise bataryanın şiştiği sonucuna ulaşılmıştır. Bir pil hücrenin aşırı şarjı, herhangi bir hücrenin voltajı iyi izlenmediği zaman meydana gelebilir. Gerilim izlemede küçük bir sapma olması durumunda hücre, pratik çalışma sırasında bir miktar aşırı şarj edilebilir. Hafif bir aşırı şarj doğrudan termal kaçağa değil, kapasite bozulmasına yol açar. Bu durumu açıklayıcı olan bir çalışma içerisinde NCM+LMO kompozit katotlu hücrenin bir kez %120'den daha düşük bir şarj durumuna (SOC) aşırı şarj edilmesi durumunda belirgin bir kapasite kaybının meydana gelmediğini, ancak hücre %130'a veya %130'a kadar aşırı şarj edildiğinde önemli kapasite kaybı oluştuğunu gözlemlenmiştir (Ouyang vd.,2015).

Aşırı şarj koruması, voltaj regülasyonu ve malzeme modifikasyonu ile sağlanabilir. Şekil 2 NCM+LMO/Grafit elektrotlara sahip bir hücrenin aşırı şarj profilini göstermektedir. Tepe voltajı 5,4 V'ta bulunur, ardından voltaj düşer ve ardından aşırı şarjın neden olduğu termal kaçak ortaya çıkar. Lityum iyon hücrenin voltajını düzenlemek için BMS'de ayarlanan voltaj limiti, güvenli korumayı sağlaması için tepe voltajından daha düşük olmalıdır. Malzeme modifikasyonu aynı zamanda aşırı şarjdan kaynaklanan tehlikenin önlenmesinde de etkilidir. Örneğin katot kaplama, pil hücrenin aşırı şarj önleme davranışını geliştirebilir (Li vd.,2006; Cho vd.,2003). Hücreye yüklenen aşırı enerjiyi tüketebilen kimyasal reaksiyonlar, aşırı şarjı etkili bir şekilde engelleyebilir. Son zamanlardaki çalışmalar redoks reaksiyonlarının aşırı şarj ile mücadelede önemli rol oynadığını göstermektedir (Chen vd.,2009, Lamb vd.,2014).

Aşırı voltajda elektrik izolasyon durumundan iletken duruma dönüşebilen ve böylece aşırı şarj akımını ISC ile yönlendirebilen potansiyele duyarlı bir membran durumun yan etkilerini azaltabilir (Xiao vd.,2005). Akım geçişine yönelik kısa devre, aşırı şarj sırasında dahili basınç artışıyla etkinleştirilebilen mekanik bir anahtarla da gerçekleştirilebilir.



Şekil 2. Ticari bir lityum iyon pil için aşırı şarjın tetiklediği termal kaçak sonuçları (Ouyang vd.,2015).

2.2.3 Aşırı Deşarj

Aşırı deşarj başka bir olası elektriksel kötüye kullanım durumudur. Genel olarak pil takımı içindeki hücreler arasında voltaj tutarsızlığı kaçınılmazdır. Bu nedenle, BMS herhangi bir hücrenin voltajını izleyemediğinde, en düşük voltaja sahip hücre aşırı deşarj olacaktır.

Bataryanın açık devre gerilimi kesme geriliminin altına boşaltıldığında aşırı deşarj meydana gelir ve akü yönetim sisteminin arızalanması da aşırı deşarjın tipik bir nedenidir. Aşırı deşarj, anotta aşırı lityum iyonu kaybına neden olur, bu da anodun kararlı yapısını bozar ve geri dönüşü olmayan hasara neden olur. Bu arada CO ve CO₂ gibi gazlar da üretilerek pilin şişmesine neden olabilir. Ayrıca aşırı deşarj bakır kollektörün çözünmesine neden olacaktır. Çözünmüş bakır anotun yüzeyine kaplanır ve membranı deler. Böylece kısa devre oluşmasına neden olur. Diğer arızalar ile benzer olarak, LIB'nin aşırı deşarjı durumunda da önemli miktarda ısı salınımı meydana gelir.

Aşırı deşarj, hücrenin kapasitesinin bozulmasına neden olabilir. Aşırı deşarj işlemi sırasında, anot yapısındaki aşırı lityum çıkışı (delithiasyonu) SEI tabakasının ayrışmasına neden olur, bu da CO veya CO₂ gibi gazlar üreterek hücrenin şişmesine neden olur (Li vd.,2008). Aşırı deşarjın ardından hücre yeniden şarj edildiğinde anot yüzeyinde yeni SEI oluşacaktır. Bu arada, yenilenen SEI katmanı, direnç artışı ve bunun sonucunda kapasite bozulması ile anotun elektrokimyasal özelliklerini değiştirir (Zhang vd.,2015; Erol vd.,2014). MCMB LCO bataryası üzerinde yapılan çalışmada 0 V değerine aşırı deşarj edildiğinde anot yüzeyindeki SEI katmanının tahrip olduğu ve yenilenen SEI katmanı kararsızlaşarak direnç artışına neden olduğunu gösterildi (Yu vd.,2006).

Aşırı deşarjın bir başka yan etkisi ise yapı morfolojisini değiştirmesidir. Bu yönde yapılan çalışmalarda Shu ve arkadaşları katot geçiş metali bileşiklerinin elektrokimyasal katı hal amorfizasyonu sonucunda katot malzemelerinin devre dışı kalarak hızlı kapasite bozulmasına yol açtığını gözlemlemiştir (Shu vd.,2012). Ayrıca aşırı deşarj bakır toplayıcının çözünmesine yol açtığı gözlemlenmiştir (Zhang vd.,2015). Çözünmüş bakır iyonlarının membrandan geçerek katot tarafında daha düşük potansiyelle sahip bakır dendritler oluşturmaktadır (Guo vd.,2016). Baskılanmayan bir büyüme ile bakır dendrit membrana nüfuz edebilir ve bu da ciddi ISC durumuna neden olabilir. Hücrenin aşırı deşarjdan sonra döngüye alınması durumunda termal kaçak oluşabilir (Maleki ve Howard.,2006).

2.3. Termal Arızalar

Fiziksel veya elektriksel faktörlerden kaynaklanan aşırı ısınmanın yanı sıra, dış ortamdaki yüksek sıcaklık ve aşırı ısınma da termal arızayı tetikleyebilir. Termal faktör, pil sıcaklığının şiddetli bir şekilde yükselmesine, membranın erimesine, elektrotların/elektrolitlerin ayrışmasına ve çok sayıda yan reaksiyona vb. neden olur ve son olarak pilin termal kaçak yapmasına yol açar. Başka bir deyişle, termal arızalar batarya sisteminde gerçekleşen termal kaçağın temel nedenidir. Hem fiziksel hem de elektriksel faktörlerin termal kaçaklara neden olduğunu ifade edebiliriz. Ayrıca ISC arızasının termal kaçağın en yaygın özelliği olduğu söylenebilir. Bu durum bataryadaki membranın bozulması nedeniyle katot ve anodun birbirine teması sonucu oluşur. ISC tetiklendiğinde, pilin içinde depolanan elektrokimyasal enerji kendiliğinden serbest kalır ve büyük miktarda ısı üretir.

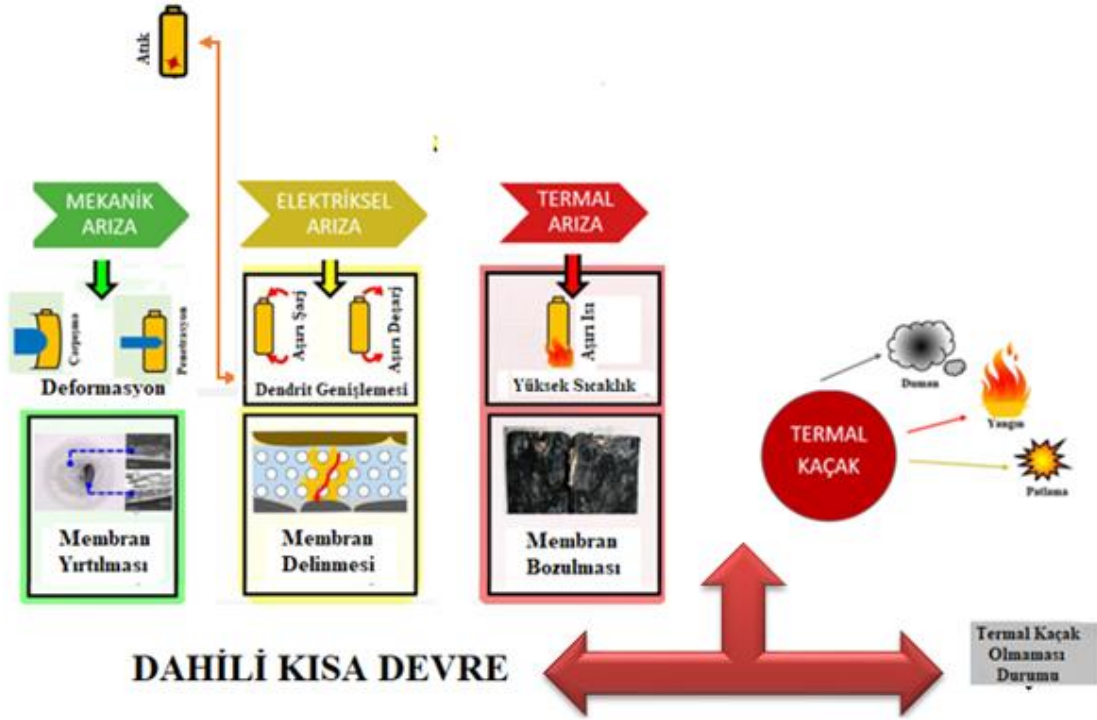


Şekil 3. Lityum iyon batarya arızaları ile ilişkili kazalar.

2.4. Dahili Kısa Devre (ISC)

Batarya arızalarının neredeyse tamamında dahili kısa devre durumu gözlenmiştir. Bu arıza genel olarak membran bozulması nedeniyle katot ve anodun birbiriyle temas etmesi durumunda ortaya çıkar. Bu arıza tetiklendiğinde malzemelerde depolanan elektrokimyasal enerji, ısı üretimiyle birlikte kendiliğinden serbest kalır.

ISC arızasının nedenleri Şekil 4 içerisinde gösterildiği gibi üç kategoride ele alınabilir. Bunlar; çarpışma ve penetrasyon gibi mekanik arızalar, dendrit dolayısıyla delinen membran örneğinde olduğu gibi gerçekleşen elektriksel arızalar ve aşırı sıcaklığın neden olduğu büyük ISC ile membranın büzülmesi ve çökmesi durumunu açıklayan termal arızalardır.

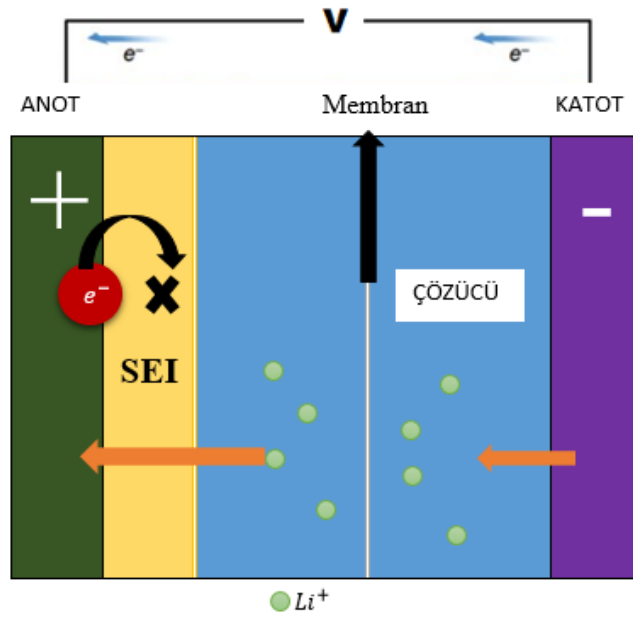


Şekil 4. Termal kaçak sürecinin yaygın dahili kısa devre aşamaları

2.5. Termal Kaçak Süreci

Batarya termal kaçak süreci bundan önce belirttiğimiz aşamaların sonunda gerçekleşen son derece tehlikeli bir aşamadır. Termal kaçak süreci literatürde mekanik, elektriksel ve termal koşullar baz alınarak incelenmiştir. Termal kaçak lityum iyon bataryaları için en önemli güvenlik sorunu olmasının yanında diğer olumsuzluklar ile sebep sonuç ilişkisinde bulunabilmektedir. Bu durumla ilgili yapılan çalışmalarda elektrikli araçlarda (EA) oluşan yangınların sebep olduğu kazaların çoğunda en temel etkenin termal kaçaklar olduğu istatistiği ortaya koyulmuştur (Sun vd.,2020). Termal kaçak üzerine yapılan incelemelerde, arızanın hücre içinde üretilen bir sıcak nokta (sıcak nokta, parçacık kısa devresi) veya hücre dışındaki bir ısı kaynağı (elektrik arızası) tarafından başlatılabildiğini ve ayrıca bu durum hücre içinde kendiliğinden hızlanan bir ekzotermik reaksiyon olduğunu göstermiştir (Pfrang vd.,2017; Spotnitz ve Franklin.,2003; Bandhauer vd.,2011; Wang vd.,2006)

Literatürde LİB yapılarının aşırı ısınmalarıyla ilgili çalışmalar yapılarak bu hücre malzemelerinin çeşitli ayrışma aşamaları ve bu aşamaların termal kaçağa sebep olduğu yayınlanmıştır (Yang vd.,2006; Jhu vd.,2012; Orendor vd.,2016; Huang vd.,2015) Bu çalışmaların devamında hücre kimyalarının yaşadığı ana reaksiyonlar ortaya koyulmuştur. Buna göre yalıtılmış laminasyon folyolarıyla (kese hücreleri) veya metalik kaplamalarla kaplanan hücrelerde LİB yapısının ilk şarjı sırasında, anot üzerinde katı elektrolit ara yüzü (SEI) olarak adlandırılan organik bir pasifleştirme katmanı gelişir. SEI tabakası Şekil 5 içerisinde analiz edilmiştir.



Şekil 5. Lityum iyon bataryalarda katı elektrolit ara fazı şematığı

Burada ilk etapta sıcaklık değeri 70 °C değerini aştığında iletkenliğin kaynağı olan tuz ayrışmaya başlar ve solventler ve SEI ile reaksiyona girer (Takeneka vd.,2021; Feng vd.,2014; Finegan vd.,2015)

Sıcaklık değeri 120 °C değerini aştığında ise SEI malzemesinin bozulmasıyla anottaki ara katkılı lityum ile elektrolit arasındaki reaksiyon başlar. Bu durum yaklaşık olarak 90 °C ile 130 °C aralığında gerçekleşir. Bu sayede ısı üretilir. Akabinde sıcaklığın 90 °C ile 230 °C aralığındaki değerlerinde lityum ve elektrolit reaksiyona girerek C₂H₄, C₂H₆ ve C₃H₆ gibi gazlar üretilir (Mikolajczak vd.,2011).

Yukarıdaki aşamalardan sonra sıcaklık 130 °C değerini aşarak daha fazla gaz ortaya çıkar ve böylelikle elektrolit buharlaşır. Hücre iç basıncı hücre kasesinin en zayıf noktasından açılana dek yükselir. Sıcaklık değerleri yaklaşık olarak 120 °C ile 220 °C aralığında iken bu biriken gaz hücre içinden akü paketine doğru hareket eder ve membranı eritir. Bu duruma birinci havalandırma da denilir (Roth vd., 2004)

Yaklaşık 160 °C'de başlayan hücre içindeki ekzotermik süreç, kendi kendine ısınmayı hızlandırır ve termal kaçak ile sonuçlanır. Termal kaçığın yanında şiddetli gaz ve parçacık salınımı (ikinci havalandırma) oluşur. Elektrolit 200–300 °C arasında ekzotermal olarak ayrışır (Wang vd.,2012). Termal kaçak dolayısıyla hücre içi sıcaklık önemli ölçüde artarak metal oksit katotlarının ayrışmasına ve oksijen üretimine zemin hazırlar (Gachot vd.,2011) Oksijenin elektrolitle daha fazla reaksiyona girmesiyle CO₂ ve H₂O oluşur.

Yukarıda bahsettiğimiz pil arızaları ile hücre içerisinde önemli şiddete sahip reaksiyonlar ortaya çıkar. Bunun sonucunda yapı önemli miktarda sıcak, zehirli ve yanıcı gaz üretir ve hücre sıcak parçacıkları dışarı atar. Açığa çıkan gaz ve parçacıklar yangın, patlama ve zehirli atmosfer gibi ciddi güvenlik ve sağlık risklerine neden olabilir.

Termal kaçak sürecine giren bataryanın örnek aşamaları Şekil 6 içerisinde gösterilmektedir. Buna göre her bir etap Şekil 1 içerisinde tarif edildiği gibi gerçekleşmiştir (Ouyang vd.,2019) .



Şekil 6. Termal kaçak sırasındaki deneysel olaylar; (a) Isıtma aşaması; (b) güvenlik havalandırma açılması; (c) gaz salınımı; (d) termal kaçak; (e) ateşleme ve yanma; (f) Azaltma ve söndürme.

Tablo 1 ile raporlanan bazı kazalar ve Şekil 7 ile termal kaçığın sebep olduğu Tesla marka aracın kaza fotoğrafını göstermektedir

Tablo 1. Son birkaç yıl içerisindeki bazı lityum iyon batarya arızaları

KAZA	TARİH	KAZA YERİ VE OLAY	YANGIN NEDENİ
1.	18 Temmuz 2011	EV otobüsü alev aldı, Şangay, Çin	Aşırı ısınan LiFePO4 pillerden kaynaklandı
2.	11 Nisan 2011	EV taksisi alev aldı, Hangzhou, Çin	16 Ah LiFePO4 pilden kaynaklandı
3.	3 Eylül 2010	Bir Boeing B747-400F kargo uçağı Dubai'de alev aldı.	Aşırı ısınan lityum pillerden kaynaklandı
4.	26 Nisan 2010	Acer, Dell, Apple, Toshiba, Lenovo gibi 2700 dizüstü bilgisayar pilini geri çağırdı ve Sony 2006'da bitirdi	Potansiyel aşırı ısınma ve yangın tehlikeleri
5.	Mart 2010	İki iPod Nano müzik çalar aşırı ısınıyor ve alev alıyor, Japonya	Aşırı ısınan lityum pillerden kaynaklanıyor
6.	Ocak 2010	İki EV otobüsü alev aldı, Urumçi, Çin	Aşırı ısınan LiFePO4 pillerden kaynaklandı
7.	Temmuz 2009	Kargo uçağı ABD, Shenzhen, Çin'e uçmadan önce alev aldı.	Lityum iyon pillerin kendiliğinden yanmasından kaynaklandı
8.	21 Haziran 2008	Bir konferansta dizüstü bilgisayar alev aldı, yangın 5 dakika sürdü, Japonya	Aşırı ısınan pilden kaynaklandı
9.	Haziran 2008	Honda HEV alev aldı, Japonya	Aşırı ısınan LiFePO4 pillerden kaynaklandı
10.	2006 - şimdi.	Onbinlerce cep telefonu yangını veya patlaması	Kısa devre, aşırı ısınma vb. nedenlerden kaynaklanıyor



Şekil 7. Oslo'da 2016 yılında Tesla marka araç kazası (Mauger ve Culien,2017)

3. Tartışma ve sonuç

Enerji depolama sistemlerinin kapasite ve verimlilik açısından ana aktörlerinden olan lityum iyon bataryalarının güvenlik açısından davranışları birden fazla parametreye bağlıdır. Buna göre bataryanın dış kuvvetlere maruz kalması ile mekanik arızalar oluşur. Mekanik arızaların sebebiyet verebileceği elektriksel ve termal arızalar, bataryayı termal kaçak olarak adlandırılan bir sürece sürükler. Termal kaçak sonucunda yanma, patlama ve duman gibi ciddi tehlikeler söz konusu olur.

Çalışma içerisinde bataryanın yaşamış olduğu bu arızaların sebebiyet verdiği kazaları işlerken günümüz teknolojileri içerisinde batarya güvenlik önlemlerinin artmasıyla yaşanan olumsuz durumların seyirindeki azalmalar görülmektedir. Lakin bu teknolojik gelişmelere rağmen arızaların minimize edilebilmesi için batarya sistemlerindeki güvenlik önlemlerini aşağıdaki gibi özetleyebiliriz.

Batarya arızaları beş temel uygulama ile azaltılarak önlenabilir. Buna göre ilk üç uygulama ile LIB'lerin doğal güvenliğini arttırmayı ve tehlike olasılığını azaltmayı amaçlarken diğerleri termal tehlikenin kötüleşmesini sınırlamak ve böylece hasarı azaltmak için uygulanır.

- İlk olarak batarya içerisinde güvenlik havalandırması, akım kesme cihazı (CID) ve pozitif sıcaklık katsayısı (PTC) gibi çeşitli güvenlik cihazları kullanarak batarya sıcaklık ve basınç faktörlerinden korunabilir. (Srinivasan vd.,2011)
- İkinci önleme metodu ise yangın geciktirici (FR) katkı maddelerinin uygulanmasıdır. Bu kısımda elektrolit ile membranın yapısal özellikleri önemlidir. Buna göre elektrolitin pil bileşenleri ile tepkimeye girmemesi yani kimyasal olarak stabil kalması, elektrokimyasal ataletin yüksek olması, iletkenlik ve viskozite gibi fiziksel özelliklerinin optimum olması ve ayrıca toksik yapısının en düşük seviyede olması gerekir. Elektrolitin bu hale gelebilmesi için katkı maddeleri literatürde devam eden çalışma konularıdır. Bunun yanında membranın barındırması gereken özellikler ise kimyasal mekanik stabilite, optimum kalınlık, termal kararlılık, ıslanmaya karşı direnç, bariyer özelliği ve gözenekli özelliğidir.
- Üçüncü olarak akü sıcaklığının kontrol edilmesini sağlayan ve termal tehlikelerin oluşmasını önleyen verimli bir akü yönetim sisteminin (BMS) yapılandırılması büyük önem taşımaktadır. EV'de uygulanan BMS genellikle sensörler, aktüatörler ve kontrolörlerden oluşur ve üç ana amacı gerçekleştirmek için kullanılır. Bu amaçlar; pilin hasar görmesini önlemek, bataryanın uygun voltaj ve sıcaklık aralığında çalışmasını sağlamak ve araçların gereksinimlerini karşılamak için batarya performansını sürdürmektir. (Hu vd.,2021; Liu vd.2024)
- Dördüncü metot bir uyarıcı olarak algılanabilir. Buna göre tek bir pil için; gerilim, akım, direnç ve diğer verilerin gerçek zamanlı izlenmesi, termal tehlike ortaya çıkmadan önce gerçekleştirilmeli ve bir anormallik ortaya çıktığında alarmin verilmesine olanak sağlanmalıdır. Ayrıca mevcut durumda bir pil paketi söz konusu ise yönetim izlemesi gerçekleştirmek, yani tüm pil paketinin çalışması sırasında meydana gelen anormallikleri analiz ederek ve yapıyı alarma geçirmektir. Erken uyarı, gerilim, akım, direnç ve diğer elektriksel performans parametrelerindeki değişikliklerin, sıcaklık değişiminin ve kaçan gazların izlenmesini içerir.
- Son olarak yangın söndürme sisteminin doğru seçilmesi hatta mevcuttaki halon, su, karbondioksit, köpük, kuru tozlar vb. gibi farklı söndürücü maddelerin geliştirilmesi gerekmektedir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Yazar Katkısı Beyanı

Yazar-1: Fikir, Orijinal Taslak Oluşturma, Yazım, Revize, Metot Oluşturma, Verilerin Düzenlenmesi, Sonuç ve Tartışma

Yazar-2: Revize, Verilerin Düzenlenmesi, Sonuç ve Tartışma

Yazar-3: Revize, Verilerin Düzenlenmesi, Sonuç ve Tartışma

KAYNAKLAR

Tran, M.-K.; Akinsanya, M.; Panchal, S.; Fraser, R.; Fowler, (2021).*Design of a Hybrid Electric Vehicle Powertrain for Performance Optimization Considering Various Powertrain Components and Configurations. Vehicles , 3, 2.* [Google Scholar] [CrossRef]

- Cunanan, C.; Tran, M.-K.; Lee, Y.; Kwok, S.; Leung, V.; Fowler, (2021). *M. A Review of Heavy-Duty Vehicle Powertrain Technologies: Diesel Engine Vehicles, Battery Electric Vehicles, and Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles*. *Clean Technol.*, 3, 28 [Google Scholar] [CrossRef]
- Sun, P.; Bisschop, R.; Niu, H.; Huang, X. A (2020). *Review of Battery Fires in Electric Vehicles*; Springer: New York, NY, USA,. [CrossRef]
- Pfrang, A.; Kriston, A.; Ruiz, V.; Lebedeva, N.; Di Persio (2017). *F. Safety of Rechargeable Energy Storage Systems with a Focus on Li-Ion Technology*; Elsevier Inc.: Amsterdam, The Netherlands,. [CrossRef]
- Spotnitz, R.; Franklin (2003). *Abuse behavior of high-power, lithium-ion cells*. *J. Power Sources* 113, 81–100. [CrossRef]
- Bandhauer, T.M.; Garimella, S.; Fuller, T.F (2011). *A Critical Review of Thermal Issues in Lithium-Ion Batteries*. *J. Electrochem. Soc.*, 158, R1–R25 [CrossRef]
- Wang, Q.; Sun, J.; Yao, X.; Chen, C. (2006). *Thermal Behavior of Lithiated Graphite with Electrolyte in Lithium-Ion Batteries*. *J. Electrochem. Soc.*, 153, A329. [CrossRef]
- Pius Victor Chombo, Yossapong Laonual (2020). *A review of safety strategies of a Li-ion battery*, ScienceDirect;; 478, 228649
- S. Zhang, Q. Zhou, Y. Xia (2015). *Influence of mass distribution of battery and occupant on crash response of small lightweight electric vehicle*. SAE Technical Paper, 2015-01-0575 <http://dx.doi.org/10.4271/2015-01-0575>.
- E. Sahraei, R. Hill, T. Wierzbicki (2012). *Calibration and finite element simulation of pouch lithium-ion batteries for mechanical integrity*, *J. Power Sources* 201, 307–321.
- L. Greve, C. Fehrenbach, (2012). *Mechanical testing and macro-mechanical finite element simulation of the deformation, fracture, and short circuit initiation of cylindrical Lithium ion battery cells*, *J. Power Sources* 214, 377–385.
- W.-J. Lai, M.Y. Ali, J. Pan (2014). *Mechanical behavior of representative volume elements of lithium-ion battery cells under compressive loading conditions*, *J. Power Sources* 245, 609–623.
- M.Y. Ali, W.-J. Lai, J. Pan (2013). *Computational models for simulations of lithium-ion battery cells under constrained compression tests*, *J. Power Sources* 242, 325–340
- E. Sahraei, J. Meier, T. Wierzbicki (2014). *Characterizing and modeling mechanical properties and onset of short circuit for three types of lithium-ion pouch cells*, *J. Power Sources* 247, 503–516.
- Y. Xia, T. Li, F. Ren, Y. Gao, H. Wang (2014). *Failure analysis of pinch-torsion tests as a thermal runaway risk evaluation method of Li-ion cells*, *J. Power Sources* 265, 356–362.
- H. Maleki, J.N. Howard (2009). *Internal short circuit in Li-ion cells*, *J. Power Sources* 191 (2) 568–574.
- T.G. Zavalis, M. Behm, G. Lindbergh (2012). *Investigation of short-circuit scenarios in a lithium-ion battery cell*, *J. Electrochem. Soc.* 159 (6) A848–A859.
- R.A. Leising, M.J. Palazzo, E.S. Takeuchi, K.J. Takeuchi (2001). *Abuse testing of lithium ion batteries: characterization of the overcharge reaction of LiCoO₂/graphite cells*, *J. Electrochem. Soc.* 148 (8) A838–A844
- K. Kitoh, H. Nemoto (1999). *100 Wh Large size Li-ion batteries and safety tests*, *J. Power Sources* 81, 887–890.
- K. Smith, G.-H. Kim, E. Darcy, A. Pesaran (2010). *Thermal/electrical modeling for abusetolerant design of lithium ion modules*, *Int. J. Energy Res.* 34 (2) 204–215.
- P.G. Balakrishnan, R. Ramesh, T.P. Kumar (2006). *Safety mechanisms in lithium-ion batteries*, *J. Power Sources* 155 (2), 401–414.
- Zhang, L., Zhang Z., Amin H. (2012). *Molecular engineering towards safer lithium-ion batteries: a highly stable and compatible redox shuttle for overcharge protection*. *Energy & Environmental Science*, 5(8): p. 8204-8207.
- Y. Saito, K. Takano, A. Negishi (2001). *Thermal behaviors of lithium-ion cells during overcharge*, *J. Power Sources* 97, 693–696.
- J. Wen, Y. Yu, C. Chen (2012). *A review on lithium-ion batteries safety issues: existing problems and possible solutions*, *Mater. Express* 2 (3), 197–212.
- C. Lin, Y. Ren, K. Amine, Y. Qin, Z. Chen (2013). *In situ high-energy X-ray diffraction to study overcharge abuse of 18650-size lithium-ion battery*, *J. Power Sources* 230, 32–37.
- M. Ouyang, D. Ren, L. Lu, J. Li, X. Feng, X. Han, Liu G. (2015). *Overcharge-induced capacity fading analysis for large format*

- lithium-ion batteries with LiyNi1/3Co1/3Mn1/3O2+LiyMn2O4 composite cathode*, J. Power Sources 279, 626–635.
- C. Li, H.P. Zhang, L.J. Fu, H. Liu, Y.P. Wu, E. Rahm, et al. (2006). *Cathode materials modified by surface coating for lithium ion batteries*, Electrochim. Acta 51 (19) 3872–3883
- J. Cho, Y.-W. Kim, B. Kim, J.-G. Lee, B. Park (2003). *A breakthrough in the safety of lithium secondary batteries by coating the cathode material with AlPO₄ nanoparticles*, Angew. Chem. Int. Ed. 42 (14) 1618–1621.
- Z. Chen, Y. Qin, K. Amine (2009). *Redox shuttles for safer lithium-ion batteries*, Electrochim. Acta 54 (24) 5605–5613.
- J. Lamb, C.J. Orendorff, K. Amine, G. Krumdick, Z. Zhang, L. Zhang, et al. (2014). *Thermal and overcharge abuse analysis of a redox shuttle for overcharge protection of LiFePO₄*, J. Power Sources 247 1011–1017.
- L.F. Xiao, X.P. Ai, Y.L. Cao, Y.D. Wang, H.X. Yang (2005). *A composite polymer membrane with reversible overcharge protection mechanism for lithium ion batteries*, Electrochem. Commun. 7 (6), 589–592.
- H.F. Li, J.K. Gao, S.L. Zhang (2008). *Effect of overdischarge on swelling and recharge performance of lithium ion cells*, Chin. J. Chem. 26 (9) 1585–1588.
- L. Zhang, Y. Ma, X. Cheng, C. Du, T. Guan, Y. Cui, et al. (2015). *Capacity fading mechanism during long-term cycling of over-discharged LiCoO₂/mesocarbon microbeads battery*, J. Power Sources 293, 1006–1015
- S. Erol, M.E. Orazem, R.P. Muller (2014). *Influence of overcharge and over-discharge on the impedance response of LiCoO₂/C batteries*, J. Power Sources 270, 92–100.
- Z. Yu, J. Hu, X. Chu, Q. Liu (2006). *Effects of over-discharge on performance of MCMBLiCoO₂ lithium-ion battery*, Chin. Battery Ind. 11 (4) 223–226 (In Chinese).
- J. Shu, M. Shui, D. Xu, D. Wang, Y. Ren, S. Gao (2012). *A comparative study of overdischarge behaviors of cathode materials for lithium-ion batteries*, J. Solid State Electr. 16 (2), 819–824.
- R. Guo, L. Lu, M. Ouyang, X. Feng (2016). *Mechanism of the entire overdischarge process and overdischarge-induced internal short circuit in lithium-ion batteries*, Sci. Rep. 6, 30248.
- H. Maleki, J.N. Howard (2006). *Effects of overdischarge on performance and thermal stability of a Li-ion cell*, J. Power Sources 160 (2), 1395–1402
- Sun, P.; Bisschop, R.; Niu, H.; Huang, X (2020). *A Review of Battery Fires in Electric Vehicles*; Springer: New York, NY, USA. [CrossRef]
- Bandhauer, T.M.; Garimella, S.; Fuller, T.F (2011). *A Critical Review of Thermal Issues in Lithium-Ion Batteries*. J. Electrochem. Soc., 158, R1–R25 [CrossRef]
- Yang, H.; Zhuang, G.V.; Ross, P.N (2006). *Thermal stability of LiPF₆ salt and Li-ion battery electrolytes containing LiPF₆*. J. Power Sources, 161, 573–579. [CrossRef]
- Jhu, C.Y.; Wang, Y.W.; Wen, C.Y.; Shu, C.M. (2012). *Thermal runaway potential of LiCoO₂ and Li(Ni_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3})O₂ batteries determined with adiabatic calorimetry methodology*. Appl. Energy, 100, 127–131. [CrossRef]
- Orendorff, C.J.; Lamb, J., Steele, L.A.M., Spangler, S.W, Langendorf, J (2016). *Quantification of Lithium-Ion Cell Thermal Runaway Energetics*; Sandia Report; Sandia National Laboratories (SNL-NM): Albuquerque, NM, USA; p. 0486. [CrossRef]
- Huang, P.; Wang, Q.; Li, K.; Ping, P.; Sun J. (2015). *The combustion behavior of large scale lithium titanate battery*. Sci. Rep.; 5, 7788. [CrossRef]
- Norio Takenaka, Amine Bouibes, Yuki Yamada, Masataka Nagaoka, and Atsuo Yamada (2021). *Frontiers in Theoretical Analysis of Solid Electrolyte Interphase Formation Mechanism*, Advanced Materials, Wiley.
- Feng, X.; Fang, M.; He, X.; Ouyang, M.; Lu, L.; Wang, H.; Zhang, M. (2014). *Thermal runaway features of large format prismatic lithium ion battery using extended volume accelerating rate calorimetry*. J. Power Sources, 255, 294–301. [CrossRef]
- Finegan, D.P.; Scheel, M.; Robinson, J.B.; Tjaden, B.; Hunt, I.; Mason, T.J.; Millichamp, J.; Di Michiel, M.; Offer, G.J.; Hinds, G.; et al (2015). *In-operando high-speed tomography of lithium-ion batteries during thermal runaway*. Nat. Commun., 6924. [CrossRef]
- Mikolajczak, C.; Michael Kahn, P.; White, K.; Thomas Long, R. (2011). *Lithium-Ion Batteries Hazard and Use Assessment Final Report*; Fire Protection Research Foundation: Quincy, MA, USA.
- Roth, E.P.; Doughty, D.H.; Franklin, J. (2004). *DSC investigation of exothermic reactions occurring at elevated temperatures in lithium-ion anodes containing PVDF-based binders*. J. Power Sources

- Wang, Q.; Ping, P.; Zhao, X.; Chu, G.; Sun, J.; Chen, C (2012). Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery. *J. Power Sources*, 208, 210–224. [CrossRef]
- Gachot, G.; Ribière, P.; Mathiron, D.; Grugeon, S.; Armand, M.; Leriche, J.B.; Pilard, S.; Laruelle, S. (2011). *Gas chromatography/mass spectrometry as a suitable tool for the li-ion battery electrolyte degradation mechanisms study*. *Anal. Chem.*, 2011, 83, 478–485.
- Dongxu Ouyang, Mingyi Chen, QueHuang, JingwenWeng, Zhi Wang and Jian Wang (2019). *A Review on the Thermal Hazards of the Lithium-Ion Battery and the Corresponding Counter measures*, *Applied Sciences*, 2019, 9,2483
- A. Mauger, C. M. Julien (2017). *Critical review on lithium-ion batteries: are they safe? Sustainable?*, Springer, 2017, 1933-1947
- Rengaswamy Srinivasan, Bliss G. Carkhuff, Michael H. Butler, Andrew C. (2011), *Baisden Instantaneous measurement of the internal temperature in lithium-ion rechargeable cells*, *Electrochimica Acta*, 56, 6198-6204.
- Guangfang Hu, Peifeng Huang, Zhonghao Bai, Qingsong Wang, Kaixuan Qi (2021) *Comprehensively analysis the failure evolution and safety evaluation of automotive lithium ion battery*, *Elsevier eTransportation* 10 (2021) 100140
- Xianjun Liu a , Yanfei Li , Xiaohua Jiang , Kw Xu (2024), *Lithium-ion battery of an electric vehicle short circuit caused by electrolyte leakage: A case study and online detection*, *Elsevier Journal of Energy Storage* 97 (2024) 112950
- Pedro L. (April 4, 2020), Comparison of different EV batteries in 2020
<https://pushevs.com/2020/04/04/comparison-of-different-ev-batteries-in-2020/>
- EV Fire Battery Data(July 11. 2024) <https://www.evfiresafe.com/ev-battery-fire-data>
- FireSafe (July 11, 2021) Global Electrical Vehicle Battery Fires <https://www.evfiresafe.com/ev-fire-faqs>

Endüstriyel Ahşap Ürünlerin, Ahşap Hibrit Yapılarda Kullanımı

Use of Industrial Wooden Products in Wood Hybrid Structures

Hüsna Al Adak^{1*}, Ahmet Celal Apay²,

^{1*} Düzce Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Düzce, Türkiye

² Düzce Üniversitesi, Sanat Tasarım ve Mimarlık Fakültesi, Düzce, Türkiye

ÖZET

Sürdürülebilirlik, küresel ısınma, sera gazları ve ekoloji gibi kavramlar, günümüzde karşımıza çıkan en önemli kavramlardan bazılarıdır. Yapı ve mimarlık, sürdürülebilirlik alanında en önemli paylardan birine sahiptir. Yapı malzemesi seçimi, yaşanabilir dünya için çok önemlidir. Çünkü yapım teknolojileri endüstrisi dünyanın enerjisinin bir kısmını kullanmaktadır. Yaşanabilir doğanın önem kazandığı dünyamızda ahşap çok önemli bir yere sahiptir. Ahşap malzemesi diğer yapı malzemelerine göre daha az karbon ayak izine sahip hem de üretiminde daha az enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Ahşap malzeme fabrika ortamında dayanıklı hale getirilerek endüstriyel ürün olarak karşımıza çıkar. Endüstriyel ahşap ürünlerinin kullanıldığı bu sistemler ise Çağdaş Ahşap Yapım Sistemlerini oluşturmaktadır. Bu yapım sistemlerinin yenilikçi olan sistemi 'Ahşap Hibrit Sistemler' günümüzdeki kullanımı artarak yapı sektöründe, sürdürülebilir anlayışını oluşturmaktadır. Çalışma kapsamında Endüstriyel Ahşap elemanların, Ahşap Hibrit Yapılarda kullanımının incelenmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla öncelikle ana malzeme olan ahşabın özellikleri incelenmiştir. Daha sonra ahşap malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerine değinilmiştir. Çalışmanın ilerleyen kısımlarında endüstriyel ahşap ürünler incelenmiş ve ahşap hibrit yapı örnekleri analiz edilmiştir. Çalışmanın sonuç bölümünde elde edilen veriler değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sürdürülebilirlik, Endüstriyel Ahşap Ürünler, Ahşap Hibrit Yapılar

ABSTRACT

The concepts of sustainability, global warming, greenhouse gases and ecology are some of the most important concepts we encounter today. Building and architecture have one of the most important shares in the field of sustainability. Selection of building materials is very important for a livable world. Because the production industry has opened up a portion of the world's energy. Wood has a very important place in our world, where livable nature is given importance. Wood material has less carbon footprint than other building materials and requires less energy to produce. Wooden material is made durable in the factory environment and emerges as an industrial product. These systems of the industrial wood company constitute the 'Contemporary Wood Construction System'. The innovative system of these construction systems, 'Wood Hybrid Systems,' is increasingly being used today, forming a sustainable understanding in the construction sector. This study aims to examine the use of industrial wood elements in Wood Hybrid Structures. For this purpose, the properties of wood, the main material, were first examined. Then the physical and mechanical properties of the wood material are discussed. In the following parts of the study, industrial wood products were reviewed, and examples of wood hybrid structures were analyzed. In the conclusion section of the study, the obtained data were evaluated.

Keywords: Sustainability, Industrial Wooden Products, Wooden Hybrid Structures

Başvuru: 22.07.2024 Son Revizyon: 28.10.2024 Kabul: 06.11.2024

Doi: 10.51764/smutgd.1520110

^{1*}Hüsna AL ADAK: Düzce Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Düzce, Türkiye; E-mail: husna217054@ogr.duzce.edu.tr ;ORCID: 0009-0001-4377-5223

² E-mail: ahmetapay@duzce.edu.tr ORCID: 0000-0003-2008-6588

1. GİRİŞ

Ekoloji, küresel ısınma, sera gazları ve sürdürülebilirlik gibi kavramlar yaşanılabilir bir çevre için, karşımıza çıkan en önemli kavramlardır. Sürdürülebilirlik ise bu kavramların başında gelir. Sürdürülebilir malzeme deyince aklımıza ilk gelen malzeme ahşaptır.

Ahşap; çeşitli boyutlardaki ağaç gövdesinin temel malzemesi olan sert lifli malzemeye denir. Herhangi bir ahşabın marangozlukta kullanılmak amacıyla kesilip biçildikten sonra bekletilen ahşaplara kereste denir (Gül & Mayuk, 2019).



Şekil 1. Ahşap Malzemesi [1]



Şekil 2. Kereste [2]

Ahşap doğal bir malzeme olduğundan hücreli ve lifli yapıya sahiptir. Bu özelliğinden dolayı ağırlığı az, dolaylı olarak da mukavemeti yüksektir (Ataoğlu, 2015). Ahşap lifleri gövdeye diktir. Bu liflere aynı doğrultuda oluşan çekme, basınç gerilme gibi kuvvetlere karşı çok dayanıklıdır. Bu yüzden taşıyıcı elemanlarda kullanılan ahşaplarda dik kullanılmalıdır. Isı iletkenliği düşük olan ahşabın ısı ve CO₂ depolama kapasitesi yüksektir. Sıcaklığa göre genişlediği veya büzüştüğü için, ahşapta çatlaklar oluşabilir. Fakat bu çatlaklar statığı etkilemez. Doğal bir malzeme olduğu için böceklenme ve çürüme yapabilir. Bu yüzden uygun işlemler uygulanmalıdır. Bu işlemler kimyasal koruyucular ve ısıl işlemler olabilir. Bu şekilde ahşap dış etkenlere karşı korunmuş olur. Kuru ahşabın elektrik iletkenliği oldukça azdır. Ahşap malzemesinin üretimi ve işlenmesinde daha az enerji harcanır (Ataoğlu, 2015). Yapı sektörü, mobilya gibi birçok sektörde kullanılan ahşap, çevreyi kirletmediği için sürdürülebilir bir malzemedir. Bu yüzden yeniden kullanılmaya müsaittir. Ahşap estetik görünüş sağlar. Güçlü ve uzun ömürlüdür. İyi bir yalıtım malzemesidir. Isı ve ses yalıtımı yüksektir. Ahşap işlenmesi kolay malzemedir (Dündar, 2019).

2. AHŞABIN FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ

2.1 Fiziksel Özellikler

Nem Oranı; Ahşap yapısı gereği nem bulundurur. Dikili haldeyken nem oranı %200 iken, kereste haline gelince %60 oranlarına düşer. Kullanım için gerekli oran ise %5-19 dur. Ahşap malzemedeki nem oranı arttıkça, malzemede bozulma ve çürüme artar. Vida tutma kabiliyeti azalır. Boya ve cila uygulanmasını etkiler. Makinelerde işleme sırasında kabarcık ve şekilde bozulmalar meydana gelir. Darbeye dayanımı ve kullanım ömrü azalır (Görgün & Ünsal, 2023; Altıok vd., 2023).

Özgül Ağırlık; Ahşap malzemenin belirli ölçülerdeki belli sıcaklığa ulaştığında değişmediği, sabit kaldığı ağırlıktır. Havanın ortamı kütle kaybını etkileyen değişkendir. Buharlı şartlar altında verilen ısı, kuru ortamda verilen ısıya göre, ahşaba daha fazla kütle kaybettirir. Diğer etkileyen unsurlar ise; yabancı madde, öz odun, rutubet ve hücre çeperidir (Aydemir & Gündüz, 2000; Usta, 2017; Bozkurt & Erdin, 2011).

2.2. Mekanik Özellikler

Elastikiyet Modülü; Ağaç malzeme büküldüğünde iç kısmında sıkışma, dış kısmında bükülme olur. Hızlı büyüyen ağaç grubu yapı olarak zayıf oldukları için elastikiyet bakımından zayıftır. Bu yüzden yavaş büyüyen ağaçlar elastikiyet bakımından güçlüdür. Paralel lifli ağaçların elastikiyet kalitesi çapraz lifli ağaçlara oranla daha fazladır (Parlak, 2020).

Basınç Direnci; Basınç direncini; liflerin yönü, halka genişliği, malzemenin yoğunluğu, rutubet ve budaklık etkiler. Basınç direnci yoğunluk ile doğru orantılı, sıcaklık ile ters orantılıdır. Rutubet değişim olduğunda basınç direncinde azalma olmaktadır (Bozkurt & Erdin, 2011).

Eğilme Direnci; Eğilme direncini etkileyen en önemli unsurlardan biri etki altında kaldığı yük etkisidir. Malzemenin yoğunluğu arttıkça eğilme direncinde artar. Eğilme direncinin en yüksek değerinde olması için ağaç malzemenin

rutubet değeri %3-5 oranında olmalıdır (Bozkurt & Erdin, 2011).

Çekme Direnci;Ters yönde uygulanan ve malzemeyi ayırmaya çalışan kuvvete karşı gösterilen güçtür.Liflere paralel ve dik olacak şekilde iki türlü çekme direnci vardır.Yoğunluk arttıkça çekme direnci artar. Rutubet arttıkça çekme direncide artar.Budaklar en fazla çekme direncini etkilemekte olup,budak sayısı arttıkça çekme direnci azalır (Bozkurt & Erdin, 2011).

3. ENDÜSTRİYEL AHŞAP ELEMANLAR

Ahşap parçaların, kerestelerin, tabakaların, yongaların ve ahşap liflerinin çeşitli bağlayıcı malzemelerle fabrikalarda birleştirilmesiyle oluşan homojen malzemeye endüstriyel ahşap denir (Gül & Mayuk,2019). Endüstriyel ahşap ürünler, doğal ahşap malzemesinin kusurlarının ve dezavantajlarının azaltıldığı, özelliği kontrol edilebilen malzemelerdir. Birçok avantajı bulunmaktadır. Bunlardan bazıları; Uygulamaya özel üretilebilir. Uzun ağaçların nadir olması, endüstriyel ahşap ürünlerin kullanımını daha avantajlı hale getirmiştir.Geri dönüştürülebilir bir malzeme olduğu için çevreye olumlu katkısı oldukça fazladır (Aydın,2019).

3.1.Yapıştırılmış Lamine Ahşap (GLULAM) (Glued Laminated Timber)

Yapıştırılmış Lamine Ahşap;hazırlanmış 4 veya daha fazla kerestenin tutkal ile paralel olarak yapıştırılmasıyla ortaya çıkan üründür (Tavşan vd. 2022; Coşkun & Yardımlı, 2022). Yapıştırılan her bir katmanın kalınlığı 19-50 mm arasında,uzunluğu ise 1,5-5 metre arasında değişmektedir (Porteous, Kermani, 2013). Masif ahşaba göre daha yüksek mekanik özelliklere sahip olan Glulam daha iyi dayanım ve rijitlik göstermektedir (Tavşan vd. 2022). Eğilme ,çatlama ve gerilmelere direnç gösteren bu malzemenin beton ve çelik malzemesine göre elastikiyet modülü düşüktür (Li vd., 2024; Wang vd., 2024).



Şekil 3. Yapıştırılmış Lamine Ahşap [3]

Glulam malzemesi kestane, karaçam köknarı, meşe ve ladin ağaçlarından üretilmektedir. Kömürleşme oranlarının düşük olduğu bu ağaç türleri bozulma ve nem değişikliğine karşı dirençlidir. Glulam malzemesi döşeme kirişleri, çatı kirişleri, aşıklar, kolonlar, kafes kirişlerde kullanılabilir (Li vd., 2024)

3.2. Çapraz Lamine Ahşap (CLT-Cross laminated timber)

Çapraz lamine ahşap, ahşap plakaların CNC makinelerinde kesilip tutkal yardımıyla, birbirine dik olarak yapıştırılmasıyla elde edilen sistemdir. CLT ürünü, prefabrike üretilen bir masif ahşap paneldir. Taşıyıcı, cephe ve iç mekân da kullanılabilir (Tavşan, C., Şahiner Tufan, A., Tavşan, F.,2022). Ayrıca köprü yapımı, ticari ve endüstriyel binalarda ve konutlarda kullanımı yaygındır (Çavuş vd., 2024).



Şekil 4. Çapraz Lamine Ahşap [4]

3,5 ve 7 katman şeklinde üretilen CLT malzemeleri genellikle 5 cm ve 30 cm kalınlığında, Genişliği 2,40-3 metre, uzunluğu 12-20 metre arasında değişmektedir (Coşkun & Yardımlı, 2022). CLT yük taşıma kapasitesi açısından oldukça avantajlı olduğu için döşemelerde kullanımı oldukça yaygındır. Rijit malzeme olduğu için deprem sırasında binanın dayanımını artırır (Tonyalı vd., 2024). Malzeme üretimi yapılırken yerel ağaçlar kullanılır, Almanya’da ladin odunu kullanılırken Kanada’da ladin, çam, göknar ;Avustralya ve Yeni Zelanda gibi ülkelerde ise çam odununun kullanımı daha yaygındır (Çavuş vd., 2024).

3.3.Lamine Ahşap Kaplama (LVL-Laminated veneer lumber)

LVL ahşap malzemeleri, katmanların ısı ve basınç altında yapıştırıcı ile birbirine yapıştırılarak oluşturulan malzemelerdir. Amerika, Kanada ve Avrupa devletlerinde yaygın olarak kullanılan bu malzeme giriş lentolarında, kapı ve pencere yapımında yaygın olarak kullanılır. Malzeme yapılırken köknar, sedir, kavak, çam ve ladin gibi ağaçlar kullanılmaktadır (Rankumar vd., 2024).



Şekil 5. Lamine Ahşap Kaplama [5]

LVL malzemesi tek katmanı 2.5-4.8 mm arasında değişmektedir. Malzemenin birçok avantajı bulunmaktadır. Rutubet ve neme karşı dayanıklıdır. Homojen şekilde üretildiği için yüksek mukavemet ve rijitlik gösterir. Masif ahşaba göre kusurlarından arındırılan LVL yoğunluk ve mekanik özellik açısından daha avantajlıdır (Hızıroğlu, 2009).

3.4 Paralel lamine Ahşap (PSL-Parallel strand lumber)

Paralel yongaların birbirine yapıştırılarak oluşturulan yapısal üründür. Yapıştırılan yonga levhaların 6.4 mm olacak şekilde üretimi yapılmalıdır. Genellikle kavak ve sarıçam ağaçları kullanılır (Oh, 2022).



Şekil 6. Lamine Ahşap Kaplama [6]

Artık parçalarda kullanıldığı için oldukça verimli bir üründür. Amerika ve Kanada da üretim ve kullanımı yaygındır. Kolon ve kirişlerde kullanılır. Ayrıca köprülerde ve ahşap çerçeve konstrüksiyonda kullanılır (Oh, 2022).

3.5 Lamine yonga ahşap (LSL- Laminated strand lumber)

LSL; lifli ahşap katmanların birbirine yapıştırılarak oluşturulan üründür. En küçük katmanı minimum 2.54mm, toplam kalınlığı 90 mm'e kadar yapılabilir. Lento, giriş, döşeme ve tavanlarda kullanımı yaygındır (Moradpour vd., 2018). Yüksek katlı ve rüzgarın yoğun olduğu yerlerde yapılan yapılarda kullanılır (Wang vd., 2023).



Şekil 7. Lamine Yonga Ahşap [7]

LSL;küçük çaplı ve kalitesi düşük ağaçlardan yapılır. Kimyasal özellikleri yapıştırıcısı ile ilişkili olan LSL, yüksek kararlılığa sahip olduğu için sıcaklık ve nem farklılığında eğilme ve bükülme yaşamaz. Vida tutma kabiliyeti yüksek olduğu için kaplama ve çerçeveleme sisteminde de kullanılır. Isı ve ses yalıtımında avantajlıdır (Hasan vd., 2023).

3.6.Dübelli(Kavalalı) lamine Ahşap (DLT-Dowel laminated timber)

DLT;ahşap katmanların sert ahşap dübelleriyle birbirine bağlanmasıyla oluşan yapısal üründür (Fu vd.,2024; Pereira, 2021). 18 metre uzunluğa, 76 ile 350 mm arasında değişen kalınlığa,4.3 metre genişliğine sahip olup,paralel ve dik olarak üretilebilir (Gong, 2019; Mayo, 2015). CNC makinesiyle işlenmeye uygundur.Akustik açıdan avantajlıdır.Döşemelerde 10 metre,çatılarda ise 18 metreye kadar açıklık geçirebilir (Structure Craft, t.y.).



Şekil 8. Dübelli Lamine Ahşap [8]

DLT malzemesinde herhangi bir bağlantı veya yapıştırıcı malzeme kullanılmaz. Yapımında göknar, çam ve ladin ağaçları kullanılır. En büyük üretim tesisi Kanada'dır. Levha katmanlar aynı yöne baktığı için CLT malzemesinden daha avantajlıdır (Natural Resources Canada, t.y.).

3.7. Çivili lamine Ahşap (NLT-Nail laminated timber)

38-89 mm arası genişliğe,89-286 mm arası derinliğe sahip paralel boyutlu çivilerle birleştirilerek oluşturulan panellerdir (Adema vd., 2024; Dickof vd., 2017). Kullanım alanları genellikle zemin ve tavandır.NLT malzemesinin bağlantı elemanı olan çivi sayısı arttıkça malzemenin bükülme sertliği ve yük taşıma kapasitesi artar (Adema vd., 2024).



Şekil 9. Çivili Lamine Ahşap [9]

NLT malzemesinin üretim süreci diğer endüstriyel ahşap ürünlerine göre daha uygundur. Amerika'da yaygın olarak kullanılan NLT konutlarda oldukça fazla kullanılmaktadır (Gong, 2019).

3.8. Ahşap Beton Kompozit (TCC)

Beton ve kereste malzemelerinin özel yapıştırıcı ile birbiriyle bağlanmasıyla oluşan malzemelerdir. Yapıştırıcı kullanıldığı için kesme ve delme işlemleri olmaz. Bu yüzden inşaat ve üretimde kolaylık sağlar. Zeminlerde yaygın kullanılan bu malzemeler köprülerde de kullanılır (Fu vd., 2024; Shi, 2024).



Şekil 10. Ahşap Beton Kompozit [10]

TCC malzemesi kompozit malzeme olduğu için akustik, yangın ve yüksek titreşim açısından oldukça avantajlıdır. Sürdürülebilir ve yenilebilir malzemedir (Fu vd., 2024; Shi, 2024).

4. AHŞAP HİBRİT YAPI ÖRNEKLERİ

4.1. Ascent Binası

Ascent Binası Milwaukee, Wisconsin'de, 25 katlı 86,6 metre uzunluğunda dünyanın en yüksek ahşap hibrit yapısı olma özelliğine sahiptir (Safarik vd., 2022). Yapı konut özelliğinin yanında, mağaza, spor salonu ve havuz barındırmaktadır. 2020'de inşaatına başlanan bu bina 2022'de tamamlanmıştır (Fernandez vd., 2020).



Şekil 11. Ascent Binası Yapısal Kurgusu [11]

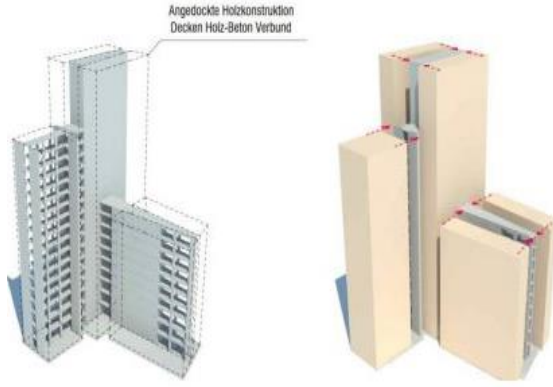


Şekil 12. Ascent Binası İnşaatı [12]

Yapının ilk 6 katı betonarme, 19 katı ahşaptır. Çekirdek kısımları betonarmedir. Yapının temelinde çelik kazıklar kullanılmıştır. Kolon ve kirişler Glulam, duvar panelleri CLT malzemelerinden yapılmıştır. Döşeme NLT (Çivili Lamine Ahşap) malzemesinden yapılmıştır. Duvar panelleri ise CLT malzemelerinden yapılmıştır. Yapı ızgara tipi plan ile çözülmüştür. Kolon ve kirişleri yangına dayanıklı haline getirmek için karbonlu özel kaplama yapılmıştır (Fernandez vd., 2020).

4.2. Hoho Binası

Hoho binası Avusturya'nın Viyana şehrinde bulunan, 24 katlı ve 84 metre uzunluğunda konut yapısıdır. Yapı 2020'de tamamlanmıştır. Hoho binasının 1. katında otel lobisi ve restoran, 2 ve 4. kat arasında spor salonu ve sığa, 5. kat ve 10. kat arasında ofisler, 11. ve 19. kat arasında otel odaları, en üst katlarda ise diğer kullanım alanları bulunmaktadır (Wood vd., 2024).



Şekil 13. Hoho Binası Yapısal Kurgusu [13]

Şekil 14. Hoho Binası İnşaatı [14]

Yapının temeli betonarmedir. Çekirdek kısmında beton malzemesinden yapılmıştır. Ayrıca yapıda betonarme iskelet bulunmakta olup, diğer ahşap elemanlarla birleştirilmiştir. Kolon ve kirişler GLULAM malzemesinden, duvarlar CLT malzemesinden yapılmıştır. CLT malzemesinden yapılan duvarlara yüzey işlemi uygulanarak daha dayanıklı hale getirilmiştir. Yapı prefabrikasyon sistemi ile yapılmıştır (Wood vd., 2024).

4.3. Tallwood 1 Binası

Kanada Langford'da bulunan bu yapı, ticaret ve konut yapısı olarak kullanılmaktadır. Yapı 2022 yılında tamamlanmıştır. Yapı Kanada'daki en yüksek çelik ahşap beton hibrit yapı özelliğine sahiptir (Higgins vd., 2023).



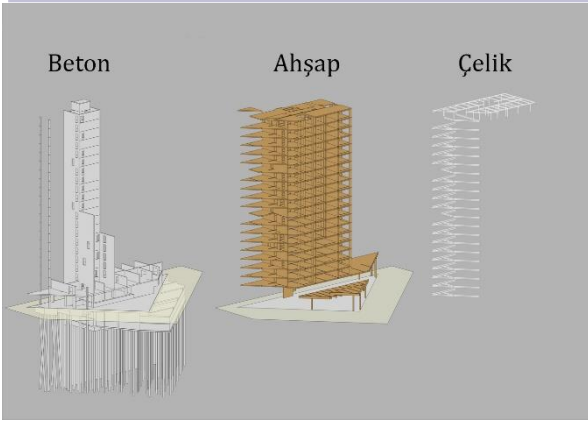
Şekil 15. Tallwood 1 Çelik iskelet ve Ahşap Kolon [15]

Şekil 16. Tallwood 1 Binası İnşaatı [16]

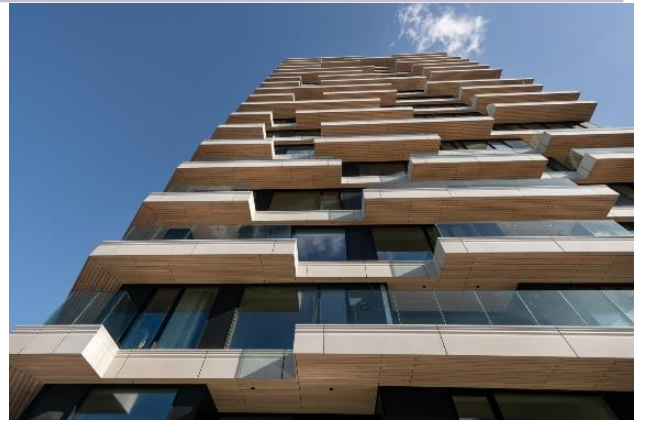
Yeraltı otopark ve zemin kat betonarmeden, diğer katlar ahşap ve betonarmeden oluşmaktadır. Yapının döşemeleri CLT malzemesinden yapılmıştır. Döşemeler nokta desteklerle GLULAM kolonlara bağlanmıştır. Kolonlar döşemelere çelik ankrajlarla bağlanmıştır. Langford bölgesi sismik alan bakımından yüksek olduğu için binayı yanal yüklere karşı korumak amacıyla çelik çevreveler yapılmıştır. Oluşabilecek ahşap kırılmaları için, çelik ankrajlar geliştirilmiştir. Bu çelik ankrajlar döşemenin de oturmasını sağlayan bağlantı elemanlarıdır. Ayrıca bu bağlantı elemanları deprem yüklerine karşı binada oluşabilecek deformasyonlara karşı önlem alır (Higgins vd., 2023).

4.4. Haut Binası

Hollanda Amsterdam şehrinde bulunan Haut Binası 73 metre olup 21 katlıdır. Konut yapısı olan Haut'un inşaatı 2022 yılında tamamlanmıştır. bu binada, inşaat süresinin daha kısa olması için prefabrikasyon sisteminden yararlanılmıştır (Higgins vd., 2023).



Şekil 17. Haut Binası Yapısal Kurgusu [17]



Şekil 18. Haut Binası [18]

Masif ahşap panel sistemi ile yapılan Haut binasında kolon ve kiriş sistemi kullanılmamıştır. CLT malzemesiyle yapılan duvarlar, hem taşıyıcı hem de bölücü görevi görür. Yapının temeli, bodrum katı ve çekirdeği betonarmeden yapılmıştır. Döşeme kısmında, ahşap beton kompozit malzeme olan TCC malzemesi kullanılmıştır. Ses yalıtımı için büyük avantajı olan bu malzeme detaylandırma açısından büyük avantaj sağlamıştır. Hibrit yapı olan Haut Binası hafif olduğu için, rüzgar önemli unsur olarak değerlendirilmiştir (Higgins vd., 2023).

4.5. In'Cube Danone Araştırma ve İnovasyon Merkezi

Fransa'daki bu yapı 2022 yılında tamamlanmış olup toplam 21500 m² lik inşaat alanına sahiptir. 24m uzunluğunda, 90x75 metre taban ölçülerine sahiptir. (URL 1) Toplam 1700 m³ beton, 1250 ton çelik, 9056 m³ ahşap kullanılmıştır.



Şekil 19. In'cube Danone Araştırma ve İnovasyon merkezi [19]

Yapının kolonları GLULAM malzemesinden yapılmıştır. Yapı da kullanılan diğer ahşap ürün CLT malzemesidir. In'Cube Danone Araştırma ve İnovasyon Merkezi prefabrikasyon yöntemi ile yapılarak inşaat süresinden kazanım sağlanmıştır. Yapı da birçok bağlantı detayı kullanılmıştır. (URL 2) 980 m² ve 10,5 m yükseklikte 1 merkezi plaza, 2900 m² yeşil teras, meyve bahçeli 1100 m²'lik bir bahçe terası, 1.000 m²'lik 1 yağmur bahçesi bulunmaktadır. (URL 3)

5. HİBRİT YAPI ÖRNEKLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Tablo 1'de Çalışmada yapım tamamlama yılı 2020'den sonra olan 5 farklı Ahşap Hibrit yapısı incelenmiştir. İncelenen hibrit yapıların Avrupa ve Amerika kıtasında yoğunlaştığı görülmektedir. Yapılar genellikle 20 kat ve üstünde yapılmıştır. Yapılarda Ahşap-Betonarme-Çelik ve Ahşap-Betonarme yapı üretim sistemi kullanılmıştır. Yapıların bir kısmında çelik, bir kısmında ise betonarme temel kullanılmıştır. Kat yüksekliğinin fazla olduğu yapılarda çekirdek, daha sağlam olması açısından betonarme olarak yapılmıştır. Taşıyıcı sistemi Ahşap, Betonarme Kolon Kiriş olan sistemlerde kolon malzemesi olarak Glulam tercih edilmiştir. Buda göstermektedir ki Glulam, hibrit yapıların kolonları için en uygun malzemedir. Yapılarda kiriş malzemesi olarak genellikle Glulam malzemesi kullanılmıştır. Döşeme malzemesi olarak CLT malzemesi kullanılsada, genellikle TTC veya NLT



















malzemesi kullanılmıştır.TTC ve NLT malzemelerin ortak özelliği hibrit malzeme olmasıdır.Böylelikle rijitlik ve yalıtım açısından avantaj sağlamaktadır.

Tablo 2'de örnek hibrit yapıların,kullanılan yapısal elemanların inşaat aşamasındaki görselleri analiz edilmiştir.

Tablo 1. Ahşap Hibrit Yapılarda Kullanılan Endüstriyel Ahşap Malzeme Analizi [Safarik vd., 2022, Fernandez vd., 2020, Wood vd., 2024, Higgins vd., 2023, URL 1,2,3]

Yapı Adı	Yapı Görseli	Yapının Bulunduğu Yer	Yapının Tamamlanma Yılı	Yapının Kat Sayısı	Çok Katlı Yapı Üretim Sistemi	Taşıyıcı Sistem	Kolonda Kullanılan Malzeme Türü	Kirişte Kullanılan Malzeme Türü	Döşemede Kullanılan Malzeme Türü	Çekirdekte Kullanılan Malzeme Türü
Ascent		Milwaukee, Wisconsin Amerika	2022	25	Ahşap Betonarme Hibrit Sistem	Ahşap ve Betonarme Kolon-Kiriş	Glulam	Glulam	NLT (Çivili Lamine Ahşap)	Betonarme
Haut		Amsterdam, Hollanda	2022	21	Ahşap Betonarme Çelik Hibrit Sistem	Masif Ahşap Panel	-	-	TCC	Betonarme
Hoho		Viyana Avusturya	2020	24	Ahşap Betonarme Hibrit Sistem	Ahşap ve Betonarme Kolon-Kiriş	Glulam	Glulam	TCC	Betonarme
Tallwood 1		Langford Kanada	2022	12	Ahşap Betonarme Çelik Hibrit Sistem	Masif Ahşap Panel+Ahşap Kolon	Glulam	-	CLT	Ahşap
In'Cube Danone Araştırma ve İnovasyon Merkezi		Fransa	2022	5	Ahşap Betonarme Çelik Hibrit Sistem	Ahşap Kolon*Çelik Kiriş	Glulam	Çelik	CLT	Çelik

Tablo 2. Ahşap Hibrit Yapılarda Taşıyıcı Eleman Analizi [URL 4,5,6,7,8]

Yapı Adı	Yapı Görseli	Kolon Kiriş Görseli	Döşeme Görseli	Cephe-Duvar Görseli
Ascent				
Haut				
Hoho				
Tallwood 1				
In'Cube Danone Araştırma ve İnovasyon Merkezi				

5.SONUÇ

Ahşap geçmişten günümüze en önemli yapı elemanlarından biridir. 20.yy çelik betonarme kullanımı arttığı için ahşap geri plana atılmıştır. Bu yapıların doğaya verdiği zarar ve daha sürdürülebilir bir yapım sistemine ihtiyaç duyulduğu için ahşap yapım sistemine tekrar ihtiyaç duyulmuştur. Birçok araştırma ve yeni yaklaşımlar olmuştur. Bu çözümler dünya çapında kanıtlanarak yapılarda kullanılmış ve alternatif bir yapım sistemi olan "Çağdaş Ahşap Yapım Sistemi" oluşmuştur. Çağdaş Ahşap Yapım Sistemi gerek yeni malzemeleriyle gerekse doğadaki konumu itibari ile çelik ve betonarme gibi yapım sistemlerine göre daha avantajlı bir yapım sistemidir. Ahşap hibrit sistemler ise Çağdaş Ahşap yapım sisteminin en çok kullanılan sistemidir.

Günümüzde gelineen süreçte endüstriyel ahşap ürünlerin kullanımı artmıştır. CNC makineleri ile büyük parçalar üretilmesi, işçilik maliyetinin az olması, inşaat süresinin kısa olması, ahşap hibrit yapıların yapılmasını popüler hale getirmiştir. Ülkemizde ahşap hibrit yapılarla ve tasarımlarla alakalı kısıtlı doküman ve araştırma bulunmaktadır. Nitelikli araştırma ve yayınlar, tasarımları artırmaya yardımcı olacaktır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Yazar Katkısı Beyanı

Yazar-1: Fikir, Taslak Oluşturma, Yazım, Revize, Metot Oluşturma, Verilerin Düzenlenmesi, Sonuç ve Tartışma

Yazar-2: Revize, , Sonuç ve Tartışma

KAYNAKLAR

- Adema, A., Chacón, M. F., Santa María, H., Opazo-Vega, A., Casanova, E., & Guindos, P. (2024). Flexural performance of full-scale two-span nail-laminated timber concrete composite slabs. *Construction and Building Materials*, 432, Article 128410.
- Altıok, M., Atar, M., Aktaş, M., Küreli, İ., Kesik, H. İ., Bülbül, R., & Ulaşan, H. (2023). Kurutma ve iklimlendirme parametrelerinin ahşap malzeme ve ahşap konstrüksiyon uygulamasına etkilerinin araştırılması. *Anatolian Journal of Forest Research*, 9(1), 132-140.
- Ataoğlu, N. C. (2015). Bir Tasarım Modası Olarak Ham Ahşap ve Paletler. *Selçuk Kent Dergisi*.
- Aydemir, D., & Gündüz, G. (2000). Ahşabın fiziksel, kimyasal, mekaniksel ve biyolojik özellikleri üzerine ısıyla muamelenin etkisi. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 11(15), 71-61.
- Aydın, H. (2019). Çok katlı ahşap yapılarda strüktürel kurgunun analizi. *Karadeniz Teknik Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi*.
- Bozkurt, A. Y., & Erdin, N. (2011). *Ağaç teknolojisi ders kitabı*. İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi.
- Coşkun, B., & Yardımlı, S. (2022). Endüstriyel ahşap malzemenin yapıda kullanımı: Cambridge Merkez Camisi. *Trakya Mimarlık ve Tasarım Dergisi*, 2(1), 20-34.
- Çavuş, Z., Kaya, M., & Bülbül, R. (2024). Çapraz lamine ahşap panellerin (CLT) ara katmanına uygulanan perforasyon işleminin levhaların ses yutma katsayısı değerlerine etkisinin incelenmesi. *Anadolu Orman Araştırmaları Dergisi*, 9(2), 75-81.
- Dickof, C., Holt, R., & Luthi, T. (2017). *Nail laminated timber: Canadian design and construction guide (v. 1.1)*. Surrey: Binational Softwood Lumber Council.
- Dündar, T. (2019). Bir Yapı Malzemesi Olarak Ahşap. *İstanbul Üniversitesi- Cerrahpaşa Orman Fakültesi*.
- Fernandez, A., Komp, J., & Peronto, J. (2020). Ascent - Challenges and advances of tall mass timber construction. *International Journal of High-Rise Buildings*, 9(3), 235-244.
- Fu, H., He, M., Alhaddad, W., & Shen, Z. (2024). Numerical simulation and design method of dowel-type timber joints connecting laminated veneer lumber. *Structures*, 62, 106172.
- Fu, Q., Xu, R., Kasal, B., Wei, Y., & Yan, L. (2024). Moisture-induced stresses and damage in adhesively bonded timber-concrete composite connection. *Construction and Building Materials*, 416.
- Görgün, H. V., & Ünsal, Ö. (2023). Yapısal ahşap - Rutubet ilişkisi. *bab Journal of Architecture and Design/bab Mimarlık ve Tasarım Dergisi*, 4(1).
- Gül, N., & Mayuk, S. G. (2019). Çağdaş Ahşap Yapım Sistemlerinin Çok Katlı Yapılarda Kullanımı: The Tree. *Kent Akademisi*, 12(3), 586-599.
- Gong, M. (2019). Lumber-based mass timber products in construction. IntechOpen.
- Hasan, K. M. F., Bak, M., Omer Ahmed, A. A., & Garab, J. (2023). Laminated strand lumber (LSL) potential of Hungarian and Central European hardwoods: A review. *European Journal of Wood and Wood Products*, 82(9), 1-20.
- Higgins, O., Danzig, I., Fitzgerald, B., Pelling, J., & Jahangiri, M. (2023). Tallwood 1: Lessons learned on completion

of Canada's first 12 storey timber-steel hybrid building. Presented at the World Conference on Timber Engineering, Oslo, Norway.

- Hiziroglu, S. (2009). Laminated veneer lumber (LVL) as a construction material. Oklahoma Cooperative Extension Service, Division of Agricultural Sciences and Natural Resources.
- Li, X., Yue, K., Zhu, L., Lv, C., Wu, J., Wu, P., Li, Q., Xu, C., & Sun, K. (2024). Relationships between wood properties and fire performance of glulam columns made from six wood species commonly used in China. *Case Studies in Thermal Engineering*, 54, 104029.
- Mayo, J. (2015). *Solid wood: Case studies in mass timber architecture, technology and design*. Routledge.
- Moradpour, P., Pirayesh, H., Gerami, M., & Jouybari, I. R. (2018). Laminated strand lumber (LSL) reinforced by GFRP: Mechanical and physical properties. *Construction and Building Materials*, 158, 236-242.
- Natural Resources Canada. (t.y.). *Dowel laminated timber*. Erişim Adresi <https://natural-resources.canada.ca/our-natural-resources/forests/industry-and-trade/forest-products-applications/taxonomy-wood-products/dowel-laminated-timber/23706>
- Oh, S. (2022). Experimental study of bending and bearing strength of parallel strand lumber (PSL) from Japanese larch veneer strand. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 50(4), 237-245.
- Parlak, S. (2020). Türk yaylarında kullanılan ağaç türleri ve özellikleri. *Ağaç Ve Orman*, 1(2), 25-34.
- Pereira, M. C. de M., Sohier, L. A. P., Descamps, T., & Calil Junior, C. (2021). Doweled cross laminated timber: Experimental and analytical study. *Construction and Building Materials*, 273, Article 121669.
- Porteous, J., & Kerami, A. (2013). *Structural timber design to Eurocode 5*. Wiley.
- Ramkumar, V. R., Anand, N., Prakash, V., Sujatha, D., & Murali, G. (2024). Experimental study on the performance of fiber-reinforced laminated veneer lumber produced using Melia dubia for structural applications. *Construction and Building Materials*, 417, 135325.
- Safarik, D., Elbrecht, J., & Miranda, W. (2022). *State of tall timber 2022*. Council on Tall Buildings and Urban Habitat s(CTBUH).
- Shi, B., Zhou, X., Tao, H., Yang, H., & Wen, B. (2024). Long-term behavior of timber-concrete composite structures: A literature review on experimental and numerical investigations. *Buildings*, 14(6), 1770.
- StructureCraft. (t.y.). *Çapraz lamine ahşap (DLT)*. Erişim adresi: <https://structurecraft.com/materials/mass-timber/dlt-dowel-laminated-timber>
- Tavşan, C., Tufan, A. Ş., & Tavşan, F. (2022). Ekolojik Malzeme Olan Ahşapla Yapılan Çok Katlı Yapılar. *Mimarlık ve Yaşam Dergisi*, 7,1.
- Tonyalı, Z., Alemdağ, E. L., & Tandoğan Kibar, G. (2024). Evaluation of seismic response of the cross-laminated timber (CLT) multi-storey residential building under the February 6, 2023, Kahramanmaraş earthquakes. *Mimarlık Bilimleri ve Uygulamaları Dergisi (MBUD)*, 41-63.
- Usta, İ. (2017). Ahşap: Fiziksel özellikler. *Mesleki Bilimler Dergisi*, 8(2), 92-115.
- Wang, Y., He, M., & Li, Z. (2024). Flexural behavior of glulam beams reinforced by bonded prestressing tendons. *Engineering Structures*, 315, 118436.
- Wang, Z., Zhou, J., Gong, M., Chui, Y. H., & Lu, X. (2023). Evaluation of modulus of elasticity of laminated strand lumber by non-destructive evaluation technique. *BioResources*, 18(2), 3115-3126.
- Wood, A., Safarik, D., Miranda, W., & Elbrecht, J. (2024). HoHo Wien. *International Journal of High-Rise Buildings*, 13(2), 177-186.
- [1] ProtectAqua: <https://protectaqua.com/Sayfa/1/Ahsap-Nedir-ve-Neden-Tercih-Edilir> adresinden alındı
- [2] (2021). Hemel: <https://www.hemel.com.tr/kereste-nedir-kontraplak-tanimi-ve-fiyatlari> adresinden alındı
- [3] (2020). Kalle Søe Machinery.: https://kallesoemachinery.com/app/uploads/2020/06/Glulam-bj%C3%A6lke_Laminated-wood-product.png adresinden alındı

- [4] (2020). Mayr-Melnhof Holz Holding AG.: https://www.mm-holz.com/fileadmin/_processed_/6/c/csm_csm_BSP_MMcrosslam_quer_Schatten_transHG-neu_fd790fa1b4.jpg adresinden alındı
- [5] (2019). Steico: https://www.steico.com/fileadmin/_processed_/c/d/csm_Product_Image_Total_STEICO_LVL_R_RGB_01.tif_web_b7e0f79db2.jpg adresinden alındı
- [6] Fastepp: <https://www.fastepp.com/concept-lab/material/parallel-strand-lumber-psl-4/> adresinden alındı
- [7] (2021). Research Gate: <https://www.researchgate.net/profile/Jitendra-Kumar-32/publication/354275966/figure/fig3/AS:1063204193042432@1630499041288/Parallel-Strand-lumber-63.ppm> adresinden alındı
- [8] (2020). Naturally Wood: <https://www.naturallywood.com/wp-content/uploads/DLT-with-dowels.jpeg> adresinden alındı
- [9] (2023). Cive: <https://cive.com/wp-content/uploads/2023/04/Nail-Laminated-Timber-1-1-1.png> adresinden alındı
- [10] https://www.bft-international.com/en/artikel/bft_Ecologically_optimized_timber-concrete_composite_floors_systems-3772160.html adresinden alındı
- [11] (2022). https://www.bft-international.com/en/artikel/bft_Ecologically_optimized_timber-concrete_composite_floors_systems-3772160.html adresinden alındı
- [12] (2024). Asce: <https://www.asce.org/publications-and-news/civil-engineering-source/civil-engineering-magazine/issues/magazine-issue/article/2024/01/mass-timber-hybrid-high-rise-in-milwaukee-sets-precedents> adresinden alındı
- [13,14] (2022). Bigsee: <https://bigsee.eu/hoho-wien/> adresinden alındı
- [15,16] (2022). Naturally Wood: <https://www.naturallywood.com/project/tallwood-1-at-district-56/> adresinden alındı
- [17,18] (2022). Archdaily: https://www.archdaily.com/989552/haut-amsterdam-residential-building-team-v-architecture?ad_medium=gallery adresinden alındı
- [19] (2023). Metalocus: <https://www.metalocus.es/en/news/incube-danone-research-innovation-centre-arte-charpentier> adresinden alındı
- URL 1 (2023). Archdaily: <https://www.archdaily.com/1002837/incube-danone-research-and-innovation-center-arte-charpentier> adresinden alındı
- URL 2 (2022). Arte C.: <https://www.arte-charpentier.com/fr/projets/centre-recherche-innovation-danone/> adresinden alındı
- URL 3 (2022). Eiffage c.: <https://www.eiffageconstruction.com/en/home/realisations/work-inner/liste-ouvrages/danone-in-cube.html> adresinden alındı
- URL 4 (2024). <https://www.wiehag.com/en/references/ascent-tower/>
- URL 5 (2024). <https://www.hoho-wien.at/en/information/>
- URL 6 (2024). <https://aspectengineers.com/portfolio/tallwood/>
- URL 7 (2024). <https://www.zoontjens.co.uk/projects/rooftop-paving/haut-amsterdam/>
- URL 8 (2024). <https://www.kgd-a.org/laureates/en/incube-the-new-research-innovation-center-of-danone>

Siber-Biyosuç: Sentetik Biyoloji ve Geleceğin Suçları

Cyber-Biocide: Synthetic Biology and Crimes of The Future

Fatma Altıntaş^{1*}, Atakan Konukbay², Ahmet Koluman³

^{1*} Pamukkale University, Department of Biomedical Engineering, Denizli, Turkey

² CBRN Product Management, HAVELSAN, Ankara, Turkey

³ Pamukkale University, Department of Biomedical Engineering, Denizli, Turkey

ÖZET

Bu makale, sentetik biyoloji ve siber suçların kesişimini ele alarak geleceğin suç potansiyellerini analiz etmektedir. Sentetik biyoloji, organizmaların yeni yeteneklerle yeniden tasarlanmasını içeren bir alandır ve hızla gelişen teknolojilerin yaygınlaşmasıyla yeni suç fırsatları doğurmaktadır. Siber-biyosuç, internet bağlantılı laboratuvarlar ve biyoteknoloji sistemlerinin kötü niyetli kullanımını içerir. Bu makale, biyolojik ayrımcılık, biyolojik kötü amaçlı yazılım, gen düzenleme ve evde yasadışı uyuşturucu üretimi gibi potansiyel suç örneklerini ele almakta ve önleme stratejileri üzerinde durmaktadır. Yasal düzenlemeler, uluslararası iş birliği, eğitim ve teknolojik güvenlik, gelecekteki suçların önlenmesinde kritik öneme sahiptir.

Anahtar Kelimeler: Sentetik biyoloji, Siber-biyosuç, Yasal düzenlemeler, Uluslararası iş birliği, Teknolojik güvenlik

ABSTRACT

This article, analyzes future crime potentials by addressing the intersection of synthetic biology and cybercrime. Synthetic biology is a field that involves the re-engineering of organisms with new capabilities, and the proliferation of rapidly developing technologies opens up new criminal opportunities. Cyber-biocrime involves the malicious use of internet-connected laboratories and biotechnology systems. This article discusses examples of potential crimes such as biological discrimination, biological malware, gene editing and illicit drug production at home, and focuses on prevention strategies. Legislation, international cooperation, education and technological security are critical to preventing future crimes.

Keywords: Synthetic biology, Cyber-biocide, Legal regulations, International cooperation, Technological security

Başvuru: 25.07.2024 Revizyon Talebi: 16.08.2024 Kabul: 24.08.2024
Doi: 10.51764/smutgd.1522515

^{1*}Sorumlu yazar: Pamukkale University, Faculty of Technology, Denizli, Turkey ; E-mail: fatma.altintas53@gmail.com; ORCID: 0000-0002-7871-1967

² E-mail: akonukbay@havelsan.com.tr ; ORCID: 0000-0003-2404-0253

³ E-mail: akoluman@pau.edu.tr ; ORCID: 0000-0001-5308-8884

1. GİRİŞ

Sentetik biyoloji, organizmaların yeniden tasarlanması ve yeni yeteneklere dönüştürülmesi sürecini içeren disiplinlerarası bir alan olarak tanımlanmaktadır. Bu alandaki hızlı teknolojik ilerlemeler, tıp, üretim ve tarım gibi pek çok sektörde çözümler sunma potansiyeline sahip olmakla birlikte, aynı zamanda siber suçlar gibi yeni riskleri de beraberinde getirmektedir (Elgabry vd., 2020; Murch vd., 2018). Biyolojik malzemelerin kullanılmasıyla gerçekleştirilen fiziksel süreçlerin, istenmeyen ve tehlikeli biyolojik sonuçlara yol açabileceği gerçeği göz önünde bulundurulmalıdır. Bu nedenle, sentetik biyoloji alanındaki ilerlemeler, bir yandan yararlı ve olumlu sonuçlar sunarken, diğer yandan da potansiyel suç fırsatları oluşturabileceği bilinciyle ele alınmalıdır (Mueller, 2021). Dünya genelindeki araştırmacılar ve şirketler, sentetik biyolojinin potansiyelini kullanarak sağlık sorunlarına çözümler bulma çabasındadır. Bu durum, sentetik biyolojinin daha önce sadece araştırma kurumlarında sınırlı kalan bir alandan, yaygın bir şekilde erişilebilir ve maliyeti düşük bir alana dönüşmesine yol açmıştır. Örneğin, insan genomunun dizilenmesi için önceden yüksek maliyetler gerektiren bir işlem, günümüzde daha uygun fiyatlı hale gelmiştir (NHGRI,2021).

Sentetik biyolojinin hızla yayılımı ve düşen maliyeti, aynı zamanda siber suçlar ve biyoteknolojinin kötüye kullanımı için de kapılar açmıştır. Tam otomatik ve internete bağlı laboratuvarlar, coğrafi sınırların ötesinde veri sömürüsü ve biyolojik materyallerin manipülasyonu için fırsatlar sunmaktadır (United Kingdom Government, 2019). Bu laboratuvarlar, düzenlemelerin daha gevşek olduğu bölgelerde deneyler yapmak için kullanılabilir gibi, bilgi güvenliği açıkları nedeniyle de risk taşımaktadır. Sentetik biyoloji ile gerçekleştirilecek suç örneklerine ilişkin öngörülen riskler arasında siber-biyosuç, biyolojik kötü amaçlı yazılımlar ve gen düzenlemesi bulunmaktadır. Siber-biyosuç, dijital ve biyolojik sistemlerin kesişiminden kaynaklanan yeni bir suç türüdür ve internete bağlı laboratuvarların güvenlik zafiyetlerinden yararlanmayı içermektedir (Elgabry vd., 2020; Murch vd., 2018; Richardson vd., 2019;). Biyolojik kötü amaçlı yazılımlar ise, bilgisayara uzaktan erişim sağlayarak biyolojik materyalleri manipüle etme potansiyeline sahiptir. Gen düzenleme teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte, kötü niyetli aktörler tarafından yasa dışı ilaç üretimi ve evde gen düzenleme gibi suçlarda artma potansiyeline sahiptir. Özellikle tasarım bebekler gibi onaylanmamış ve düzenlenmemiş genetik iyileştirmeler, etik ve güvenlik açısından ciddi riskler taşımaktadır (Richardson vd., 2019; Prangono & Arabo, 2021).

Bu çalışma, sentetik biyoloji ve siber suçlar arasındaki önemli bağlantıları ortaya koymayı ve gelecekteki suçların tanınmasını ve önlenmesini sağlamayı hedeflemektedir. Ayrıca, bu alandaki güvenlik önlemlerinin, ulusal düzeyde politikalar ve iş birlikleriyle etkin bir şekilde şekillendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Çünkü siber-biyosuçlar, uluslararası çapta ciddi sonuçlar doğurabilecek ve toplumları derinden etkileyebilecek potansiyele sahiptir. Sonuç olarak, makale, bu önemli konuya dikkat çekmeyi, politika yapıcılarını, uzmanları ve araştırmacıları bu alanda daha fazla çalışmaya teşvik etmeyi amaçlamaktadır. Bu inceleme, sentetik biyoloji ile ilişkili olan ve gelecekte meydana gelebilecek potansiyel suç örneklerini belirlemeyi ve bunları önlemek için alınabilecek önlemleri tartışmayı amaçlamaktadır. Siber güvenlik, biyoteknolojinin kötüye kullanımına karşı büyüyen tehdidi ele almakta ve siber ile biyoloji arasında ortaya çıkan riskleri yönetmek için politikaların geliştirilmesini savunmaktadır (CellPress, 2016).

1.1 Sentetik Biyoloji ve Kavramsal Tanımı

Sentetik biyoloji, organizmaların genetik materyallerinin tasarımı ve değiştirilmesi yoluyla yeni işlevler kazandırılmasını hedefleyen multidisipliner bir alandır. Bu disiplin, genetik mühendislik, moleküler biyoloji, bilgisayar bilimi ve biyoinformatik gibi çeşitli bilim alanlarını içermektedir. Sentetik biyoloji, biyolojik sistemleri anlama ve manipüle etme potansiyeli sayesinde birçok sektörde çeşitli uygulamalar sunmaktadır (Mueller, 2021; Murch vd., 2018; Richardson vd., 2019).

1.2 Sentetik Biyolojinin Yaygınlaşması ve Etkileri

Son yıllarda sentetik biyoloji, teknolojiye hızlı ilerlemeler ve maliyetlerin düşmesiyle giderek daha yaygın hale gelmiştir. İnsan genomunun dizilenmesinin maliyetinin azalması, bir zamanlar sadece uzman kurumlar tarafından yapılan çalışmaların artık daha erişilebilir hale gelmesini sağlamıştır. Bu durum, sentetik biyolojinin daha geniş bir kullanıcı kitlesi tarafından benimsenmesine ve popülerleşmesine yol açmıştır. Sentetik biyolojinin yaygınlaşması, birçok alanda önemli etkiler yaratmıştır. Tıp alanında, hastalıkların teşhis ve tedavisinde kullanılan genetik testler ve terapiler geliştirilmesi mümkün olmuştur. Tarım ve gıda sektöründe ise, bitkilerin genetik yapıları değiştirilerek daha verimli ve dayanıklı ürünler elde edilebilir hale

gelmiştir. Aynı zamanda, biyoteknoloji sayesinde endüstriyel süreçler daha çevre dostu ve verimli hale getirilmiştir (Elgabry, 2020; Richardson vd., 2019).

1.3 Siber Suçlar ve Sentetik Biyoloji Arasındaki İlişki

Sentetik biyolojinin ilerlemesi, aynı zamanda siber suçlarla ilişkilendirilebilecek yeni riskleri de beraberinde getirmiştir. Siber suçlar, bilgisayar sistemlerini hedef alarak veri sızdırma, manipülasyon ve çalma gibi faaliyetleri içeren suçlar olarak tanımlanmaktadır. Sentetik biyolojinin internete bağlı laboratuvarlar aracılığıyla kullanılabilir hale gelmesi, siber suçların biyolojik materyalleri manipüle etme ve biyolojik kötü amaçlı yazılımların kullanılmasıyla ilişkilendirilebileceği anlamına gelmektedir (Cummings vd., 2021; Peccoud, 2016; Trump vd., 2021). Özellikle, tam otomatik ve internete bağlı laboratuvarlar, siber saldırılar için yeni bir hedef oluşturabilir. Bu laboratuvarlar, düzenlemelerin daha gevşek olduğu bölgelerde faaliyet gösterebilir ve bilgi güvenliği açıklarından yararlanılabilir. Ayrıca, biyolojik kötü amaçlı yazılımlar, biyolojik materyalleri manipüle etmek ve organizmaların işlevlerini değiştirmek amacıyla kullanılabilir (Hamilton vd., 2021; Malsch, & Espona, 2021; Novossiolova, 2021).

2. SENTETİK BİYOLOJİ VE POTANSİYEL SUÇ FIRSATLARI

2.1 Biyolojik Ayrımcılık ve Mahremiyet Riskleri

Sentetik biyolojiden elde edilen büyük miktardaki biyolojik veriler, potansiyel olarak mahremiyet ve güvenlik risklerini beraberinde getirmektedir. Biyolojik verilerin toplanması, depolanması ve analiz edilmesi, kişisel ve sağlıkla ilgili hassas bilgiler içerir. Bu verilerin kötüye kullanımı, bireylerin özel bilgilerinin ifşa edilmesine, ayrımcılığa ve kişisel mahremiyetin ihlaline neden olabilir. Örneğin, sağlık sigortacıları, genomik verilere dayanarak kişilerin hastalık risklerini değerlendirebilir ve buna göre primlerini belirleyebilirler. Bu da biyolojik ayrımcılığa yol açabilir ve bireylerin sigorta koşullarını olumsuz yönde etkileyebilir (Elgabry, 2020; Richardson vd., 2019; Prangono, & Arabo, 2021).

2.2 Siber-Biyosuç ve İnternet Bağlantılı Laboratuvarlar

Günümüzde sentetik biyoloji laboratuvarları giderek daha fazla internet bağlantılı hale gelmektedir. Bu durum, laboratuvarlardaki ekipman ve süreçlerin dijital ağlar üzerinden uzaktan yönetilebilmesini sağlamaktadır. Ancak bu bağlantılar, siber suçların biyolojik materyaller üzerindeki kötü amaçlı etkilerini artırmaktadır. Siber-biyosuç, internet bağlantılı laboratuvarları hedef alarak biyolojik materyallerin manipülasyonunu ve çalınmasını içerebilir. Örneğin, düşman devletler, bilgisayar korsanları vasıtasıyla bir ülkedeki araştırma laboratuvarlarını hedef alarak değerli biyolojik verileri çalabilir ve başka yerlerde kullanabilirler (Novossiolova vd., 2021; Peccoud, 2016).

2.3 Biyolojik Kötü Amaçlı Yazılım ve Veri Hırsızlığı

Biyolojik kötü amaçlı yazılımlar, organizmaların genetik yapılarını değiştirme veya işlevlerini etkileme amacıyla tasarlanan zararlı yazılımlardır. Bu tür kötü amaçlı yazılımlar, gen düzenleme araçlarının internet bağlantılı laboratuvarlarda kullanılmasıyla potansiyel bir risk oluşturur. Bu yazılımlar, biyolojik materyallerin içine sızabilir ve organizmaların işlevlerini istenmeyen şekillerde değiştirerek ciddi biyolojik sonuçlara yol açabilir. Aynı zamanda, biyolojik veri hırsızlığı da büyük bir tehdittir. Biyolojik materyaller ve genetik veriler, değerli araştırmaların temelini oluşturur ve bu verilerin çalınması, bilimsel ilerlemenin engellenmesine ve ticari kazanç sağlamak isteyen kötü niyetli kişilerin eline geçmesine yol açabilir (Cummings vd., 2021; Peccoud, 2016; Trump vd., 2021).

2.4 Kötü Niyetli Biyolojik Korsanlık ve Gen Düzenleme

Gen düzenleme teknolojilerinin kolaylaşmasıyla, "biohacker" olarak adlandırılan bireylerin kendi başlarına genetik düzenlemeler yapma potansiyeli artmıştır. Bu, potansiyel olarak kötü niyetli bireylerin gen düzenleme araçlarını kullanarak yasa dışı faaliyetlere girişmesine olanak tanır. Kötü niyetli biyolojik korsanlık, belirli kişilere yönelik genetik düzenlemeler yaparak onları finansal olarak sömürmek veya zarar vermek amacıyla gerçekleştirilebilir. Aynı zamanda, tasarım bebekler gibi onaylanmamış ve düzenlenmemiş genetik iyileştirmeler sağlayan karaborsalar da ortaya çıkabilir. Bu tür kötü amaçlı gen düzenlemeleri, etik ve hukuki açıdan önemli sorunlar doğurabilir ve insan sağlığını ciddi şekilde tehlikeye atabilir (Cummings vd., 2021; Hamilton vd., 2021).

2.5 Evde Yasadışı Uyuşturucu Üretimi ve Karaborsalar

Sentetik biyolojinin yaygınlaşmasıyla, evde yasadışı uyuşturucu üretimi konusunda yeni fırsatlar ortaya çıkmıştır. Biohackerlar, gen düzenleme tekniklerini kullanarak yeni psikoaktif maddeler yaratabilir ve yasadışı ilaçlar üretebilir. Bu tür uyuşturucu üretimi, merkezi otoritelerin kontrolü dışında gerçekleştirilebilir ve uyuşturucu kaçakçılığını kolaylaştırabilir. Kötü niyetli bireyler, karaborsalarda yasadışı ilaç satışı yapabilir ve bu tür faaliyetlerden yararlanarak ticari kazanç elde edebilirler. Bu durum, sağlık ve güvenlik risklerini artırabilir ve toplumda tehlikeli sonuçlar doğurabilir (Malsch & Espona, 2021; Novossiolovala vd., 2021).

3. SENTETİK BİYOLOJİDE SUÇ ÖNLEME VE TESPİT STRATEJİLERİ

Sentetik biyolojinin potansiyel suç fırsatlarına yönelik önleme ve tespit stratejileri, multidisipliner bir yaklaşım gerektirir. Hem bilim insanları hem de güvenlik uzmanları, sentetik biyolojinin gelişimini takip ederek potansiyel suçların tanınmasında iş birliği yapmalıdır. Bu bölümde, sentetik biyolojide suç önleme ve tespitine yönelik bazı stratejiler ele alınmaktadır (Adler vd., 2021; Cummings vd., 2021; Malsch & Espona, 2021).

3.1 Biyoteknoloji ve Siber Güvenlik Uzmanlarının İş Birliği

Sentetik biyolojiyle ilgili suç önleme ve tespit stratejileri, bilim insanları ve siber güvenlik uzmanları arasındaki iş birliğini içermelidir. Biyoteknoloji uzmanları, sentetik biyoloji alanındaki gelişmeleri takip ederek potansiyel suç fırsatlarını belirlemeye yardımcı olabilirler. Aynı zamanda, siber güvenlik uzmanları da internet bağlantılı laboratuvarlardaki güvenlik açıklarını tespit ederek siber saldırılara karşı önlemler alabilirler. Bilim insanları ile güvenlik uzmanlarının birlikte çalışması, sentetik biyolojideki suç potansiyelini azaltmaya yardımcı olabilir (Appleton, & Millett, 2021; Jin, & Linkov, 2021; Nieuwenweg vd., 2021).

3.2 Biyolojik Malzemelerin İzlenmesi ve Güvenliği

Biyolojik malzemelerin izlenmesi ve güvenliği, potansiyel suçların önlenmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Biyolojik malzemelerin hareketini ve kullanımını izlemek, kötü niyetli faaliyetleri tespit etmede yardımcı olabilir. Biyolojik malzemelerin laboratuvar dışına çıkışı ve girişi sıkı bir şekilde kontrol edilmelidir. Ayrıca, laboratuvarlarda biyolojik materyallerin güvenli bir şekilde saklandığından ve yetkisiz erişime karşı korunduğundan emin olunmalıdır (Barbato, 2021; Nelson vd., 2021; Rhodes & Lentzos, 2021).

3.3 Genetik Verilerin Güvenliği ve Mahremiyetin Korunması

Sentetik biyolojiyle ilgili önemli bir konu, genetik verilerin güvenliği ve mahremiyetidir. Genetik verilerin çalınması veya kötüye kullanılması, bireylerin özel bilgilerinin ifşa edilmesine ve biyolojik ayrımcılığa neden olabilir. Bu nedenle, genetik verilerin güvenli bir şekilde saklandığından ve yetkisiz kişilerin erişimine karşı korunduğundan emin olunmalıdır. Ayrıca, genetik verilerin kullanımıyla ilgili etik kuralların ve yasal düzenlemelerin uygulanması da önemlidir (Florin & Trump, 2021.; Murch & Linkov, 2021).

3.4 Eğitim ve Farkındalık Oluşturma

Sentetik biyolojideki suç potansiyelini azaltmanın bir yolu da eğitim ve farkındalık oluşturmaktır. Hem bilim insanları hem de genel halk, sentetik biyolojinin potansiyel suçlara yönelik risklerini anlamalı ve bu konuda bilinçlenmelidir. Bilim insanları, güvenlik uzmanları ve diğer paydaşlar, sentetik biyolojiyle ilgili suç önleme ve tespit stratejilerini halka açıklamalı ve eğitim programları düzenlemelidir. Bu sayede, potansiyel suçlarla mücadelede daha etkili bir toplumsal bilinç oluşabilir (Murch vd., 2018; Nelson vd., 2021).

3.5 Ulusal ve Uluslararası İş Birliği

Sentetik biyolojideki suç potansiyelini önlemek ve tespit etmek için ulusal ve uluslararası düzeyde iş birliği önemlidir. Ülkeler, sentetik biyolojiyle ilgili suçlarla mücadelede birlikte çalışmalı ve bilgi paylaşımını teşvik etmelidir. Uluslararası düzeyde siber-biyogüvenlik politikaları ve standartlar oluşturmak, potansiyel suçların önlenmesinde ve uluslararası suçluların tespit edilmesinde etkili olabilir. Aynı zamanda, uluslararası iş birliği, yeni suç fırsatlarının ortaya çıktığı coğrafi ve kültürel çeşitlilik dikkate alınarak daha kapsamlı ve etkili bir suç önleme stratejisi oluşturulmasına katkı sağlayabilir (Appleton & Millett, 2021; Barbato, 2021). Bu stratejiler, sentetik biyolojiyle ilgili suçları önlemeye ve tespit etmeye yönelik olarak multidisipliner bir yaklaşımın benimsenmesini vurgulamaktadır. Biyoteknoloji uzmanları, siber güvenlik uzmanları, bilim insanları ve diğer paydaşlar, sentetik biyolojinin etik ve güvenli bir şekilde kullanılmasını sağlamak için birlikte çalışmalı ve toplumsal fayda odaklı bir yaklaşım benimsemelidirler. Ancak sürekli gelişen teknolojik ortamda suç önleme

ve tespit stratejilerinin sürekli olarak güncellenmesi ve iyileştirilmesi de önemlidir. Bu sayede, gelecekteki suçların tanınması ve önlenmesi için proaktif bir yaklaşım benimsenmiş olur (Murch vd., 2018; Nelson vd., 2021).

4. SENTETİK BİYOLOJİ VE GELECEKTEKİ SUÇLARIN TANINMASI

Sentetik biyoloji alanındaki hızlı gelişmeler ve teknolojinin yaygınlaşması, gelecekte yeni suç fırsatlarının ortaya çıkmasına neden olacaktır. Bu bölümde, sentetik biyolojinin gelecekteki suçlar açısından potansiyel riskleri ve tanınması gereken önemli konular ele alınacaktır.

4.1 Biyoteknolojinin Hızlı Gelişimi ve Suç Potansiyeli

Sentetik biyoloji alanındaki hızlı teknolojik gelişmeler, yeni suç fırsatlarının ortaya çıkmasına neden olacaktır. Özellikle DNA sentezi teknolojisinin gelişmesi ve maliyetinin düşmesi, biyolojik malzemelerin kolaylıkla elde edilmesini ve manipüle edilmesini sağlamaktadır. Bu durum, genetik mühendislik ve biyolojik düzenlemelerin kötü niyetli amaçlarla kullanılma olasılığını artırmaktadır (Lewis & Linkov, 2020; Peccoud vd., 2018; Richardson vd., 2019).

4.2 Genetik Şantaj ve Manipülasyon Tehlikesi

Gelecekte, genetik verilerin daha yaygın bir şekilde toplanması ve saklanması beklenmektedir. Bu durum, genetik verilerin kötü niyetli kişilerin eline geçme riskini artırabilir. Genetik şantaj, bir bireyin DNA bilgilerinin gasp edilerek onunla ilgili tehdit veya manipülasyon yapılması durumunu ifade eder. Özellikle kişisel bilgilerin çalınması ve genetik verilerin internet üzerinden kötüye kullanılması, insanları potansiyel risklere karşı savunmasız hale getirebilir (George, 2019; Millett vd., 2019).

4.3 Artan İnternet Bağlantılı Laboratuvarların Güvenliği

İleriki yıllarda internet bağlantılı laboratuvarların sayısında artış beklenmektedir. Bu laboratuvarlar, uzaktan erişim ve otomasyon sayesinde coğrafi sınırları aşan deneylerin yapılmasına imkan tanırken, aynı zamanda siber saldırılara karşı da açık hale gelebilirler. Siber-biyosuç, internet bağlantılı laboratuvarların güvenliğine yönelik risklerin arttığı bir alandır. Bu tür laboratuvarların güvenliğinin sağlanması, potansiyel suçların önlenmesinde kritik bir rol oynayacaktır (Appleton & Millett, 2021; Murch & Linkov, 2021; Rhodes & Lentzos, 2021).

4.4 Biyolojik Terör Tehdidi

Biyolojik terör tehdidi, günümüzde teknolojik gelişmelerin hızlanması ve biyoteknoloji alanında yapılan ilerlemelerle artan bir endişe kaynağıdır. Sentetik biyoloji, genetik mühendislik ve biyolojik düzenlemeler gibi alanlardaki ilerlemeler, insanlara zarar verme potansiyeline sahip patojenlerin ve mikroorganizmaların oluşturulması veya modifiye edilmesiyle sonuçlanabilir. Bu tür kötü niyetli eylemler biyolojik terör saldırıları olarak adlandırılır.

Biyolojik terör saldırıları, biyolojik ajanların (virüsler, bakteriler, zehirli maddeler vb.) kullanılmasıyla gerçekleştirilen ve insan sağlığına ve toplum düzenine ciddi zararlar verebilecek eylemlerdir. Bir biyolojik terör saldırısının sonuçları, özellikle doğru tedbirler alınmadığı takdirde, oldukça yıkıcı ve yayılabilir nitelikte olabilir (CellPress, 2016; Trump, 2021;).

Sentetik biyoloji ve genetik mühendislik, bilimsel ve tıbbi ilerlemeler için oldukça faydalı olmakla birlikte, yanlış ellerde kullanıldığında ciddi tehditler oluşturabilir. Örneğin, mevcut patojenlerin genetik yapıları üzerinde değişiklikler yaparak daha virülan ve dirençli hale getirilebilirler. Böylece, mevcut aşuların veya ilaçların etkisiz kalmasına ve hastalıkların yayılmasına yol açabilirler. Bu nedenle, biyoteknoloji alanındaki gelişmelerin yakından takip edilmesi ve bu teknolojilerin güvenli kullanımını sağlamak için düzenlemelerin sıkılaştırılması gereklidir. Araştırmacılar ve bilim insanları, etik kurallara uygun şekilde çalışmalarını sürdürerek potansiyel kötüye kullanımları önlemeye katkı sağlamalıdır.

Biyolojik terör tehdidine karşı alınacak önlemler, erken uyarı sistemlerinin ve izleme mekanizmalarının geliştirilmesiyle başlar. Potansiyel saldırıları önceden tespit ederek önlem almak, büyük salgınların ve acil durumların önüne geçebilir. Ayrıca, biyolojik ajanların depolanması ve kullanımı konusunda sıkı kontroller uygulanması, bu tür tehditlerin oluşmasını engellemeye yardımcı olabilir (Elgabry, 2020; Peccoud, 2016).

Halkın ve sağlık çalışanlarının bilinçlendirilmesi de biyolojik terör saldırılarına karşı alınacak önlemlerde

önemli bir rol oynar. Acil durum planları hazırlamak, hızlı ve etkili tepki verme yeteneğini arttırabilir. Bu gibi hazırlıklar, saldırı sonrası etkilerin en aza indirilmesine ve toplumun güvenliğinin sağlanmasına yardımcı olabilir. Son olarak, uluslararası iş birliği ve bilgi paylaşımı da biyolojik terör tehdidiyle mücadelede önemli bir faktördür. Bu tür saldırıların sınır tanımaz nitelikte olması nedeniyle ülkeler arasındaki iş birliği ve koordinasyon, daha etkili ve kapsamlı önlemlerin alınmasına yardımcı olabilir.

Biyolojik terör tehdidi, bilgi ve teknolojiadaki hızlı ilerlemelerle birlikte devam edecek bir risktir. Ancak bilinçli ve koordineli bir şekilde önlemler alındığında, bu tür tehditlerin etkisi minimize edilebilir ve toplumların güvenliği korunabilir (Adler vd., 2021; Jin & Linkov, 2021).

4.5 Sosyal ve Etik Sorunlar

Sentetik biyolojinin gelişimi, sosyal ve etik sorunları da beraberinde getirecektir. Özellikle genetik mühendislik ve gen düzenleme gibi teknolojilerin etik sınırlarının belirlenmesi zor olabilir. Tasarım bebekler, genetik iyileştirmeler ve biyolojik kötü amaçlı yazılım gibi konular, toplumda etik tartışmaları tetikleyebilir ve potansiyel suçların kökenini oluşturabilir. Bu tür sosyal ve etik sorunların belirlenmesi ve ele alınması, gelecekteki suçların önlenmesinde önemli bir adım olacaktır (Nieuwenweg vd., 2021).

Sentetik biyoloji alanındaki gelişmeler, potansiyel suçların tanınması ve önlenmesi için sürekli bir dikkat ve özen gerektirmektedir. Bilim insanları, güvenlik uzmanları ve toplumun diğer paydaşları, bu alandaki gelişmeleri yakından takip ederek, yeni suç fırsatlarına karşı etkili önlemler almalı ve toplumu bilinçlendirmelidir. Aynı zamanda, ulusal ve uluslararası iş birliğiyle sentetik biyolojinin güvenli ve etik kullanımı sağlanabilir ve gelecekteki suçların önüne geçilebilir (Appleton & Millett, 2021; Barbato, 2021; Rhodes & Lentzos 2021).

5. SUÇ ÖNLEME VE MÜCADELE STRATEJİLERİ

Gelecekteki suçların önlenmesi ve mücadele edilmesi için etkili stratejiler geliştirmek, sentetik biyoloji ve siber-biyosuç alanlarında önemli bir zorluktur. Bu bölümde, suç önleme ve mücadele için önerilen bazı stratejiler ele alınacaktır.

5.1 Yasal Düzenlemeler ve Denetimler

Sentetik biyolojinin hızla gelişmesi, mevcut yasal düzenlemelerin bu alana yetişmesini zorlaştırmıştır. Bu nedenle, gelecekteki suçların önlenmesi ve toplumun güvenliğinin sağlanması için, ulusal ve uluslararası düzeyde uygun yasal düzenlemeler ve denetimler yapılması gerekmektedir. Yasal düzenlemelerin sentetik biyoloji ve siber-biyosuç alanlarını kapsayan bir çerçeve sunması önemlidir. Genetik mühendislik ve biyolojik düzenlemeler gibi teknolojilerin etik sınırlarını belirlemek, potansiyel suçların önlenmesinde kritik bir rol oynar. Yasal düzenlemeler, bu teknolojilerin kötü niyetli kullanımını önlemek için etkili önlemler içermelidir. Ulusal ve uluslararası düzeyde uyumlu yasal düzenlemelerin oluşturulması için iş birliği önemlidir. Ülkeler arası iş birliği ve bilgi paylaşımı, sentetik biyoloji ve siber-biyosuç alanlarında karşılaşılan potansiyel risklerin daha iyi anlaşılmasına ve etkili denetim mekanizmalarının oluşturulmasına katkı sağlar (Florin & Trump, 2021.; Murch & Linkov, 2021). Uluslararası düzeyde oluşturulacak standartlar ve kılavuzlar, ülkelerin kendi yasal düzenlemelerini belirlerken bir temel oluşturabilir. Bununla birlikte, yasal düzenlemelerin sadece teknolojik unsurlarla sınırlı kalmaması önemlidir. Özellikle sentetik biyoloji gibi yeni ve potansiyel riskler taşıyan alanlarda, etik değerler ve toplumsal kabul önemlidir. Yasal düzenlemeler, etik komiteler ve toplumsal paydaşlarla birlikte oluşturulmalı ve gelecekteki suçları önlemeye yönelik stratejiler içermelidir (Barbato, 2021; Peccoud vd., 2018). Aynı zamanda, internet bağlantılı laboratuvarların güvenliğini sağlamak için de etkili yasal düzenlemeler yapılmalıdır. Bu laboratuvarlarda kullanılan yazılımların güvenliği ve siber saldırılara karşı korunması önemlidir. Yasal düzenlemeler, laboratuvarların güvenliğini artırmak için uygun denetim mekanizmaları ve güvenlik standartları içermelidir. Sonuç olarak, sentetik biyoloji ve siber-biyosuç alanlarında gelecekteki suçların önlenmesi ve toplumun güvenliğinin sağlanması için uygun yasal düzenlemeler ve denetimler büyük önem taşır. Yasal düzenlemelerin etik sınırların belirlenmesi, kötü niyetli kullanıma karşı önlemler alınması ve laboratuvarların güvenliğinin sağlanması gibi konuları kapsamaması, bu alanda etkin bir mücadele için gereklidir. Ulusal ve uluslararası iş birliği ve toplumsal paydaşlarla birlikte yürütülen çalışmalar, sentetik biyoloji alanındaki potansiyel risklerin önlenmesine ve toplumun güvenliğinin sağlanmasına önemli katkılar yapacaktır (Millett vd., 2019).

5.2 Ulusal ve Uluslararası İş Birliği

Suç önleme ve mücadelede etkili bir şekilde çalışabilmek için ulusal ve uluslararası düzeyde iş birliği önemlidir. Farklı ülkeler, akademisyenler, bilim insanları ve güvenlik uzmanları arasında bilgi ve istihbarat paylaşımı, gelecekteki suçların tanınması ve önlenmesi açısından kritik bir rol oynar. Uluslararası iş birliği, sentetik biyoloji ve siber-biyosuç alanlarında karşılaşılan potansiyel risklerin daha iyi anlaşılmasına ve etkili denetim mekanizmalarının oluşturulmasına katkı sağlar. Uluslararası düzeyde iş birliği, ortak stratejilerin geliştirilmesine ve uygulanmasına olanak tanır. Farklı ülkelerdeki sentetik biyoloji araştırmaları ve laboratuvarlarında yaşanan deneyimlerin paylaşılması, bu alanda karşılaşılan potansiyel suçların daha iyi anlaşılmasına yardımcı olur. Bu iş birliği sayesinde, ortak riskler belirlenir ve bunlara karşı etkili önlemler alınabilir. Bilgi ve istihbarat paylaşımı, sentetik biyoloji ve siber-biyosuç alanlarında karşılaşılan tehditlerin zamanında tespit edilmesine yardımcı olur. Böylece, potansiyel suçların tanınması ve önlenmesi için daha hızlı ve etkili adımlar atılabilir. Uluslararası iş birliği sayesinde, farklı ülkelerdeki güvenlik uzmanları ve yetkililer, sentetik biyoloji alanında gerçekleşen gelişmeleri ve potansiyel riskleri izleyebilir, ortak bir anlayış oluşturabilir ve güvenlik politikalarını buna göre şekillendirebilir (Florin & Trump, 2021; Murch & Linkov, 2021). Uluslararası anlaşmalar ve iş birliği mekanizmalarının geliştirilmesi, sentetik biyoloji ve siber-biyosuç alanlarında etkili bir suç önleme ve mücadele stratejisi oluşturulmasına yardımcı olur. Bu anlaşmalar, farklı ülkeler arasında ortak hedeflerin belirlenmesine ve bu hedeflere ulaşmak için koordineli çalışmalara imkân tanır. Böylece, sentetik biyoloji alanında gerçekleşen gelişmelerin toplumlar için güvenli ve sorumlu bir şekilde kullanılması sağlanabilir. Sonuç olarak, ulusal ve uluslararası düzeyde iş birliği, sentetik biyoloji ve siber-biyosuç alanlarında gelecekteki suçların önlenmesi ve toplumun güvenliğinin sağlanması için kritik öneme sahiptir. Bilgi ve istihbarat paylaşımı, ortak stratejilerin geliştirilmesi ve uluslararası anlaşmalar sayesinde, sentetik biyoloji alanındaki potansiyel riskler daha etkili bir şekilde izlenerek, toplumun güvenliği ve refahı korunabilir. Bu nedenle, tüm paydaşların ulusal ve uluslararası düzeyde iş birliği içinde çalışması ve sentetik biyoloji alanında etkili suç önleme ve mücadele stratejilerinin geliştirilmesi önemlidir (George, 2019; Lewis & Linkov, 2020; Richardson vd., 2019).

5.3 Eğitim ve Farkındalık Oluşturma

Toplumun genelinde sentetik biyoloji ve siber-biyosuç konularına ilişkin farkındalık düzeyinin artırılması önemlidir. Bu konuda eğitim kurumları, kamu kurumları ve medyanın rolü büyük öneme sahiptir. Eğitim kurumları, sentetik biyoloji ve siber-biyosuç hakkında bilinçlendirme programları düzenleyerek, öğrencilerin ve genç araştırmacıların bu alanlardaki etik ve güvenlik konularını anlamalarına yardımcı olabilir (Jin & Linkov, 2021; Nieuwenweg vd., 2021). Aynı zamanda, halka yönelik bilgilendirme etkinlikleri ve seminerler düzenlemek, geniş kitlelerin bu konularda bilinçlenmesini sağlayabilir. Kamu kurumları da toplumda farkındalık oluşturmak için önemli bir rol oynar. Kamu kurumları, sentetik biyoloji ve siber-biyosuç hakkında bilgilendirici materyaller hazırlayarak, vatandaşların potansiyel riskler konusunda bilinçlenmelerini sağlayabilir. Ayrıca, halka açık etkinlikler ve kampanyalar düzenlemek, toplumun bu konulardaki farkındalık düzeyini arttırmak için etkili bir yöntem olabilir (Florin & Trump, 2021; Murch vd., 2018). Medya da bu konuda etkili bir araçtır. Haberler, makaleler ve televizyon programları aracılığıyla, sentetik biyoloji ve siber-biyosuç konularına ilişkin güvenilir bilgi ve haberlerin yayınlanması, halkın bu alanlardaki gelişmeler hakkında bilgi sahibi olmasına katkı sağlar. Medyanın doğru ve tarafsız bilgi verme sorumluluğu, toplumun bilinçlenmesi ve potansiyel risklerin fark edilmesi açısından kritik bir rol oynar. Bunun yanı sıra, bilim insanları ve güvenlik uzmanları arasında multidisipliner eğitim ve iş birliğinin teşvik edilmesi de önemlidir. Sentetik biyoloji ve siber-biyosuç alanlarında çalışan uzmanlar, farklı disiplinlerden gelen bilim insanlarıyla bir araya gelerek, bu konulardaki gelişmeleri daha etkili bir şekilde izleyebilir ve değerlendirebilirler (Murch & Linkov, 2021). Birlikte çalışarak, potansiyel risklerin belirlenmesi ve gelecekteki suçların önlenmesi için daha güçlü bir ekip oluşturulabilir. Sonuç olarak, sentetik biyoloji ve siber-biyosuç alanlarında potansiyel suçların önlenmesi ve toplumun güvenliğinin sağlanması için eğitim ve farkındalık oluşturma çabaları büyük önem taşır. Eğitim kurumları, kamu kurumları, medya ve uzmanlar arasındaki iş birliği, toplumun bu konulardaki bilgi düzeyini arttırabilir ve potansiyel riskleri önceden fark etmeye yardımcı olabilir. Tüm paydaşların aktif katılımı ve iş birliği, sentetik biyoloji ve siber-biyosuç alanlarında güvenli ve etik bir ortamın oluşturulmasına ve toplumun gelecekteki suçlara karşı daha güvenli olmasına katkı sağlayacaktır (Lewis & Linkov, 2020).

5.4 Etik Komiteler ve İzleme Mekanizmaları

Sentetik biyoloji alanında çalışan araştırmacılar ve bilim insanları, etik komiteler ve izleme mekanizmaları ile iş birliği yapmalıdır. Etik komiteler, araştırma ve geliştirme süreçlerinde etik standartların korunmasına ve kötü niyetli kullanıma karşı önlemlerin alınmasına yardımcı olabilir. Bu komiteler, sentetik biyoloji teknolojisinin etik kurallara uygun bir şekilde kullanılmasını teşvik ederek, potansiyel riskleri önceden tanımaya ve önlemeye yardımcı olur. Araştırmaların etik açıdan değerlendirilmesi, bilimsel toplumun güvenini sağlamak ve toplumun refahını korumak açısından önemlidir. Ayrıca, sentetik biyoloji alanındaki araştırmaları izlemek ve potansiyel suçları tanımak için etkili izleme mekanizmalarının oluşturulması önemlidir. Bu mekanizmalar, araştırma laboratuvarlarında ve endüstriyel tesislerde kullanılacak sentetik biyoloji teknolojilerinin kullanımını takip edebilir ve izleyebilir. Bu sayede, yasadışı veya kötü niyetli kullanıma ilişkin şüpheli aktiviteler tespit edilebilir ve önlem alınabilir. Aynı zamanda, izleme mekanizmaları, potansiyel risklerin belirlenmesine ve gelecekteki suçların önlenmesine yardımcı olabilir (Novossiolova vd., 2021). Etik komiteler ve izleme mekanizmaları arasında sıkı bir iş birliği, sentetik biyoloji alanındaki etik ve güvenlik standartlarının sürekli olarak güncellenmesine yardımcı olabilir. Bu iki mekanizma, yeni tehditlere karşı duyarlılık geliştirmek ve teknolojik gelişmeleri yakından takip etmek için düzenli olarak bir araya gelmeli ve bilgi paylaşımında bulunmalıdır. Ayrıca, uluslararası iş birliği, farklı ülkelerdeki etik kuralların ve izleme mekanizmalarının uyumlaştırılmasına yardımcı olabilir ve sentetik biyoloji alanında küresel bir etik çerçeve oluşturabilir (Jin & Linkov, 2021). Sonuç olarak, sentetik biyoloji alanında potansiyel suçların önlenmesi ve toplumun güvenliğinin sağlanması için etik komitelerin ve izleme mekanizmalarının etkin bir şekilde kullanılması büyük önem taşır. Etik standartların korunması, potansiyel risklerin belirlenmesi ve teknolojik güvenlik önlemlerinin alınması, sentetik biyoloji teknolojisinin sorumlu ve etik bir şekilde kullanılmasına katkı sağlayacaktır. Tüm paydaşların iş birliği içinde çalışması ve etik kurallara uygun bir şekilde davranması, sentetik biyoloji alanının olumlu etkilerinin artırılmasına ve potansiyel risklerin minimize edilmesine yardımcı olacaktır (Elgabry, 2020; Hamilton vd., 2021; Prangono & Arabo, 2021).

5.5 Teknolojik Güvenlik ve Veri Koruma

Gelecekteki suçların önlenmesi için teknolojik güvenlik ve veri koruma önlemleri almak kritik öneme sahiptir. Özellikle internet bağlantılı laboratuvarlar ve biyoteknoloji sistemlerinin güvenliği sağlanmalıdır. Kötü niyetli yazılımların ve siber saldırıların önüne geçmek için etkili güvenlik önlemleri alınmalı ve verilerin korunması sağlanmalıdır. Teknolojik güvenlik önlemleri, sentetik biyoloji alanındaki laboratuvarlarda kullanılan yazılım ve donanımların güvenliğini sağlamayı içerir. Bu önlemler, laboratuvarlara yetkisiz erişimi önlemek, bilgisayar ağlarını korumak ve siber saldırılara karşı dayanıklılığı artırmak için alınabilir. Laboratuvarlardaki bilgisayar sistemlerinin güvenlik duvarlarıyla korunması ve giriş-çıkışların sıkı bir şekilde izlenmesi, kötü niyetli kişilerin laboratuvar içindeki verilere erişimini engelleyebilir. Ayrıca, biyoteknoloji sistemlerinin güvenliği de büyük önem taşır. Bu sistemlerin internete bağlı olması, kötü niyetli kişilerin uzaktan erişim sağlaması ve siber saldırılara maruz kalması potansiyel riskler arasındadır. Bu nedenle, biyoteknoloji şirketleri ve araştırma laboratuvarları, bu sistemlerin güvenliğini sağlamak için güçlü şifreleme teknolojileri, kimlik doğrulama protokolleri ve güvenli veri depolama yöntemleri kullanılmalıdır. Veri koruma önlemleri de sentetik biyoloji alanında önemli bir role sahiptir. Araştırma verilerinin ve bilgilerinin korunması, bilimsel bilginin ve ticari sırların güvenliğini sağlamak açısından kritik öneme sahiptir. Veri depolama ve aktarım süreçlerinde güvenlik protokolleri kullanılmalı ve bilgilerin yetkisiz kişilerin eline geçmesini önlemek için gerekli tedbirler alınmalıdır. Bunun yanı sıra, sentetik biyoloji alanındaki güvenlik ve veri koruma önlemlerinin sürekli olarak güncellenmesi ve geliştirilmesi gerekmektedir. Teknolojideki hızlı değişim ve siber saldırı yöntemlerindeki sürekli ilerleme, güvenlik önlemlerinin etkinliğini sürdürmek için sürekli bir çaba gerektirir. Bu nedenle, güvenlik uzmanları, araştırmacılar ve endüstri temsilcileri arasında iş birliği ve bilgi paylaşımı teşvik edilmelidir. Tüm bu teknolojik güvenlik ve veri koruma önlemlerinin bir araya gelerek uygulanması, sentetik biyoloji alanındaki potansiyel suçların önlenmesine ve toplumun güvenliğinin sağlanmasına yardımcı olacaktır. Böylece, bu hızla gelişen alanda gelecekte ortaya çıkabilecek suçlara karşı güçlü bir savunma mekanizması oluşturulabilir ve sentetik biyoloji teknolojisinin pozitif etkileri, toplumun refahı için en iyi şekilde kullanılabilir (Florin & Trump, 2021; Peccoud vd., 2018; Richardson vd., 2019).

6. SONUÇ

Sentetik biyolojinin ilerlemesi, yeni suç türlerinin ortaya çıkmasının yanı sıra, kötü niyetli kişilerin fırsatları değerlendirmesini de beraberinde getirmektedir. Bu nedenle, sentetik biyoloji alanında faaliyet gösteren tüm paydaşların suç önleme ve mücadele stratejilerine odaklanması kritik öneme sahiptir. Öncelikli olarak, ulusal ve uluslararası düzeyde yasal düzenlemelerin oluşturulması ve uygulanması gereklidir. Bu düzenlemeler, sentetik biyolojiyle ilişkili suçları tanımlamak ve etkin bir şekilde cezalandırmak için gerekli önlemleri içermelidir. Ayrıca, bu düzenlemeler, bilimsel araştırmaların etik ve güvenlik standartlarına uygun olarak yürütülmesini sağlamak için de önemli bir rol oynamaktadır. Teknolojik güvenlik önlemleri de sentetik biyolojiyle ilişkili suçların önlenmesinde kritik bir unsurdur. Biyogüvenlik ve veri koruma önlemleri, kötü niyetli kişilerin sentetik biyoloji teknolojilerini kötü amaçlarla kullanmasını engellemeye yardımcı olabilir. Aynı zamanda, bu önlemler, bilgi ve materyal akışlarını izlemeyi ve gerektiğinde müdahale etmeyi mümkün kılarak potansiyel suçları tespit etmeye yardımcı olabilir. Toplumda farkındalık oluşturma ve eğitim de suç önleme ve mücadele stratejilerinin etkili bir parçasıdır. Halkın sentetik biyoloji hakkında bilgilendirilmesi, potansiyel riskleri ve etik konuları anlamalarına yardımcı olabilir. Aynı zamanda, bilinçli ve bilgili bir toplum, kötü amaçlı faaliyetlere karşı daha duyarlı olabilir ve yetkililere şüpheli durumları bildirme konusunda daha istekli olabilir. Bunun yanı sıra, etik komitelerin kurulması ve izleme mekanizmalarının oluşturulması da önemlidir. Bu komiteler ve mekanizmalar, sentetik biyoloji uygulamalarının etik ve güvenlik standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmesini sağlamak için denetim yapabilir ve gerekirse düzeltici önlemler alabilir. Son olarak, sentetik biyoloji alanındaki gelişmelerin dikkatle takip edilmesi ve öngörülemez risklerin önüne geçilmesi için sürekli bir bilgi paylaşımı ve iş birliği gereklidir. Bilim insanları, akademisyenler, endüstri temsilcileri ve hükümetler arasında etkili bir iletişim ağı kurulması, potansiyel suçların tanınması ve önlenmesine yardımcı olabilir. Tüm bu stratejilerin bir araya gelerek uygulanması, sentetik biyoloji alanındaki potansiyel suçların önlenmesinde ve toplumun güvenliğinin sağlanmasında önemli bir rol oynayacaktır. Böylece, sentetik biyoloji teknolojilerinin olumlu yönleri maksimum fayda sağlarken, potansiyel riskler en aza indirilebilir ve toplumun refahı korunabilir.

KAYNAKLAR

- Adler, A., Beal, J., Lancaster, M., & Wyschogrod, D. (2021). Cyberbiosecurity and Public Health in the Age of COVID-19. Emerging Threats of Synthetic Biology and Biotechnology: Addressing Security and Resilience Issues, 103-115.
- Appleton, E., & Millett, P. (2021). Technical Aspects of Biosecurity: Screening Guidance, Attribution, and Traceability. Emerging Threats of Synthetic Biology and Biotechnology. NATO Science for Peace and Security, 141-167.
- Barbato, R. A. (2021). The Soil Habitat and Considerations for Synthetic Biology. Emerging Threats of Synthetic Biology and Biotechnology: Addressing Security and Resilience Issues, 169-175.
- CellPress (2016). Synthetic biology used to limit bacterial growth and coordinate drug release.
- Cummings, C. L., Volk, K. M., Ulanova, A. A., Lam, D. T. U. H., & Ng, P. R. (2021). Emerging Biosecurity Threats and Responses: A Review of Published and Gray Literature. Emerging Threats of Synthetic Biology and Biotechnology: Addressing Security and Resilience Issues, 13-36.
- Elgabry, M., (2020). Written evidence submitted by Mariam Elgabry to the United Kingdom Biosecurity and National Security Joint Committee. Retrieved from <https://committees.parliament.uk/writtenevidence/6854/pdf/>
- Elgabry, M., Nesbeth, D., & Johnson, S. D. (2020). A systematic review of the criminogenic potential of synthetic biology and routes to future crime prevention. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 8, 1119. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.01119>
- Florin M.V., & Trump B.D.(2021). Conclusions on cyberbiosecurity governance. In B.D.Trump, et al.(Eds.), *Emerging threats of synthetic biology and biotechnology: Addressing security and resilience issues* (pp. 221-228). Springer Nature.
- George, A. M. (2019). The national security implications of cyberbiosecurity. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 7, 51.
- Hamilton, R. A., Mampuy, R., Galaiti, S. E., Collins, A., Istomin, I., Ahteensuu, M., & Bakanidze, L. (2021).

- Opportunities, Challenges, and Future Considerations for Top-Down Governance for Biosecurity and Synthetic Biology. *Emerging Threats of Synthetic Biology and Biotechnology: Addressing Security and Resilience Issues*, 37-58.
- Jin, A., & Linkov, I. (2021). Synthetic Biology Brings New Challenges to Managing Biosecurity and Biosafety. *Emerging Threats of Synthetic Biology and Biotechnology: Addressing Security and Resilience Issues*, 117-129.
- Lewis, S.M., & Linkov I.(2020). Cyberbiosecurity: A call for cooperation in a new threat landscape.*Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 8, 1119. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.01119>
- Malsch, I., & Espona, M. (2021). Responsible Governance of Biosecurity in Armenia. *Emerging Threats of Synthetic Biology and Biotechnology: Addressing Security and Resilience Issues*, 67-80.
- Millett, K., Dos Santos, E., & Millett, P. D. (2019). Cyber-biosecurity risk perceptions in the biotech sector. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 7, 136.
- Mueller, S. (2021). Facing the 2020 pandemic: What does cyberbiosecurity want us to know to safeguard the future?. *Biosafety and health*, 3(1), 11-21. <https://doi.org/10.1186/s42522-021-00032-8>
- Murch R.S., & Linkov I.(2021). Cyberbiosecurity risk assessment framework.In B.D.Trump, et al.(Eds.), *Emerging threats of synthetic biology and biotechnology: Addressing security and resilience issues* (pp. 207-220). Springer Nature.
- Murch, R. S., So, W. K., Buchholz, W. G., Raman, S., & Peccoud, J. (2018). Cyberbiosecurity: an emerging new discipline to help safeguard the bioeconomy. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 39.<https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2017.10.012>
- Nelson, C., Adiguzel, I., Florin, M. V., Lentzos, F., Knutsson, R., Rhodes, C., ... & Vergin, A. (2021). Foresight in Synthetic Biology and Biotechnology Threats. *Emerging Threats of Synthetic Biology and Biotechnology: Addressing Security and Resilience Issues*, 177-194.
- NHGRI. (N.d.). (2021). The cost of sequencing a human genome. Retrieved from <https://www.genome.gov/about-genomics/fact-sheets/Sequencing-Human-Genome-cost>. (Erişim 20.05.2024)
- Nieuwenweg, A.C., et al. (2021). Emerging biotechnology and information hazards.In B.D.Trump, et al.(Eds.), *Emerging threats of synthetic biology and biotechnology: Addressing security and resilience issues* (pp. 131-140). Springer Nature.
- Novosiolova, T., Kuiken, T., DeCoste, J., Henry, L., Malsch, I., Merad, M., ... & Waskow, A. (2021). Addressing emerging synthetic biology threats: the role of education and outreach in fostering effective bottom-up grassroots governance. *Emerging Threats of Synthetic Biology and Biotechnology: Addressing Security and Resilience Issues*, 81-102.
- Peccoud, J. (2016). Synthetic Biology: fostering the cyber-biological revolution. *Synthetic Biology*, 1(1), ysw001.. <https://doi.org/10.1093/synbio/ysw001>
- Peccoud, J., Gallegos, J. E., Murch, R., Buchholz, W. G., & Raman, S. (2018). Cyberbiosecurity: from naive trust to risk awareness. *Trends in biotechnology*, 36(1), 4-7.<https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2017.10.012>
- Prangono, B. ve Arabo, A. (2021). COVID-19 pandemik siber güvenlik sorunları. *İnternet Teknolojisi Mektupları*, 4 (2), e247.<https://doi.org/10.1002/itl2.247>
- Retrieved from <https://www.sciencedaily.com/releases/2016/06/160630135852.htm>
- Rhodes, C., & Lentzos F.(2021). Governance challenges for emerging technologies with dual-use potential.In B.D.Trump, et al.(Eds.), *Emerging threats of synthetic biology and biotechnology: Addressing security and resilience issues* (pp. 193-206). Springer Nature.
- Richardson, L. C., Connell, N. D., Lewis, S. M., Pauwels, E., & Murch, R. S. (2019). Cyberbiosecurity: a call for cooperation in a new threat landscape. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 7, 451363.<https://doi.org/10.3389/fbioe.2019.00099>
- Trump, B. D., Florin, M. V., Perkins, E., & Linkov, I. (2021). Emerging threats of synthetic biology and biotechnology: addressing security and resilience issues.. <https://doi.org/10.1007/978-94-024-2086-9>
- United Kingdom Government (2019). Future technology trends in security. Retrieved from <https://www.gov.uk/government/publications/future-technology-trends-in-security>

İnteraktif Mekân Kurgulu Akıllı Evlerin Hasta Bakımındaki Rolü

Smart Homes With Interactive Space Role In Patient Care

Yağmur SÖKER^{1*}, Fatma Ceyda GÜNEY YÜKSEL²

^{1*}Haliç Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İç Mimarlık Ana Bilim Dalı, İstanbul, Türkiye

²Haliç Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, İç Mimarlık Bölümü, İstanbul, Türkiye

ÖZET

Teknolojinin hızla ilerlemesi, nüfusun artması ve viral hastalıkların tehlikesi sağlık hizmetlerinin ev ortamında daha etkin ve sürdürülebilir bir şekilde sunulmasını gerektirmektedir. Akıllı ev teknolojileri ve interaktif mekân kurguları, bu ihtiyaca yanıt vermede önemli bir rol oynamaktadır. İnteraktif mekânlar, kullanıcı ile sürekli etkileşim halinde olan ve kullanıcının ihtiyaçlarına göre şekillenen dinamik ortamlar olarak tanımlanır. Bu mekânlarda kullanılan bağlantı ve fiziksel teknolojiler, kullanıcıların sağlık durumlarını sürekli izlemek ve gerekli müdahaleleri zamanında yapmak amacıyla tasarlanmaktadır. Sensörler, yapay zeka ve IoT (nesnelerin interneti) gibi ileri teknolojiler, bu mekânların temel bileşenlerini oluşturmaktadır. Akıllı evler, yaşam kalitesini artıran ve günlük yaşamı kolaylaştıran teknolojilerle donatılmış konutlardır. İnteraktif mekân kurgulu akıllı evler, kullanıcıların sağlık ve güvenlik ihtiyaçlarını karşılamak için özelleştirilmiş çözümler sunmaktadır. Bu evlerde kullanılan mekân kurgusu, kullanıcıların hareketlerini ve davranışlarını analiz ederek, ihtiyaçlarına uygun çözümler sunmaktadır. İnsan-mekân ilişkisi bu bağlamda kritik bir rol oynar, kullanıcıların evle olan etkileşimleri, sağlık durumlarının izlenmesi ve gerekli önlemlerin alınması açısından önemlidir. Hasta bakımında interaktif mekân kurgulu akıllı evler, yaşlı ve hasta bireylerin bağımsız yaşamlarını sürdürmelerine yardımcı olmaktadır. Bununla birlikte, bu teknolojilerin kullanımında güvenlik ve mahremiyet konuları da önemli bir yer tutmaktadır. Kullanıcı verilerinin korunması ve gizliliğin sağlanması, teknolojinin benimsenmesi açısından kritik öneme sahiptir. Gelecek perspektiflerinde, interaktif mekân kurgulu akıllı evlerin sağlık hizmetleri üzerindeki etkisinin daha da artacağı öngörülmektedir. Teknolojinin ilerlemesi ile birlikte, bu evlerin sunduğu hizmetlerin çeşitliliği ve kalitesi de artmaktadır. Sonuç olarak, interaktif mekân kurgulu akıllı evler, sağlık hizmetlerinin daha erişilebilir ve etkili bir şekilde sunulmasını sağlayarak, hasta bakımında bağımsızlık açısından önemli bir rol oynamaktadır. Örnek olarak Peloponez Üniversitesi'nden araştırmacıların uyguladığı bir prototip incelenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Etkileşimli, Teknoloji, Hasta, İnteraktif Mekan, Akıllı Ev.

ABSTRACT

The rapid advancement of technology, population growth and the threat of viral diseases require more effective and sustainable delivery of healthcare services in the home environment. Smart home technologies and interactive spaces play an important role in responding to this need. Interactive spaces are defined as dynamic environments that constantly interact with the user and are shaped according to the user's needs. The connectivity and physical technologies used in these spaces are designed to continuously monitor the health status of the users and make the necessary interventions in a timely manner. Advanced technologies such as sensors, artificial intelligence and IoT (Internet of Things) are the key components of these spaces. Smart homes are residences equipped with technologies that improve quality of life and facilitate daily life. Smart homes with interactive spatial design offer customized solutions to meet the health and safety needs of users. The spatial design used in these homes analyzes the movements and behaviors of the users and offers solutions that meet their needs. The human-space relationship plays a critical role in this context, and users' interactions with the home are important for monitoring their health status and taking necessary precautions. Smart homes with interactive spaces in patient care help elderly and sick individuals to maintain their independent lives. However, security and privacy issues also play an important role in the use of these technologies. Protecting user data and ensuring privacy is critical for technology adoption. In future perspectives, the impact of smart homes with interactive spaces on healthcare is expected to increase. With the advancement of technology, the variety and quality of services offered by these homes are also increasing. As a result, smart homes with interactive spatialization play an important role in patient care independence by making healthcare services more accessible and effective. As an example, a prototype implemented by researchers from the University of Peloponnese is examined.

Keywords: Interactive, Technology, Patient, Interactive Space, Smart Home.

Başvuru: 28.07.2024 Kabul: 25.08.2024

Doi: 10.51764/smutgd.1523487

^{1*}Sorumlu yazar: Haliç Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İç Mimarlık Ana Bilim Dalı, İstanbul, Türkiye; E-mail: soker.yagmur@hotmail.com; ORCID: 0009-0001-7756-036X

² E-mail: fatmaceydayuksel@halic.edu.tr ORCID: 0000-0002-9281-8285

1. GİRİŞ

Teknolojinin hızlı gelişimiyle birlikte, yaşam tarzlarımızda ve günlük rutinlerimizde önemli değişiklikler yaşanmaktadır. Akıllı ev sistemleri, geleneksel evlerin işlevselliğini ve konforunu önemli ölçüde artırmaktadır. Ancak, akıllı ev teknolojisi sadece konfor ve güvenlik sağlamakla kalmayıp aynı zamanda sağlık ve bakım alanında da önemli bir rol üstlenmektedir.

Akıllı evler, birbirleriyle ilişkili bir dizi yazılım ve donanımla donatılmış olup, sakinlerinin yaşam alanını izlemek ve anlamak için birlikte çalışan bileşenlerden oluşmaktadır. Nüfus arttıkça, kişisel ve daha güvenli bakıma olan ihtiyaç artmaktadır, bu da hastaneden evde bakıma geçişi gerektirmektedir. Akıllı evler, özellikle yaşlı hastalar, demans hastaları veya kendilerine eşlik edecek bakıcıları olmayan engelli hastalar için hastane ziyaretlerini azaltabilmektedir. Bu evler, hastaların daha bağımsız yaşamalarını destekleme potansiyeline sahip olmaktadır (Li & Boryck, 2019).

Akıllı teknolojilerin kullanımı güvenlik hissini artmasına ve korku ile endişenin azalmasına neden olmaktadır. Akıllı ev otomasyonu aynı zamanda hasta kişilerin ilaç alma, su içme, diş fırçalama gibi günlük görevlerini hatırlamalarını, kontrolünü ve daha bağımsız hareket etmelerini sağlar. Bu teknoloji, hastalarda fonksiyonel bağımsızlık duygusunu artırmayı ve yaşam kalitesini iyileştirmeyi amaçlamaktadır (Pal, Triyason, & Funilkul 2017). Yaşlı bireyler veya kronik hastalıkları olan kişiler için, günlük bakım ve takip süreçleri hayati öneme sahip olmaktadır. İnteraktif mekân kurgulu akıllı evler, bu ihtiyaçları karşılamak üzere çeşitli teknolojilerden faydalanarak tasarlanmaktadır. Sağlık hizmetlerini ve hasta bakımını optimize etmek için çeşitli teknolojik özelliklerle donatılan bu evler, sensörler, yapay zeka algoritmaları ve internet bağlantı teknolojileri gibi özelliklerle donatılmaktadır. Bu sayede, yaşlı bireylerin ve hasta olan kişilerin yaşam kalitesini artırırken aynı zamanda sağlık durumlarını daha etkin bir şekilde takip etmelerine yardımcı olmaktadır.

Akıllı evler genellikle birçok sensörü uygun konumlara yerleştirerek bir çevre izleme sistemi sağlar. Bu sensörler sadece hasta nüfusa değil, genel olarak evde yaşayan herkese yöneliktir. Sensörler hastaların fizyolojik ihtiyaçlarını karşılamayı ve onlara bir güven hissi vermek amacıyla tasarlanmıştır. Bu izleme sistemleri genellikle tıbbi acil durumlarda kullanışlı olmaktadır (Brandt & Salminen, 2009). İnteraktif mekân kurgulu akıllı ev, yaşlı, engelli veya kronik hastalıklardan muzdarip insanlar için özel olarak tasarlanmaktadır. Temel amacı, bu bireylerin bağımsız bir şekilde yaşam sürmelerine olanak tanımadır. Evlerin tasarımları, günlük yaşamı kolaylaştırmak, sağlık durumunu izlemek ve acil durumlarda müdahale etmek için gelişmiş teknolojik özelliklerle donatılmaktadır. Örneğin, sensörler sayesinde hareket algılama ve düşme tespiti gibi durumlar izlenebilmekte, akıllı cihazlar aracılığıyla sağlık verileri toplanabilmekte ve uzaktan takip edilebilmektedir. Bu evler, kullanıcılarına güvenli, rahat ve bağımsız bir yaşam sunarak yaşam kalitesini artırmayı hedeflemektedir.

2. MATERYAL ve METOT

Makalede, interaktif mekân kurgulu akıllı evlerin hasta bakımındaki rolünü incelemek için literatür taraması ve örnek vaka analizi yöntemleri kullanılmıştır. Öncelikle, sensörler, yapay zeka ve IoT (Nesnelerin İnterneti) gibi ileri teknolojilerin sağlık hizmetlerinde nasıl kullanıldığına dair mevcut araştırmalar incelenmiştir. Yunanistan'da yapılan bir prototip akıllı ev uygulaması örnek olarak değerlendirilmiş ve bu teknolojilerin pratikte hasta bakımına nasıl entegre edildiği araştırılmıştır. Veri toplama süreçlerinde, kullanıcıların hareket ve davranışlarını izlemek için kullanılan sensörlerin etkinliği analiz edilmiş, verilerin güvenliği ve mahremiyetine yönelik alınan önlemler değerlendirilmiştir. Bu yöntemler, akıllı evlerin sağlık hizmetlerinin erişilebilirliğini ve etkinliğini nasıl artırdığını anlamaya yönelik bir analiz sunmaktadır.

2.1. İnteraktif Mekân

İngilizce kökenli olan İnteraktif kelimesi, Türkçe'de etkileşimli olarak geçmektedir. Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte, mimari ve tasarım alanlarında interaktif kavramı sıkça kullanılmaktadır.

Etkileşimli terimi, Türk Dil Kurumu sözlüğüne göre "Birbirini karşılıklı olarak etkileme işi" anlamına gelmektedir (TDK, 2024). Bu kavram, insanlar ile çevreleri veya teknolojik sistemler arasındaki karşılıklı etkileşimi ifade eder ve genellikle kullanıcıların bir sisteme müdahale etmesini ve sistemden yanıt almasını içermektedir.

İnteraktif mekân ve hesaplamalı tasarım kavramı, bilişim teknolojilerindeki gelişmelerin etkisiyle ortaya çıkan yenilikçi bir tasarım anlayışını yansıtmaktadır. Bu tasarım anlayışı, deneyim, ihtiyaç ve işlev değişikliklerine göre veri kullanarak uyum sağlayan ve yeni verilere imkân tanıyan bir yapıdadır. Bilimsel keşifler, mimarlık alanında mekân kavramının statik bir yapıdan çıkarak değişebilir, dönüşebilir ve esnek bir tanıma evrildiğini ortaya

koymaktadır (Imperiale, 2000).). İnteraktif mekân, dinamik ve esnek yapısıyla, sürekli ihtiyaçlara yanıt verebilen ortamlar yaratma ve bu ortamları geliştirme konusunda hızlı ve etkili bir araç olarak öne çıkmaktadır. Bu mekanlar, değişen ihtiyaçlara göre kendilerini fiziksel olarak yeniden yapılandırabilen alanlar ve nesnelere olarak tanımlanmaktadır (Söker, 2024).

İnteraktif mekân sadece çevresine uyum sağlamakla kalmaz, aynı zamanda kullanıcılarla aktif bir diyalog kurmayı da amaçlar. Teknoloji kullanılarak, mekân sürekli olarak veri toplar ve bu verileri analiz ederek kullanıcı ihtiyaçlarına göre uyum sağlar. Tasarımcılar, bu talepleri anlayarak ve mekân bileşenlerinin uyarlanabilir konfigürasyonlarını oluşturarak interaktif mekanın davranışını şekillendirirler (Schueler, 2010). Mimarlar ve tasarımcılar, insanlarla etkileşim halinde olan mekanlar yaratmak için teknolojik araçlardan yararlanarak, insanların duyuşsal ve fiziksel ihtiyaçlarını karşılayan alanlar oluşturmaktadır.

2.1.1. İnteraktif mekânlarda kullanılan teknoloji

İnteraktif mekânlar, kullanıcıların mekân ve çevreleriyle sürekli etkileşimde buldukları alanlardır. Bu mekânlar, kullanıcılara daha iyi bir deneyim sunmak ve fayda sağlamak amacıyla çeşitli teknolojilerden yararlanmaktadır.

Etkileşimli sistemlerin en yaygın biçimde kullanıldığı ve birçok diğer etkileşimli sistemin temelini oluşturan işletim sistemleri ve programlar, özellikle bilgi teknolojilerinin gelişmesiyle büyük ilerlemeler kaydetmiştir. Bilgisayarların teknolojik olarak gelişmesi, bu sistemlerin hazırlanması ve geliştirilmesinde önemli bir rol oynamıştır (Arabacıoğlu & Aytıs, 2016).

Büyük Veri: Büyük veri, bilgisayar ve internet ortamında üretilen büyük miktarda verinin işlenmesi için geliştirilen teknolojileri kapsar. Sağlık alanında büyük veri, IoT, yapay zeka, artırılmış gerçeklik ve sanal gerçeklik gibi teknolojilerle kullanılır. Evde sağlık hizmetlerinde üretilen veriler, özellikle elektronik sağlık kayıtlarında önemlidir. Dijital sağlık, mobil cihazlar, dijital sensörler ve tele-sağlık gibi veri üreten sistemleri içerir. Bu veriler doğru şekilde işlendiğinde hizmetlerin görünürlüğünü artırır, yasal kayıtların oluşturulmasına yardımcı olur ve bilimsel çalışmalar için değerli bir kaynak sağlar (Doğan Merih, 2018; Gonzalez Jimenez, 2018; Hintistan & Çilingir, 2012).

Nesnelerin İnterneti: Günümüzde internet, sosyal yaşantımızın ayrılmaz bir parçası olmuştur. Elektronik ve yazılım alanlarındaki gelişmelerle adreslenebilir cihazların sayısı hızla artmaktadır. Bu cihazların bir ağa bağlanarak veri toplaması ve analiz yapması, Nesnelerin İnterneti (IoT) olarak adlandırılmaktadır (Çavdar & Öztürk, 2017).

LTE: Dördüncü nesil hücreşel ađ teknolojisi olan LTE, mobil cihazların veri ağlarına erişimini sağlar. LTE, paket anahtarlamalı bir ađ yapısı kullanarak yeni bir radyo erişim teknolojisi oluşturmayı hedefler (Dahlman, Parkvall, & Sköld, 2013).

5G: Hücreşel iletişim sistemleri, birinci nesilden başlayarak sürekli gelişmiştir. Günümüzde beşinci nesil sistemler (5G), yüksek hızlı veri iletimi, düşük gecikme süreleri ve geniş bant genişliği gibi özelliklerle evdeki akıllı cihazların daha verimli çalışmasını sağlamaktadır (Turer & Yılmaz, 2022).

VLC: Mobil ağların yüksek enerji tüketimi, küresel düzeyde çözüm bekleyen bir sorundur. İşletmeler, çevreye duyarlı ve karbon salımını azaltan iletişim sistemleri geliştirmeyi hedeflemektedir (Kimyacı & Çürük, 2020).

GPS: İnsanlar tarih boyunca nerede olduklarını bilme ihtiyacı duymuşlardır ve bu merak konum belirleme sistemlerinin geliştirilmesine yol açmıştır. En yaygın olarak kullanılan konum belirleme sistemi GPS teknolojisidir. GPS alıcıları, GPS uydularından yayılan sinyalleri alarak kendi konumlarını hesaplar (Özdemir, 2019).

Geo-fence: Dünya üzerindeki her nesnenin belirli bir konumu vardır. Geofencing teknolojileri, belirli bir coğrafi konumu analiz etmek için GPS (coğrafi bilgi sistemleri) ve RFID (radyo frekansı ile tanımlama) gibi teknolojilerden yararlanır (Feyiz, 2022).

NFC: Yakın alan iletişimi sağlayan bu teknoloji, iki elektronik cihazın kısa mesafede, yüksek frekansta ve düşük bant genişliğinde haberleşmesini mümkün kılar (Özdenizci, Aydın, & Coşkun, 2016).

BLE: Düşük güç tüketimi sayesinde birçok kablosuz haberleşme uygulamasında tercih edilen Bluetooth haberleşme yöntemi, özellikle pil ile çalışan akıllı ev sistemlerine bağlı çevre birimlerinde yaygın olarak kullanılır (Yazıcı, 2022)

Yapay Zeka: Yapay zeka, yüksek bilişsel fonksiyonlar ve otonom davranışlar sergileyebilen bir yazılım türüdür. Algılama, öğrenme, düşünme, problem çözme, dış dünyayla iletişim kurma, sık yapılan uygulamaları belirleme ve karar verme gibi insana özgü yetenekleri içermektedir. Ayrıca, düşüncelerini fiziksel tepkilerle ifade edebilmelidir

(Atasoy, 2008).

Mikrodenetleyiciler: Açık kaynak kodlu ve kullanıcı ihtiyaçlarına göre geliştirilebilen cihazlar olan mikrodenetleyiciler, yazılım dünyasında başlayan açık kaynak kodlu sistemlerin bir devamı olarak ortaya çıkmıştır. Endüstri 4.0 dönemiyle birlikte, bu cihazlar etkileşimli ürün ve mekan tasarımında yaygın bir şekilde kullanılabilir hale gelmiştir. Arduino ve Raspberry Pi gibi mikrodenetleyiciler, etkileşimli tasarımların gerçekleştirilmesinde sıklıkla tercih edilmektedir (Özdemir & Arabacıoğlu, 2022).

Sensörler: Sensör teknolojisi, fiziksel özellikleri ölçen ve diğer cihazlara ileten cihazlardır. Çevresel faktörleri, hareketi, basıncı, sıcaklığı, nemi, manyetizmayı, ışığı, sesi ve diğer özellikleri ölçebilirler. Teknolojik sensörler, interaktif mekânlarda kullanıcıların hareketlerini, seslerini ve dokunuşlarını algılayarak dijital arayüzlerde veya fiziksel tepkilerde kullanılır. Örneğin, bir hareket sensörü bir kullanıcının mekâna girdiğini algılayarak dijital bir ekranı açabilir; dokunmatik sensörler ise kullanıcının dokunuşunu algılayarak interaktif duvar veya zemin tepkileri sağlayabilir (Söker, 2024).

-Biyometrik Sensörler: Biyometri, antik Yunanca "bios" (yaşam) ve "metron" (hesaplama) kelimelerinden türetilmiştir (Soyjaudah, Ramsawock, & Khodabacchus, 2013). Biyometrik veriler, bireylerin fizyolojik veya davranışsal özelliklerini temsil eder. Parmak izi, yüz tanıma, iris tarama ve ses tanıma gibi benzersiz biyometrik özellikler kimlik doğrulama amacıyla kullanılır. Akıllı evlerde biyometrik sensörler, güvenlik sistemlerinde yetkilendirme, fiziksel erişim kontrolü ve kimlik doğrulama için kullanılmaktadır.

Akıllı Telefon ve Tabletler: Akıllı telefonlar ve tabletler, akıllı ev sistemlerinin merkezi kontrol noktaları olarak işlev görür. Bu cihazlarla, aydınlatma, ısıtma, soğutma, güvenlik kameraları ve kapı kilitleri gibi özellikler uzaktan kontrol edilebilir. Kişiselleştirilmiş uygulamalar sayesinde kullanıcılar, ev sistemlerini ayarlayabilir, bildirimler alabilir ve enerji tasarrufu yapabilmektedir.

Dokunmatik Ekranlar: Dokunmatik ekranlar, ev sahiplerine evlerindeki çeşitli akıllı cihazları kontrol etmek, yönetmek ve izlemek için bir arayüz sunar. Bu cihazlar, ev sahiplerinin farklı odalardaki aydınlatma, ısıtma, havalandırma, güvenlik kameraları, kapı ve pencere kilitleme sistemleri gibi akıllı ev cihazlarını yönetmesine olanak tanımaktadır.

Artırılmış Gerçeklik (AR): Artırılmış gerçeklik (AR) teknolojisi, bilgi teknolojilerindeki gerçeklik ve sanallık ilişkisini bir araya getirir. Bu teknoloji, günlük yaşamı kolaylaştırmak için gerçek dünyaya entegre edilen tasarımları önemli öğeler haline getirmektedir. AR'nin temel özelliklerinden biri, etkileşimli bir gerçeklik sunmasıdır, bu nedenle kullanıcı etkileşimi genel deneyimde kilit bir rol oynar (Sözer & Satıcı, 2022).

Sanal Gerçeklik (VR): Sanal gerçeklik teknolojileri, sağlık çalışanlarının hastalıkları veya diğer sağlık sorunlarını teşhis etmesinde, tıp ve sağlık hizmetleri alanındaki eğitimlerde, hasta eğitimlerinde, rehabilitasyon süreçlerinde ve egzersiz yaptırma gibi birçok alanda kullanılabilir (Whende, 2020).

Sesli ve Yüz Tanıma Teknolojisi: Biyometri tabanlı tanıma sistemleri, insanların fiziksel ve davranışsal özelliklerini kullanarak otomatik tanıma gerçekleştiren sistemlerdir. Bu sistemler, ses, yüz, parmak izi, kulak, avuç içi, DNA, iris, imza ve yürüyüş gibi ayırt edici nitelikleri içerir (Akın, 2019).

Giyilebilir Teknolojiler: Giyilebilir teknoloji, kişinin üzerinde taşıdığı veya giydiği elektronik cihazları ifade eder ve sensörlerle kişisel verileri toplar, geri bildirim sağlar (Önder, 2021). Gelişen giyilebilir teknolojiler, takılar, kıyafetler ve vücuda yerleştirilen ürünlerle sağlığı izleme, hastalıkları önceden haber verme, tedavi sürecini takip etme ve yaşam kalitesini artırma işlevi görür (Stavropoulos, Papastergiou, Mpaltadoros, Nikolopoulos, & Kompatsiaris, 2020).

2.2. Akıllı Ev

Teknolojinin ve bilginin sürekli ilerlemesi, lüks yaşam standartları ve konfor beklentilerinin artmasıyla akıllı ev

konsepti ortaya çıkmıştır. 1980'lerin başında Amerika Birleşik Devletleri'nde bilgi teknolojisinin hızla gelişmesiyle birlikte akıllı ev terimi kullanılmaya başlanmıştır. Washington Akıllı Ev Enstitüsü'nün tanımına göre, akıllı ev; kullanıcıların performansını, ilk yatırım ve işletme maliyetlerinde tasarrufu ve esnekliği en üst düzeye çıkarmak için kaynakları verimli şekilde yönetmek amacıyla çeşitli sistemleri entegre eden bir yapıdır (Stefanov, Bien, & Bang, 2004). Akıllı ev terimi, genellikle elektronik olarak kontrol edilen güvenlik ve konfor sağlayan modern evleri tanımlamak için kullanılır. Akıllı ev teknolojisi, yaşam kalitesini artırmak amacıyla ev tabanlı teknoloji ve hizmetlerin entegrasyonunu ifade eder (Berlo, 2002). Akıllı ev teknolojileri, ev işlerinin otomasyonu, daha kolay iletişim ve daha yüksek güvenlik sağlayarak ev konforunu artırmayı amaçlamaktadır. Bu teknolojiler, kullanıcıların ev ortamlarıyla etkileşim kurma ya da interaktif olma, görevleri yerine getirme ve daha önce zor veya imkansız olacak faaliyetlerde bulunma kapasitelerini artırabilmektedir.

Evdeki cihazlar, kullanıcıların kesin komutlarına yanıt vermenin yanı sıra, belirsiz niyetlere de duyarlı bir şekilde tepki verebilmelidir. Bu, akıllı evlerin bulanık mantık, yapay sinir ağları ve evrimsel algoritmalar gibi çeşitli ileri düzey akıllı teknolojilerle entegrasyonu sayesinde mümkün olmaktadır (Bien, Stefanov, & Bang, 2004).

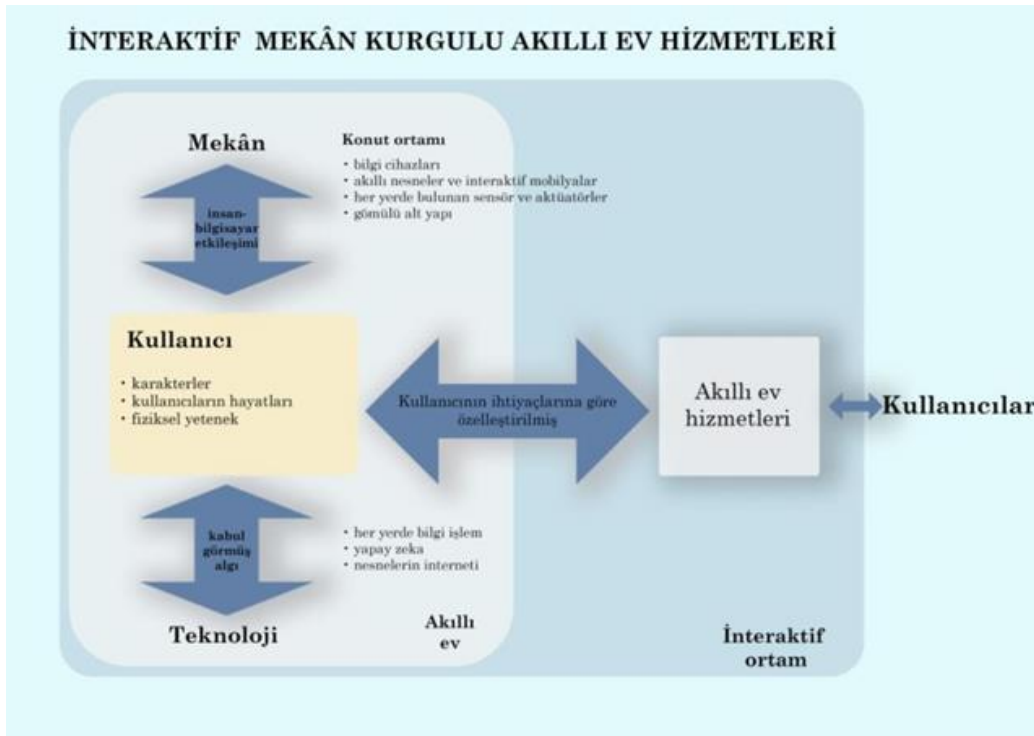
Dijital olarak zenginleştirilmiş bir yaşam ortamında, akıllı ev kavramı farklı şekillerde tanımlanabilir ve yorumlanabilir. Akıllı bir evin akıllı olarak nitelendirilmesi, otomatik, kompakt, yenilikçi, kullanışlı, kendi kendini ayarlayan, tepki veren veya işlevsel gibi çeşitli ileri düzey özelliklere sahip olmasını ifade etmektedir. Teknoloji aracılığıyla karşılıklı etkileşimin en üst seviyede olması ve teknolojinin bütün olanaklarından yararlanmak akıllı ev içerisinde interaktifliği sağlamaktır.

2.3. İnteraktif Mekân Kurgulu Akıllı Evler

Akıllı ev içerisinde kullanılan teknolojik aletlerin insanların istekleri veya ihtiyaçları doğrultusunda uygulanabilmesi ve bunların denetlenebilmesi ev otomasyonu kavramını ortaya çıkarmaktadır (Mersinoğlu, 2002). Ev otomasyonu, interaktif mekân kurgulu akıllı evlerde, kullanıcı ihtiyaçları ve veri analizine dayalı olarak mekânın daha işlevsel, konforlu ve güvenli olmasını sağlayan temel bir bileşendir.

Akıllı evler ve interaktif mekân kurgulu akıllı evler arasındaki temel fark, interaktif mekân kurgulu akıllı evlerin daha fazla kullanıcı etkileşimini ve kişiselleştirilmiş deneyimleri hedeflemesidir. Standart akıllı evler genellikle belirli cihazların ve sistemlerin otomatizasyonu sınırlıyken, interaktif mekân kurgulu akıllı evlerde ise mekânın kendisi aktif bir şekilde kullanıcılarla etkileşime geçebilen ve bu etkileşimlere yanıt verebilen bir yapıda tasarlanır. Bu tür evlerde, yapay zeka ve diğer ileri teknolojiler kullanılarak evdeki ortam ve sistemler, kullanıcıların duygu durumlarına, ihtiyaçlarına ve tercihlerine göre otomatik olarak ayarlanabilmektedir.

Teknolojinin hızla gelişmesi ve bilgisayar bilimlerindeki ilerlemeler, akıllı ev teknolojilerine pek çok yeni fırsat sunmaktadır. Yapay Zeka'nın farklı disiplinlerdeki etkisi, akıllı evlerin gelecekteki potansiyelini de büyük ölçüde artırmaktadır. Özellikle Nesnelerin İnterneti (IoT) ve bilgi işleme dayalı tasarımlar, mimari alanda daha kişiselleştirilebilir ve kullanıcılarla daha ileri etkileşim sağlayabilen akıllı evlerin tasarımına ilham vermektedir. Bu gelişmeler, interaktif kurguya sahip, teknoloji ve tasarımı bir araya getiren yenilikçi akıllı ev çözümlerini mümkün kılmaktadır. Akıllı ev teknolojilerinin bu şekilde evrilmesi, kullanıcıların yaşam kalitesini artırarak ev deneyimlerini daha da zenginleştirmektedir.



Şekil 1. İnteraktif Akıllı Ev Hizmetleri (Kim, Cho, & Jun, 2020' den uyarlanmıştır)

İnteraktif akıllı ev hizmetleri, bu evlerin yapılandırılmasını ve kullanıcılarla olan ilişkilerini incelemektedir. Teknik konulara odaklanmak yerine, akıllı evler ve kullanıcıların kesişen ilişkilerini tanımlamayı ve adapte etmeyi amaçlamaktadır. Özellikle, kullanıcılar ile interaktifliği artırılmış akıllı evler arasındaki alan ve teknolojiyi bütünleştiren çok modlu etkileşimlere odaklanmaktadır. Alan boyutu, kullanıcı deneyimi (UX) ve insan-bilgisayar etkileşimi (HCI) yönlerine odaklanırken, teknoloji boyutu kullanıcıların teknolojiyi algılaması ve kabul etmesi üzerine yoğunlaşmaktadır. Akıllı bilgi işlem ve mimari, duyarlı ve etkileşimli ortamlar yaratmak için kullanılmaktadır. Bu ortamlar, sakinlerin çevreleriyle etkileşime geçebildiği ve çeşitli konut hizmetlerinden faydalandığı sürekli ağa bağlı olmaktadır (Kim, Cho, & Jun, 2020). Uyarıcı ve algılayıcı teknolojilerle donatılmış akıllı evler, çevre ve kullanıcılarıyla olan iletişimlerini çeşitli araçlar ve akıllı sistemler aracılığıyla sağlar. İnteraktif mekan temelli akıllı evler, hareket sensörleri, sıcaklık sensörleri ve ışık sensörleri gibi çeşitli sensörlerin yanı sıra bilgisayarlar veya mikrodenetleyiciler gibi işlemcilerin entegrasyonunu gerektirir. Bu cihazlar, evin iç ve dış etkileşimlerini algılayarak verileri işler ve buna göre yanıtlar üretir (Şekil 1) (Söker, 2024).

İnteraktif mekân temelli akıllı evler, kullanıcıların tercihlerine ve ihtiyaçlarına göre içerik veya deneyimleri kişiselleştirebilir. Bu kullanıcıların mekânı kendi benzersiz gereksinimlerine uygun şekilde şekillendirmelerine olanak tanır. Mekan kullanılmaya devam ederken, kullanıcı istekleri ve ihtiyaçları doğrultusunda tasarım sürekli olarak güncellenir. Bu mekânların benzersizliği, kullanıcı isteklerine göre sürekli olarak uyarlanabilmeleridir (Söker, 2024).

Akıllı evlerde kullanılan köprü cihazları, bilgi işleme dayalı tasarım prensipleriyle entegre edilerek sistemlerin daha akıllı ve etkili çalışmasını sağlamaktadır. Bu tasarım, veri analizi ve bilgi işleme süreçlerini kullanarak optimize edilmiş çözümler geliştirmeye odaklanmaktadır. Tasarımcılar, geleneksel yöntemlerin ötesine geçip yapay zeka ve makine öğrenimi algoritmalarını kullanarak, akıllı evlerin gelişimini ve adaptasyonunu sağlamaktadır. Bu yöntem, tasarımcıya zaman kazandırırken sürdürülebilirlik sağlar ve kullanıcıların yaşam alanlarını sürekli güncellemektedir. Kişiyeye özgü teknoloji temelli bu yaklaşım, ev sahiplerinin ihtiyaçlarına ve tercihlerine daha fazla odaklanarak akıllı evlerin geleceğini şekillendirmektedir.

2.3.1. Mekân kurgusu

Mekânın yapısal kurgusunun anlaşılmasıyla başlayan etkileşim süreci, kültürel, siyasi, ekonomik, toplumsal ve anlamsal boyutlarıyla mekana yayılır. İnsanın mekânla olan etkileşimi, bireyin ihtiyaçlarını karşılama ve anlamsal ilişkiler kurma gereksiniminden doğar (Kahraman, 2014). Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte, mekân kurgusu bireyin gereksinimlerine daha hızlı ulaşmasını sağlamakta ve mekânın etkileşimli olmasını, tasarımcıya daha geniş

olanaklar sunmasını mümkün kılmaktadır.

Kullanıcı İhtiyaçlarına Göre Tasarım: Mekân kurgusu, ev sahiplerinin ihtiyaçlarına ve yaşam tarzlarına uygun olarak tasarlanmalıdır. Örneğin, bir aile için mutfak ve oturma odası gibi sosyal alanlar önemli olabilirken, ev ofisine sahip bir çalışan için çalışma alanı kritik olabilir. Bu nedenle, mekan kurgusu, ev sahiplerinin kullanım alışkanlıklarını ve ihtiyaçlarını dikkate almaktadır.

Daha İşlevsel ve Kişiselleştirilebilir Mekanlar: Bir konutun en temel niteliklerinden biri işlevselliğidir. Konut, kullanıcının yaşam bütünlüğü içinde ihtiyaçlarını en üst düzeyde karşılamayı amaçlamalıdır. Tasarımcının sorumluluğu, konut mekân kurgusu içinde işlevsel yapının tüm özelliklerini eksiksiz bir şekilde ortaya koymaktır. Konut tasarımı, ürünün işlevlerini ne kadar etkili bir şekilde ifade edebilir ve kullanıcının isteklerine ne kadar iyi cevap verebilirse, o kadar başarılı kabul edilir (Bayram, 2011).

Uyarlanabilirlik: Geleceğe dönük ihtiyaçlara göre esnek ve adapte edilebilir sistemler geliştirmek üzere, tasarım sürecinin ilk aşamasında uzun süreli bir proje olarak düşünülmelidir. Tasarımın sürdürülebilir olması ve uyum sağlayabilen, uyarlanabilen, düzenlenebilen bir yapıya sahip olması gereklidir. Kullanıcılar, seçimlerini ve yaşam tarzlarını mekâna uyarlayabilmeli ve gelişen teknolojinin imkanlarıyla birlikte mekân yeni özellikler ekleyebilmelidir (Yılmaz, 2006).

Geleceğe Uygunluk: İnteraktif mekân kurgulu akıllı evlerin tasarımında kritik bir faktördür çünkü teknoloji sürekli olarak gelişmekte ve değişmektedir. Bu tür mekanlar ve evler, yeni teknolojiler ve gereksinimler ortaya çıktığında güncellenebilir olmalıdır.

Veri Toplama ve Analiz: Evler, birçok sensör ve cihaz aracılığıyla büyük miktarda veri toplar. Bu veriler, mekânın kullanımı ve performansı hakkında önemli bilgiler sağlar. Mekânın hangi alanlarının daha sık kullanıldığını, enerji tüketimini ve güvenlik durumunu izlemek için bu veriler kullanılabilir. Bu bilgiler, mekânın yeniden düzenlenmesi veya optimize edilmesinin gerekip gerekmediğini belirlemek için kullanılabilir. **Otomasyon ve Kontrol:** Mekân içindeki cihazları otomatik olarak kontrol etme yeteneği sunar. Ev sahipleri cep telefonları veya sesli asistanlar aracılığıyla ışıkları, perdeleri veya klimayı uzaktan kontrol edebilirler. Bu, mekânın işlevselliğini artırabilir ve kullanıcıların daha fazla kontrole sahip olmalarını sağlamaktadır.

Enerji Verimliliği: Akıllı ev teknolojileri, enerji tasarrufu sağlamak için mekânın ısıtma, soğutma ve aydınlatma sistemlerini optimize edebilir. Bu, enerji maliyetlerini düşürmek ve çevresel etkiyi azaltmak için mekan kurgusunu etkileyebilmektedir.

Güvenlik ve İzleme: Güvenlik önlemlerini artırmak için çeşitli sensörler ve kameralar kullanılabilir. Bu, mekânın güvenliğini artırabilir ve kullanıcıların evlerini uzaktan izlemelerini sağlar. Bu faktör, mekânın kurgusunu güçlendirebilmektedir.

Kablosuz Bağlantı ve Ağ Altyapısı: Mekân kurgusu, kablosuz erişim noktaları ve ağ altyapısının yerleştirilmesini içermektedir. Mekân tasarımı kullanıcı ihtiyaçları, veri analizi, otomasyon, enerji verimliliği ve güvenlik kablosuz ağ altyapısına göre yapılmaktadır. Bu, mekânı daha işlevsel, konforlu ve kişiselleştirilmiş hale getirmektedir. Tasarım sürecinde mühendisler, mimarlar ve sürdürülebilirlik uzmanları birlikte çalışmaktadır.

2.3.2. İnsan-mekân ilişkisi

Kullanıcı Merkezli Tasarım: İnteraktif mekânlar, kullanıcıların ihtiyaçları ve beklentileri doğrultusunda tasarlanmaktadır. Kullanıcıların mekânı etkileme ve deneyimlerini şekillendirme yeteneği vurgulanmaktadır.

Esneklik: Gelecekteki olası değişikliklerle mevcut gereksinimlerin entegrasyonunu ve kullanım özgürlüğünü sağlama yaklaşımıdır (Kronenburg, 2011). Bu yaklaşım; interaktivite, adaptasyon, dönüşüm ve mobilitayı kapsar. Esneklik, insan-mekân ilişkisinin tüm özelliklerini içermelidir. Günümüzdeki hızlı değişimler, yapıların bu değişime hızla uyum sağlamasını gerektirir. Esneklik, süreç içinde olası değişikliklere uyum sağlayabilen mekansal ve yapısal stratejiler içeren bir tasarım yaklaşımıdır (İslamoğlu & Usta, 2018). Esnek konutlar, kullanıcıların farklı isteklerine ve zamanla değişen ihtiyaçlarına uyarlanabilen, değişebilir, dönüşebilir ve sürdürülebilir konutlardır (Diker, 2021).

Teknoloji Entegrasyonu ve Kolaylık: İnteraktif mekânlar, teknoloji ile yakından ilişkilidir. Dokunmatik ekranlar, sensörler, kameralar, sanal gerçeklik (VR) veya artırılmış gerçeklik (AR) gibi teknolojik araçlar, kullanıcıların mekânla etkileşimini sağlar. Isıtma, soğutma, aydınlatma, güvenlik ve eğlence sistemleri gibi farklı bileşenlerin sorunsuz çalışması gerekmektedir.

Kullanıcılar, merkezi bir kontrol paneli veya mobil uygulama üzerinden tüm bu sistemleri kolayca yönetebilmektedir. Bu, ev sahiplerine büyük kolaylık sağlar ve mekânı daha kullanışlı hale getirmektedir.

Kullanıcı Deneyimi Geliştirme: Bilgisayar destekli programlarla, kullanıcıların sosyal deneyimlerinin yanı sıra maliyet, verimlilik ve süreklilik gibi konularda iyileştirmeler hedeflenir. Tasarım aşamasında, insanların buldukları mekânları tercihlerine göre düzenleyebilmelerini sağlamak ve uyarlanabilir alanlar oluşturmak amacıyla kullanıcı deneyimlerine göre daha işlevsel mekânlar oluşturulabilir. Erken tasarım aşamalarında, kişisel verilere dayalı kullanıcı deneyimlerinin, insan-bilgisayar etkileşiminin ve makine öğrenmesi tekniklerinin birlikte değerlendirilmesi önemlidir. Bu sayede, kesişen veya ayrışan unsurlar tespit edilerek en faydalı tasarım yaklaşımı benimsenebilir (Şapçı, 2022).

Veri Toplama ve Analiz: Kullanıcıların etkileşimlerini izleyerek bu verileri analiz eder. Bu sayede mekân, kullanıcı davranışlarını analiz ederek alanları daha iyi optimize edebilmektedir. Kurgudan sonra da veri toplama devam etmektedir.

Kişiselleştirme: İnsan-mekân bağlamında kişiselleştirme, insanın ve mekânın sınırlarını net bir şekilde ortaya çıkarabilir (Açııcı, 2013). İnsanlar, akıllı ev teknolojilerini kullanarak mekânlarını çevreleyen sınırları belirler. Kendi tercihlerine göre tasarladıkları mekânlar, kimliklerini daha fazla yansıtır ve bu da mekânın sadece fiziksel bir yer olmaktan çıkıp kişisel bir ifade alanına dönüşmesine olanak tanımaktadır.

Eğitim ve Bilgilendirme: Müze sergileri, eğitim kurumları veya ticaret fuarları gibi mekânlar, interaktif teknolojileri kullanarak ziyaretçilere bilgi sunabilir ve öğrenme deneyimini geliştirebilmektedir. Bu özellikler akıllı evlere de adapte edilebilmektedir. Ev içindeki programlar ve güncellemeler için kullanıcılar eğitilebilmektedir.

Eğlence ve Etkileşim: Ev sinema salonları, oyun odaları, müzik odaları ve sanal gerçeklik alanları gibi mekânlar, kullanıcıların aktif katılımcılar olarak eğlenmeleri ve etkileşimli deneyimler yaşamaları için tasarlanmaktadır. Bu alanlar, kullanıcıların mekânlarla daha derin bir bağ kurmalarını sağlamaktadır.

3. BULGULAR

İncelenen literatür ve Yunanistan'daki prototip akıllı ev uygulamasının analizi, interaktif mekân kurgulu akıllı evlerin hasta bakımında önemli avantajlar sunduğunu göstermektedir. Sensörler ve IoT cihazları, hastaların hayati parametrelerini sürekli izleyerek sağlık uzmanlarına anlık veri sağlayabilmekte, bu da erken müdahale ve hastane ziyaretlerinin azaltılmasına katkıda bulunmaktadır. Yapay zeka destekli sistemler, kullanıcıların davranışlarını analiz ederek kişiselleştirilmiş bakım ve güvenlik önlemleri sunmaktadır. Ancak, verilerin güvenliği ve mahremiyeti konusunda dikkat edilmesi gereken önemli hususlar bulunmaktadır. Genel olarak, akıllı ev teknolojileri, hasta bakımını ev ortamında daha etkin ve sürdürülebilir hale getirme potansiyeline sahip olup, yaşam kalitesini artırmaktadır. Ayrıca, tasarımcının rolü, bu evlerin tasarımında teknoloji entegrasyonunu ve ergonomik çözümleri sağlayarak kullanıcıların günlük yaşamlarını ve interaktifliği desteklemektir. Tasarım kullanıcı evi kullanırken de devam etmektedir.

3.1. Hasta Bakımında İnteraktif Mekân Kurgulu Akıllı Ev

Hasta, yaşlı ve engelli kişiler; hareket kabiliyetinin azalması, bilişsel gerileme ve hareket açıklığını sınırlayan evde düşme ve yaralanma riskini artıran bir veya daha fazla kronik hastalık gibi birçok faktörün etkileriyle karşı karşıya kalmaktadır. Ayrıca bazı şeyleri daha kolay unutulabilirler, düşünceleri yavaşlar ve karmaşık problemlerle baş etme yetenekleri zayıflayabilmektedir.

Akıllı ev sistemleri; sesli asistanlar, akıllı sensörler, otomatik kontrol sistemleri gibi çeşitli ileri teknoloji ve cihazları entegre ederek yaşlılara daha rahat ve verimli bir yaşam sunmaktadır. Destekli yaşam sensörleri ve akıllı ürünler, sakinlerin çevresel koşullarını, fiziksel işaretlerini, ses ve yüz ifadesi verilerini izleyip gözlemleyerek ve hatta olağandışı aktivite durumunda belirlenen bakıcılarla iletişime geçerek sakinlere akıllı bakım hizmetleri sunabilir ve böylece ev halkının güvenliğini ve bağımsızlığını sağlayabilmektedir (Gassert & Dietz, 2015).

Akıllı bir evde oluşturulan tasarım sensörler ve aktüatörler ile Kişisel Alan Ağı (PAN) veya Kablosuz Sensör Ağı (WSN) aracılığıyla bağlanır. Giyilebilir biyomedikal sensörler, örneğin elektrokardiyogram (EKG), elektromiyogram (EMG), elektroensefalogram (EEG), vücut sıcaklığı ve oksijen saturasyonu (SpO2) sensörleri, fizyolojik sinyallerin otomatik, sürekli ve gerçek zamanlı ölçümünü sağlamak için Kablosuz Vücut Alan Ağı'na (WBAN) veya Vücut Sensör Ağı'na (BSN) bağlanabilir. Merkezi BSN düğümü tüm fizyolojik verileri toplar, sınırlı veri işleme yapar ve PAN/WSN'ye ağ geçidi görevi görür. Aktüatörler, sakinlerden veya merkezi bilgi işlem sisteminden gelen geri bildirimlere göre çalışmaktadır (Shah, Iqbal, & Shah, 2013). Merkezi bilgi işlem sistemi,

PAN/WSN üzerinden çevresel, fizyolojik ve aktivite verilerini toplar, analiz eder ve kullanıcıya geri bildirim sağlar. Ayrıca nemlendirici, oksijen jeneratörü, fırın ve klima gibi cihazları kontrol etmek için aktüatörleri devreye sokar. Merkezi ev ağ geçidi, ölçülen verileri internet veya hücresel ağ aracılığıyla sağlık personeline veya hizmet sağlayıcılara iletir. Kablosuz sensörler ve aktüatörler arasındaki iletişimi sağlamak için kablosuz sensör ağları ve özel ağlarda standart protokoller kullanılmaktadır.

Jestleri tanıyan ve yaşlıların parmaklarının bükülme açısını bir kamera aracılığıyla ölçerek ev aletlerini kontrol etmelerine yardımcı olan bir el izleme sistemi geliştirdi Yang, vd. (2023). Bileklik kullanarak hastaların uyku kalitesi üzerine bir müdahale deneyi gerçekleştirilmektedir ve yatak ısıtmanın mikrotermal ortamları iyileştirebileceği dolayısıyla soğuk ortamlardaki yaşlı vatandaşların uyku bozukluklarını ve refahını iyileştirebileceği sonucuna varılmaktadır Xia, vd. (2020). Bu tür girişimler, akıllı evlerin yaşlıların yaşam kalitesini artırma ve bağımsız yaşamlarını destekleme konusundaki büyük potansiyelini ve pratik faydalarını tam olarak ortaya koymaktadır. Akıllı ev sistemleri, ileri teknoloji ve cihazların kullanımı sayesinde yaşlı, hasta ve engelli kişilerin davranışlarını otomatik olarak takip edip tanımlayabilmekte, kişiye özel destek ve yardım sunabilmekte ve bu sayede yaşlıların güvenliğini ve konforunu artırabilmektedir. Bu nedenle yaşlı kullanıcıların akıllı ev kullanma isteğinin teşvik edilmesi büyük önem taşımaktadır.

Hasta bakımında interaktif kurgulu akıllı evler için mobilya tasarımı, hastaların yaşam kalitesini artırmak ve güvenliği sağlamak açısından kritiktir. Bu mobilyalar, ergonomik ve erişilebilir olmalı, kolay hareket edilebilir ve ayarlanabilir özelliklere sahip olmalıdır. Örneğin, tekerlekli sandalye kullanan veya hareket kabiliyeti kısıtlı hastalar için uygun yükseklikte masalar, ayarlanabilir yataklar ve destekleyici koltuklar gibi unsurlar önemlidir. Ayrıca, mobilyaların akıllı sensörlerle donatılması, hasta düşme veya sağlık sorunu yaşadığında anında uyarı verilmesini sağlayarak, hızlı müdahaleye olanak tanımaktadır. Bu tasarım, hem hastaların bağımsızlığını korumasına yardımcı olur hem de bakım verenlerin iş yükünü hafifletmektedir.

Genellikle tasarlanan evlerin yerinde yaşlanmaya ve hastalığa uygun şekilde yeniden donatılması gerekir. Örneğin, küveti duşa kabinle değiştirmek gibi geleneksel önlemler daha güvenli bir yaşam koşulu sağlayabilir. Ev modifikasyonuna ek olarak, yaşlılar için tasarlanmış cihazlar da günlük aktivitelerini destekleyebilir. Elektronik olmayan cihazlar, elektronik cihazlar ve akıllı cihazlar yaşlı yetişkinlerin evlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu cihazlar veya akıllı sistemlerin dış parçaları ev ortamına dağıtılır. Bunların çoğu yapısal olmayan, mimari bileşenlerin yüzeyine yerleştirilen veya altyapı ve mobilyaların içine yerleştirilen, duvar veya tavanlardaki iç mekân iklim sensörleri, şiltelerin altındaki basınç sensörleri, musluklardaki su sayaçları ve kapılardaki temas sensörleri gibi cihazlardır. Yapısal olmayan teknolojiler evlerde minimum değişiklik yapar ve konuşlandırılması daha kolaydır. Ancak yapısal teknolojiler, bazı özel amaçlar için mevcut konut yapısının güçlendirilmesini gerektirir; örneğin, ara sıra ortaya çıkabilecek acil durumlar için riskli bölgelerde kaygan zemin karolarının yerine düşme algılama zemini kullanılması gibidir (Ma, Santin, & Mohammadi, 2022). İnteraktif mekân kurgulu akıllı evlerde, kurgu yapı inşaa edilmeden birçok meslek disiplininden yararlanabilmektedir. Tasarım, kişinin fiziksel ve ruhsal durumuna bakılarak oluşturulabilmektedir. Burada önemli olan kurgunun ilerleyen zamanlarda kişinin ihtiyaçlarına ve fiziksel durumuna göre devam etmesidir. Fakat var olan yapılara tasarımcı interaktiflik için gerekli gördüğü alanlara müdahale ederek bağlantı cihazlarını entegre edebilir ve ergonomiyi sağlayabilmektedir. Bu entegrasyonun sağladığı yazılıma ve teknolojiye bağlı tasarım dışarıdan destek alabilir ya da ev sahibinin kendini bu konuda eğitmesi gerekebilir. Bu evlerde evin beyni diyebileceğimiz ayrı bir alan oluşturulabilmektedir. Otonom sistemlerin merkezi bir noktadan yönetildiği ve eve müdahalenin kolaylaştığı alanlar olmaktadır.

3.1.1. Hasta bakımında interaktif mekân kurgulu akıllı ev örneği

İnsanların ömrü uzadıkça, sağlık ve bakım hizmetlerine olan talep artmaktadır. Ancak, teknolojiyle donatılmış akıllı evler, bu hizmetlerin yükünü hafifletip, bireylerin kendi evlerinde daha uzun süre bağımsız yaşamlarına olanak tanıyabilmektedir.

Yapay Zeka, özellikle 21. yüzyıldan itibaren teknoloji alanında büyük bir dönüşüm sağlamaktadır. Hesaplama gücündeki artışlar ve büyük veri kümelerinin kullanılabilirliği sayesinde çok daha hızlı gelişip yaygınlaşmaktadır. Yunanistan'ın Patras şehrinde bulunan araştırmacılar, bu teknolojiyi evlerimize taşıyarak, yaşam alanlarımızı daha akıllı ve işlevsel hale getirmeyi hedeflemektedir. Avrupa'da daha fazla insanın daha uzun yaşaması, sağlık ve sosyal bakım sistemlerinde ek yük oluşturmaktadır. Bu nedenle, destekli yaşam konsepti, bu zorluklarla başa çıkmak için teknoloji dünyasında giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Peloponez Üniversitesi, yaşlılar, engelliler ve kronik hastalıkları olan kişiler için gelecekte nasıl yaşam alanları oluşturulabileceğini araştırmak üzere prototip yaşam

alanları inşa etmektedir. Bu çalışmaların amacı, bu grupların daha uzun süre bağımsız, güvenli ve rahat bir şekilde yaşamalarını sağlamaktır. İnteraktif mekân kurgulu bu akıllı ev prototipi, yapay zeka kullanılarak bulut sistemi üzerinden çalışmaktadır.



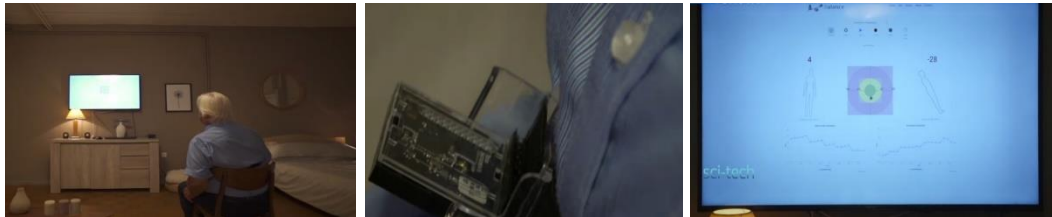
Şekil 2. İnteraktif akıllı evde farklı pozisyonlarda test deneyi Kostas Koutsopoulos'un zaman atlamalı (Url-1)



Şekil 3. Akıllı Aynalar ve Bulgular (Url-1)

Araştırmacıların denediği cihazlardan biri olan akıllı ayna, yüz tanıma teknolojisi kullanarak olası sağlık sorunlarının erken belirtilerini tespit edebilmektedir.

Mora Üniversitesi'nden Yardımcı Doçent Christos Antonopoulos, aynanın potansiyelinin çok büyük olduğunu söylüyor: "Ayna, kalp atış hızı ve kan basıncı gibi temel ama kritik biyometrik modaliteleri ölçüyor. Aynı zamanda göz bebeğini izleyebiliyor ve hatta karaciğerdeki gelecekteki potansiyel sorunları gösterebiliyor. Tüm bu bilgiler doğrudan doktora veya aile üyelerine iletiliyor" (Şekil 2, 3).



Şekil 4. Taşınabilir Sensör ve Bulgular Görünümü (Url-1)

Taşınabilir teknoloji ürünleri, genellikle kablosuz bağlantıyla uzun süreli veri takibi yapabilmek için bilgisayar veya akıllı telefonlarla senkronize edilen özel elektronik izleme cihazları olarak tasarlanmıştır (Büyükgöze, 2019). Evde hastaya takılan sensörler, hareketleri izleyerek denge kontrolünü sağlamak için kullanılmaktadır. Bu sensörler, hastanın günlük aktivitelerini ve hareketlerini sürekli olarak izler ve verileri analiz eder. Böylece, hastanın denge sorunları veya düşme riski gibi durumları belirlemede yardımcı olurlar. Veriler, sağlık uzmanlarına veya bakım verenlere hastanın günlük aktivite düzenini anlama ve gerektiğinde müdahale etme konusunda değerli bilgiler sunmaktadır. Bu sayede, hastaların daha güvenli bir şekilde yaşamaları ve gerekli tedbirlerin zamanında alınması sağlanabilmektedir (Şekil 4).



Şekil 5. Akıllı Hoparlör ve Sesli Komut Görünümü (Url-1)

Akıllı hoparlörler, ses tabanlı etkileşimi kolaylaştırmak için genellikle sürekli açık mikrofonlarla donatılmıştır. Ancak, kullanıcı gizliliği endişelerini gidermek için bu cihazlar çeşitli gizlilik özellikleri sunarlar; örneğin, kullanıcı tarafından belirlenebilen aktifleştirme kelimeleri ve sessize alma düğmeleri bulunur (Do & Arora, 2023) (Şekil 5).

Evdeki akıllı hoparlör, yapay zeka ses asistanları içermektedir. . Bu cihazlar, sesli komutları algılayarak kullanıcıların çeşitli işlemleri gerçekleştirmelerini sağlamaktadır. Kullanıcıya sesli komutlarla kapıları kapatma ve ışıkları kısma imkanı sunmaktadır. Ayrıca, sensörler kullanıcının hareketlerini izleyerek düzenli davranışlarında değişiklik olduğunda bunama gibi durumların erken belirtilerini tespit edebilmektedir. Bu özellikler, akıllı evlerin yaşlıların günlük yaşam kalitesini artırmasına ve sağlık durumlarını izlemeye yardımcı olmaktadır (Şekil 5).



Şekil 6. Sensör ve Raspberry Pi (Url-1)

Raspberry Pi modülü, akıllı evlerdeki tüm sensörlerden gelen verileri okuyarak ve gerekli durumlarda çıkış ikaz birimlerine (örneğin, buzzer veya LED) veri gönderen en kritik birimdir (Yüzgeç & Aba, 2017). Ev otomasyonu sisteminde, kontrol edilmek istenen her parametreye ait sensörler, sistem konforunu artırmak için mikrodenetleyici ile kablosuz iletişim kurar (Sine & Koçyiğit, 2019).

Hasta için tasarlanmış akıllı evde görülen Raspberry Pi kümesi, çeşitli akıllı ev cihazlarını merkezi olarak yönetmek, sağlık verilerini izlemek, güvenlik sistemleri ile entegre çalışmak, sesli asistanlarla uyumlu olmak ve aile üyeleri veya sağlık hizmeti sağlayıcıları ile iletişimi kolaylaştırmak gibi birçok işlevi yerine getirebilmektedir. Bu cihazlar, yaşlıların günlük yaşamlarını kolaylaştırmak, bağımsızlıklarını artırmak ve güvenliklerini sağlamak amacıyla teknolojiye dayalı çözümler sunmaktadır (Şekil 6).



Şekil 7. Sensör ve Raspberry Pi (Url-1)

Güvenlik ve mahremiyet önlemleri kapsamında, akıllı evlerdeki olaylar izlenir ve gerektiğinde bilgi sağlık çalışanlarına ve aile üyelerine iletilmektedir. Örneğin, bir düşme gerçekleştiğinde, olayın meydana geldiği bilgisi aktarılır. Ancak, düşen kişinin verisi, görüntüsü, fotoğrafı veya videosu gibi kişisel bilgiler saklanmaz veya iletilmez. Bu şekilde, sağlık durumu izlenirken kişisel mahremiyet de korunmuş olmaktadır (Şekil 7).

3.2. Güvenlik ve Mahremiyet

Akıllı evler, yenilikçi, birbirine bağlı ve otomatik teknolojilere sahip konutlar olarak sakinlerin yaşam kalitesini ve refahını artırma potansiyeline sahiptir. Ancak, kullanıcılar artan otomasyon konusunda endişeler taşıyabilir ve bu durum teknoloji kabullerini olumsuz etkileyebilir. Akıllı evlerin benimsenmesinde, otomatik teknolojilere olan güven eksikliği ve gizlilik endişeleri önemli engeller olarak öne çıkmaktadır.

Akıllı ev çözümleri, hastaların evlerinin rahatlığında, her yerde bulunan akıllı cihazlar veya sensörler kullanarak sağlık hizmetlerine erişmesini sağlar. Herhangi bir sağlık bilişim altyapısında olduğu gibi, bir hastanın hassas sağlık bilgileri işlenir ve üçüncü taraflara iletilir, bu da gizlilik ihlali riskini artırır. Akıllı ev ortamı, yaygın yapısı nedeniyle bu tür gizlilik zorluklarını artırır ve tasarlanan cihazlar ve yazılımlar için gereksinimler oluşturur (Theoharidou, Tsalis, & Gritzalis, 2017). Akıllı ev teknolojileri bağlamında, gizliliğin gelecekte üç boyutu göz ardı edilmemelidir: Fiziksel gizlilik, izinsiz gözetim ve istenmeyen girişlerden korunma gibi fiziksel benliğe erişim kontrolünü ifade eder; sosyal gizlilik, kişisel etkileşimlerin kim, ne zaman, nerede ve nasıl olacağına dair kontrolü içerir; psikolojik gizlilik ise kişinin düşüncelerine, duygularına ve değerlerine yönelik müdahalelerden korunmayı sağlar. Akıllı ev teknolojileri, bu üç gizlilik boyutunu ihlal edebilir; bu nedenle, akıllı evlerin kabul edilmesi ile ilgili gizlilik gereksinimlerini anlamak için bu boyutların hepsi dikkate alınmalıdır (Burgoon, 1982).

Nitel bir ampirik yaklaşım benimseyerek, otomasyon seviyesine bağlı olarak akıllı ev teknolojilerine ilişkin gizlilik ve güven algılarını incelemekteyiz. Kısmen otomatikleştirilmiş ve yüksek oranda otomatikleştirilmiş iki yan yana senaryo kullanarak, 20 ila 87 yaşları arasında 10 yetişkinle görüşmeler gerçekleştirilmiştir. Araştırmamızda, akıllı ev teknolojilerine olan güvenin, yalnızca teknolojinin işlevselliğiyle değil, aynı zamanda dahil olan insan paydaşlar ve bağlı teknolojilerle olan güvenin çeşitli boyutlarıyla ilişkili olduğu ortaya çıkmıştır. Gizlilik ise, sadece bilgi gizliliğini (veri koruma) değil, aynı zamanda sıklıkla göz ardı edilen fiziksel, sosyal ve psikolojik gizlilik boyutlarını da kapsamaktadır (Schomakers, Biermann, & Ziefle, 2020). Araştırma, akıllı ev teknolojilerine yönelik gizlilik ve güven algılarının otomasyon seviyesine bağlı olarak değiştiğini ve bu algıların birçok farklı boyutu olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bulgular, akıllı ev teknolojilerinin geliştirilmesinde dikkate alınması gereken önemli faktörleri vurgulamaktadır. Yüksek otomasyon seviyelerine sahip akıllı evlerin, kullanıcıların endişelerini giderecek şekilde tasarlanması, bu teknolojilerin daha geniş kitleler tarafından kabul edilmesini ve benimsenmesini sağlayabilir. Dolayısıyla, araştırma, akıllı ev teknolojilerinin kullanıcı dostu ve güvenilir hale getirilmesinin yollarını göstermektedir. Bu, kullanıcıların endişelerini anlamak ve bunlara yanıt veren çözümler geliştirmekle mümkün olabilmektedir.

Etkileşimi yüksek akıllı evlerde gizlilik ve güvenin birbirine bağlı olduğu görülmektedir. Otomasyon derecesi, gizlilik ve güven algılarını güçlü bir şekilde etkileyebilmektedir. Daha geniş bir otomasyon daha fazla endişeye yol açmaktadır.

3.3. Gelecek Perspektifleri

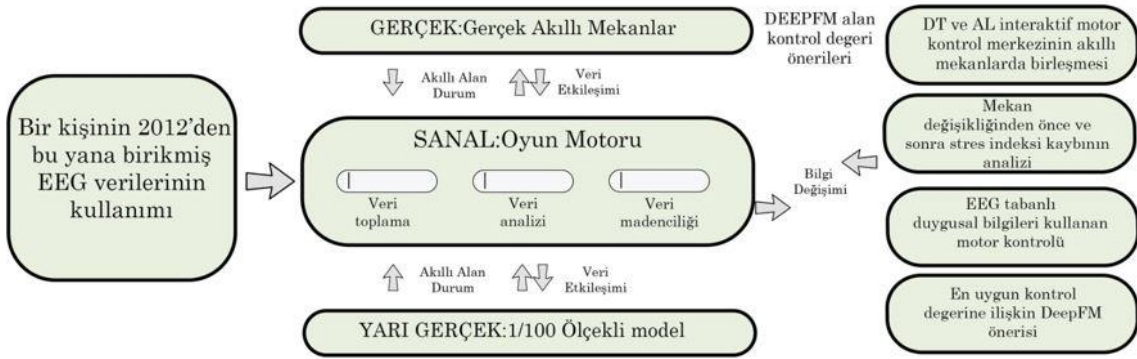
Etkileşimin yüksek olduğu akıllı evlerde sağlık hizmetlerinin geleceği, sensörler ve algoritmalar içeren cihazları kapsayabilir. Akıllı evlerde kullanılan ve önerilen uyku takip yatakları, uyku kalitesini analiz edebilir. Tuvaletteki mikroçipler, idrardaki değişiklikleri tespit edebilir. Biyometrik sağlık izleme cihazları, ağırlık, kan basıncı ve kalp atış hızı gibi çeşitli biyometrik verileri ölçebilir. Dijital aynalar ise, yüzdeki cilt kanserlerini ve yüz hareketlerindeki değişiklikleri tespit edebilir. Bu belirteçlerden herhangi biri sakinin normal seviyesini aştığında, otomatik olarak rapor düzenlenir ve hastanın doktoruna veya hemşiresine gönderilir. Doktor daha sonra hastayla iletişime geçer ve check-up randevusu ayarlar ya da hemşirenin hastayla temasa geçerek sağlık durumunu değerlendirmesini sağlar. Bu önerilen fikirler, büyük veri analitiği ile desteklenerek daha etkili ve kişiselleştirilmiş sağlık hizmetleri sunabilmektedir.

Son zamanlarda, yüksek performanslı minyatür sensörler, aktüatörler, hesaplama işlemcilerinin geliştirilmesiyle birlikte sağlık sektöründe robotik, yapay zeka (AI) ve 3D baskı gibi yenilikçi ve fütüristik teknolojilerin uygulanmasına yönelik ilgi artmaktadır. AI tarafından yönetilen bir bakım robotu, üçüncü taraf bir sistemden herhangi bir müdahale olmaksızın hastalara günlük yaşamlarında yardımcı olabilir ve potansiyel olarak akıllı eve çok faydalı bir katkı olabilir Majumder vd. (2017).

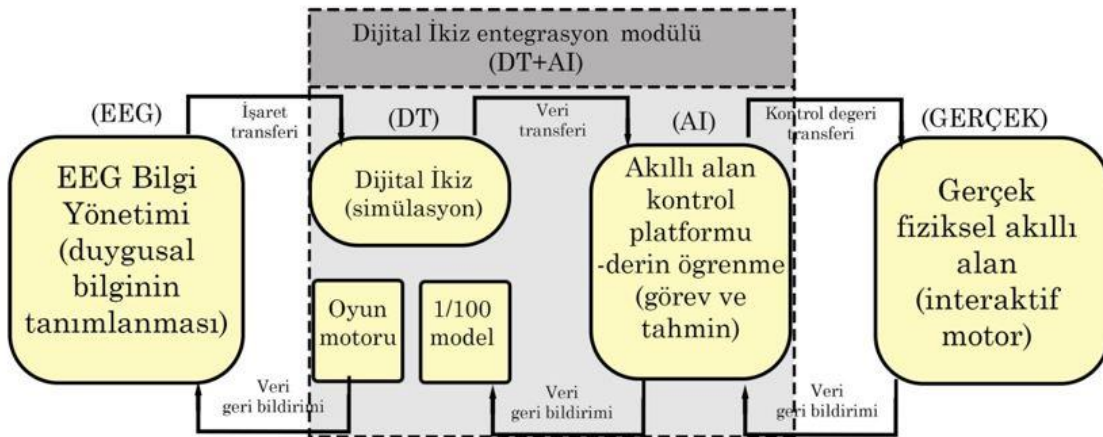
Yakın gelecekte ev ortamındaki akıllı teknoloji, mimari unsurun bir parçası olmaktan öteye geçebilir ve mimarlık sektörüne yenilik getirebilir. Akıllı evlerin işlevi geleneksel konutların ötesine geçecek. Kullanıcılarla etkileşime girecek, gereksinimlerine yanıt verecek ve evlerini yönetecek. Gelecekteki çalışmaların, yaşlı yetişkinler için akıllı evler tasarlanmasının farklı yollarını önermesi ve konut yapısı akıllı teknoloji ve sakinler arasındaki bağlantıları köprülemesi gerekmektedir (Lee & Kim, 2020).

Akıllı alanlar oluşturmak için kullanılan temel teknoloji, çeşitli sensörlerle kullanıcıları analiz etme yeteneğine

dayanır. Özellikle elektroensefalogram (EEG) verileri kullanılarak, dijital ikiz (DT) ve yapay zekanın (AI) birleşimiyle kişiselleştirilmiş interaktif akıllı mekan uygulamaları geliştirilmektedir. EEG sensörü, kullanıcının duygu durumunu tanımlamak ve mekanla etkileşimini optimize etmek için kullanılır. Bu verilerle, kullanıcının mevcut duygusal durumunu iyileştirmeyi hedefleyen interaktif projeler tasarlanır. DT ve AI, bu süreçte mekansal değişiklikleri kontrol etmek ve güvenlik sorunlarını çözmek için kullanıcının duygusal tepkilerini analiz eder (Ji, 2021). Mimar Seung Yeul Ji'nin projesi, tek kişiye yönelik uyguladığı bir projedir. Projenin aynı zamanda EEG ve Dijital İkiz teknolojilerinin gelecekte hasta ve bakıma muhtaç bireyler için akıllı evlerde sağlık durumlarını sürekli izleyerek kişiselleştirilmiş bakım sunmayı öngörülmektedir. EEG, beyin aktivitelerini takip ederek nörolojik durumları analiz ederken, Dijital İkiz teknolojisi kişinin fiziksel ve biyometrik verilerini dijital bir modelde toplayarak hastalıkların erken teşhisi ve tedavi planlarının optimize edilmesini sağlamaktadır. Bu sayede, ev ortamında daha güvenli ve etkili bir bakım oluşturulmaktadır. Ayrıca, EEG teknolojisi bireylerin duygu durumlarını izleyip bunlara cevap verebilmekte ve beyin dalgalarını analiz ederek stres, anksiyete veya depresyon gibi duygu durumlarını tespit edebilmektedir. EEG'nin Dijital İkiz teknolojisiyle entegre olarak bu verileri kullanması, bireyin duygu durumuna göre evin ortamını optimize edebileceği görülmektedir. Örneğin, stresli bir durumda rahatlatıcı müzik çalabilir, aydınlatmayı ayarlayabilir veya bireye rahatlatıcı aktiviteler önerebilir. Bu entegrasyon, duygusal ve mental sağlığın yönetiminde önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca tasarım, sters ve etkileşime dayalı olarak mekansal genişleme ve daralma yoluyla ev optimizasyonu içermektedir (Şekil 8, 9)



Şekil 8. EEG Verileri Kullanım (Ji, 2021'den uyarlanmıştır)



Şekil 9. EEG Verileri, Dijital İkiz ve Yapay Zeka Entegrasyonu Modülü (Ji, 2021'den uyarlanmıştır)

Tasarım, çeşitli sensörler kullanarak kullanıcıların duygusal durumlarını analiz edip kişiselleştirilmiş bir akıllı mekan oluşturmayı hedeflemektedir. EEG sensörü aracılığıyla kullanıcının duygu durumunu tanımlayan bu

çalışma, dijital ikiz ve yapay zeka teknolojilerini bir araya getirerek mekansal değişiklikleri ve güvenlikle ilgili konuları kontrol etmeyi amaçlamaktadır. Kullanıcının EEG verilerini iyileştirmek için mekanın boyutlarını değiştirebilen akıllı motor kontrolüne sahip bir füzyon mekanizması geliştirilmiştir. Yapay zeka modeli, EEG verilerini analiz ederek kullanıcının duygusal durumunu değerlendirir ve psikolojik stabiliteyi artırmak için mekanın boyutları ve değişiklikleriyle ilgili konuları araştırıp uygulamaktadır. Bu işlemler hastanede değil de evde yapılırsa, hastanelerdeki yoğunluk azalır ve maliyetler düşer, hastalar kendi evlerinin rahatlığında ve güvenliğinde tedavi görerek stres ve enfeksiyon risklerinden korunur. Ayrıca, bireysel ihtiyaçlara göre uyarlanmış kişiselleştirilmiş bakım alırlar ve yaşam kaliteleri artar. Doktorlar ise hastaların durumunu uzaktan izleyerek daha verimli bir takip sağlar ve geniş bir hasta grubuna hizmet verebilirler. Sürekli izleme sayesinde daha fazla veri toplayarak teşhis ve tedavi planlarını optimize edebilirler. Bu yaklaşım, sağlık hizmetlerinin daha verimli, etkili ve kişiselleştirilmiş bir şekilde sunulmasına katkıda bulunmaktadır (Şekil 8,9).

4. TARTIŞMA, SONUÇ ve ÖNERİLER

Akıllı ev teknolojilerinin sağlık hizmetlerinde kullanımı, hastaların bağımsız yaşama kapasitesini artırarak yaşam kalitesini yükseltir ve sağlık hizmetlerinin etkinliğini artırır. Salgın gibi dönemlerde bu teknolojiler, hastaların evde izlenmesini ve bakım almasını sağlayarak sağlık sisteminin yükünü azaltır ve bulaşma riskini en aza indirir. Ancak, yüksek başlangıç maliyetleri, veri güvenliği endişeleri ve teknolojiye erişimdeki eşitsizlikler bu sistemlerin benimsenmesini zorlaştırabilir. Gelecekteki araştırmalar, daha kapsayıcı ve erişilebilir akıllı ev sistemleri geliştirmeye odaklanmalıdır.

Akıllı ev teknolojileri, sağlık hizmetlerinde köklü değişimlere yol açmakta ve özellikle hasta bakımında önemli bir dönüşümü işaret etmektedir. Bu sistemler, hastaların sağlık durumlarını izlemek, sağlık hizmetlerine erişimlerini kolaylaştırmak ve yaşam kalitelerini artırmak için çeşitli avantajlar sunmaktadır. Ancak, şimdiye kadar yaşlı ve hasta insanlar için tasarlanan veya yenilenen gerçek hayattaki akıllı ev projeleri sınırlıdır. Bugünün akıllı ev sistemleri, sensörler ve IoT (Nesnelerin İnterneti) cihazları aracılığıyla hastaların hayati parametrelerini sürekli izlemekte ve bu verileri sağlık uzmanlarıyla paylaşabilmektedir. EEG ve dijital ikiz gibi teknolojilerin gelişmesi duygu durum analizine de olanak tanımaktadır. İnteraktif mekan kurgulu akıllı evler, evde sağlık hizmetlerini daha etkili sunarak hastanelerin yükünü azaltır, salgınların yayılmasını engelleyebilir ve hasta bireylerin evde rahat ve güvende hissetmelerini sağlar. Sensörler ve teknolojiler sayesinde doktorlar hastaların sağlık durumunu uzaktan izleyip hızlı teşhis ve müdahale yapabilir, bu da hastanelerin yoğunluğunu azaltarak sağlık hizmetlerinin etkinliğini artırır. İncelenen prototip örnekte de görüldüğü gibi hastanın mahremiyeti korunarak veriler iletilmektedir. Kullanıcının görüntüsü, fotoğrafı veya videosu gibi kişisel bilgiler saklanmamakta ve iletilmemektedir.

- Tasarımcılar, interaktif mekân kurgulu akıllı evleri hasta odaklı olarak geliştirmeli, sensörleri optimal konumlandırılmalı ve sağlık verilerini güvenli şekilde toplamalıdır.
- Mimari yapı, teknolojik entegrasyon için uygun olmalı ve kullanıcıların günlük yaşamlarını destekleyecek ergonomik çözümler sunmalıdır.
- Tasarım, hastalığın seyrine göre özelleştirilmiş çözümler sunmalı ve mimar, teknoloji ve bağlantı cihazlarına hakim olmalıdır. Bu yaklaşım, hastaların konforunu ve güvenliğini artırırken, evde bakım süreçlerini daha etkin hale getirir.
- Başlangıçta yüksek maliyetli olan bu evler, teknolojinin ilerlemesi ve üretim ölçeğindeki artışlarla birlikte maliyetlerin düşmesiyle daha erişilebilir hale getirilmeli ve evde bakımın yaygınlaşması desteklenmelidir.
- Akıllı ev sistemleri, hastanelerin yükünü azaltarak sağlık hizmetlerinin daha verimli kullanılmasına ve maliyetlerinin düşmesine katkıda bulunmalıdır. Uzun vadede, bu evler hasta bakımında bağımsızlığı artırarak sağlık hizmetlerinin daha erişilebilir ve etkili hale gelmesini sağlamalıdır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Yazar Katkısı Beyanı

Yazar-1: Fikir, Orijinal Taslak Oluşturma, Yazım, Revize, Metot Oluşturma, Verilerin Düzenlenmesi, Tartışma, Sonuç ve Öneriler

Yazar-2: Revize, Verilerin Düzenlenmesi, Tartışma, Sonuç ve Öneriler

KAYNAKLAR

- Arabacıoğlu, B. A., & Aytıs, S. (2016). Bilgi-iletişim teknolojileri destekli etkileşimli mekan tasarımı süreci. *Megaron Dergisi*, 11(2), 282-290. <https://doi.org/10.5505/MEGARON.2016.82712>
- Atasoy, D. (2008). Yapay zeka ve mimarlık. Yüksek Lisans Tezi. Haliç Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Ana Bilim Dalı.
- Bayram, Z. (2011). İşlevsellik ve esneklik bağlamında konut iç mekan tasarımında mobilya kullanımı. Yüksek Lisans Tezi. Maltepe Üniversitesi, Sosyal Bilimler Üniversitesi, İç Mimarlık Anabilim Dalı, Aralık, İstanbul.
- Berlo, A. (2002). Smart home technology: Have older people paved the way? *Gerontechnology*, 2, 77– 87.
- Bien, Z., Stefanov, D. H., & Bang, W. C. (2004). The smart house for older persons and persons with physical disabilities: Structure, technology arrangements, and perspectives. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 12(2), 228-233. <http://satcommunity.com.au/upload/2ec60c0e88af6d66fd03646b31b354c9.pdf>
- Brandt, A. L., & Salminen, A. (2009). Systematic review: Activity outcomes of environmental control systems and smart home technology. In *Assistive Technology from Adapted Equipment to Inclusive Environments* (Vol. 25, pp. 292–296).
- Burgoon, J. K. (1982). Privacy and communication. *Annals of the International Communication Association*, 6(1), 206–249.
- Büyükgöze, S. (2019). Giyilebilir teknolojilerden sağlık alanındaki sensör yamalar üzerine bir inceleme. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 17, 1239-1247.
- Çavdar, T., & Öztürk, E. (2017). Nesnelerin interneti için yeni bir mimari tasarımı. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(1), 39-48. <https://doi.org/10.16984/saufenbilder.285444>
- Dahlman, E., Parkvall, S., & Sköld, J. (2013). *4G LTE/LTEAdvanced for Mobile Broadband*. WILEY.
- Diker, M. (2021). Konutta esneklik kavramının kullanıcı tercihleri bağlamında değerlendirilmesi. Doktora Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Üniversitesi, İstanbul.
- Doğan Merih, Y. (2018). İnovatif hemşirelerin yol haritası (1. baskı). Nobel Tıp Kitabevleri.
- Do, Y., Arora, N., Mirzazadeh, A., Moon, I., Xu, E., Zhang, Z., Abowd, G. D., & Das, S. (2023). *Proceedings of the 32nd USENIX Security Symposium*.
- Feyiz, K. (2022). Akıllı şehrin gelişimi için geofencing teknolojileri. *Yapı Magazin İnşaat, Mimarlık, Malzeme, Yapı Teknolojileri Dergisi*.
- Gassert, R., & Dietz, V. (2018). Rehabilitation robots for the treatment of sensorimotor deficits: A neurophysiological perspective. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 15. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:46927688>
- Gonzalez Jimenez, H. (2018). Taking the fiction out of science fiction: (Self-aware) robots and what they mean for society, retailers and marketers. *Futures*, 98:49-56.
- Hintistan, S., & Çilingir, D. (2012). Hemşirelik uygulamalarında güncel bir yaklaşım: Telefon kullanımı. *Hemşirelikte Eğitim ve Araştırma Dergisi*. 9:30-5.

- Imperiale, A. (2000). *New flatness: Surface tension in digital architecture*. Birkhäuser.
- İslamoğlu, Ö., & Usta, G. (2018). Mimari tasarımda esneklik yaklaşımlarına kurumsal bir bakış. *The Turkish Online Journal of Design, Art and Communication - TOJDAC*, 8(4), 673-683.
- Ji, Y. S. (2021). Interactive smart space for single-person households using electroencephalogram through fusion of digital twin and artificial intelligence. *Energies*, 14(22), 7771. <https://doi.org/10.3390/en14227771>
- Kahraman, M. D. (2014). İnsan ihtiyaçları ve mekânsal elverişlilik kavramları perspektifinde yaşanabilirlik olgusu ve mekânsal kalite. *TMMOB Şehir Plancıları Odası Yayını*, 24(2), 74-84. <https://doi.org/10.5505/planlama.2014.29591>
- Kim, M. J., Cho, E. M., & Jun, J. H. (2020). Developing design solutions for smart homes through user-centered scenarios. *Frontiers in Psychology*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.00335>
- Kimyacı, M., & Çürük, M. S. (2020). Çoklu vericili görünür ışık haberleşmesinde kanal. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 9(1), 10-18. <https://doi.org/10.21541/apjes.779495>
- Kronenburg, R. H. (2001). *The spirit of the machine: Technology as an inspiration in architectural design*. Academy Press, 35(36), 98-107.
- Lee, L. N., & Kim, M. J. (2020). A critical review of smart residential environments for older adults with a focus on pleasurable experience. *Frontiers in Psychology*, 10. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.03080>
- Li, C. Z., & Boryck, E. M. (2019). Smart homes for healthcare. In *Improving Usability, Safety and Patient Outcomes with Health Information Technology* (pp. 283-287). IOS Press. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-951-5-283>
- Majumder, S., Aghayi, E., Noforesti, M., Memarzadeh-Tehran, H., Mondal, T., Pang, Z., & Deen, M. J. (2017). Smart homes for elderly healthcare—Recent advances and research challenges. *Sensors*, 17(11), 2496. <https://doi.org/10.3390/s17112496>
- Ma, C., Guerra-Santin, O., & Mohammadi, M. (2022). Smart home modification design strategies for ageing in place: A systematic review. *Journal of Housing and the Built Environment*, 37, 625- 651.
- Mersinoğlu, H. (2002). İletişim teknolojisi, mimarlık etkileşimi ve akıllı evler. *Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi*. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Önder, E. (2021). Geçmişten günümüze evde sağlık hizmetleri. In Ö. Özaydın & Ö. Güdük (Eds.), *Evde sağlık hizmetlerinde teknoloji kullanımı* (pp. 203-224). Nobel Akademik Yayıncılık.
- Özdenizci, B., Ok, K., Aydın, N. A., & Coşkun, A. (2016). Yakın alan iletişimi teknolojisi. Işık Üniversitesi, Fen Bilimleri Üniversitesi, Enformasyon Teknolojileri Bölümü. *Türkiye Bilişim Vakfı Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi*, 4(1), ID: JA37HU77PP
- Özdemir, S., & Arabacıoğlu, B. C. (2022). Mikrodenetleyici sistemlerin kullanımı ile etkileşimli mekân çözümlerinin iç mekân tasarımında sunduğu güncel olanak ve kısıtlar. *Megaron Dergisi*, 17(4), 625-635. <https://doi.org/10.14744/megaron.2022.20792>
- Özdemir, Z. (2019). GPS+GSM+GPRS teknolojileri ile gerçek zamanlı takip sistemi üzerinde geofence mekanizmasının tasarlanması ve GPS konum verilerindeki hata oranının düşürülmesi. *Yüksek Lisans Tezi*. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Pal, D., Triyason, T., & Funilkul, S. (2017). Smart homes and quality of life for the elderly: A systematic review. *Proceedings of the 2017 IEEE International Symposium on Multimedia (ISM)*. <https://doi.org/10.1109/ISM.2017.83>
- Schueler, N. (2010). Interactive architecture extending the Kansei engineering approach to real-time interactive spatial systems. In *International Conference on Kansei Engineering and Emotion Research*, 2(4), 2010, Paris.
- Schomakers, E.-M., Biermann, H., & Ziefle, M. (2020). Understanding privacy and trust in smart home environments. In *HCI for Cybersecurity, Privacy and Trust* (pp. 513-532). https://doi.org/10.1007/978-3-030-50309-3_34
- Shah, S. H., Iqbal, A., & Shah, S. S. A. (2013). Remote health monitoring through an integration of wireless sensor

- networks, mobile phones & cloud computing technologies. In *Proceedings of the 2013 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC)* (pp. 401–405). San Jose, CA, USA.
- Sine, Ö., & Koçyiğit, Y. (2019). İnternet üzerinden kontrol edilen tam otomasyonlu akıllı ev sistemleri için örnek bir uygulama.
- Soyjaudah, K. M. S., Ramsawock, G., & Khodabacchus, M. Y. (2013). Cloud computing authentication using cancellable biometrics. *AFRICON*.
- Söker, Y. (2024). İnteraktif mekan kavramının akıllı evler üzerinden incelenmesi. Haliç Üniversitesi İç Mimarlık Anabilim Dalı, *Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi*. İstanbul.
- Sözer, N., & Satıcı, B. (2022). Artırılmış gerçeklik teknolojisinin mimarlık sektörüne katkıları. *Teknoloji ve Uygulamalı Bilimler Dergisi*, 4(2), 109-119. <https://doi.org/0000-0002-5345-0131>, <https://doi.org/0000-0002-8919-6016>
- Stavropoulos, T. G., Papastergiou, A., Mpaltadoros, L., Nikolopoulos, S., & Kompatsiaris, I. (2020). IoT wearable sensors and devices in elderly care: A literature review. *Sensors*, 20(10), 2826.
- Stefanov, D. H., Bien, Z., & Bang, W. C. (2004). The smart house for older persons and persons with physical disabilities. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 12(2), 228-250.
- Şapçı, B. (2022). Mimarlıkta makine öğrenimi uygulamaları: Fırsatlar, zorluklar ve geleceğe dair öngörüler. *Lisans Tezi*. Başkent Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Anabilim Dalı: Mimarlık.
- Theoharidou, M., Tsalis, N., & Gritzalis, D. (2017). Smart home solutions: Privacy issues. In *Handbook of Smart Homes, Health Care and Well-Being* (pp. 67-81). https://doi.org/10.1007/978-3-319-01583-5_5
- Turer, B., & Yılmaz, M. (2022). Emerging technologies in 5G cellular communication systems. *European Journal of Science and Technology*, 36, 128-133. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1111312>
- Türk Dil Kurumu. (2024). *Yayın başlığı veya çevrimiçi sözlük/madde başlığı*. <https://www.tdk.gov.tr>
- Whende, M. C. (2020). Artificial intelligence, critical thinking, and the nursing process. *OJNI*, 23(1).
- Xia, L., Lan, L., Tang, J., Wan, Y., Lin, Y., & Wang, Z. (2020). Bed heating improves sleep quality and health of elderly adapting to cold environments. *Energy and Buildings*, 210, 109687. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:213230256>
- Yang, C., Lin, Y., Wang, S., Shen, V. R., Tung, Y., Shen, F. H., et al. (2023). Smart control of home appliances using hand gesture recognition in an IoT-enabled system. *Applied Artificial Intelligence*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:256921780>
- Yazıcı, O. (2022). Kullanıcı davranışlarını öğrenebilen, yapay zekaya sahip akıllı ev otomasyonu uygulaması. *Yüksek Lisans Tezi*. Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
- Yılmaz, A. K. (2006). Mimarlıkta adapte edilebilir ve güncellenebilirliğe yönelik bir araştırma. *Yüksek Lisans Tezi*. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yüzgeç, U., & Aba, Ö. (2017). Raspberry Pi kullanılarak bir akıllı ev uygulaması geliştirilmesi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 4(1), 2017. ISSN: 2458-7575.
- Url-1 Euronews. (2020). Smarter than the average home: How technology is aiding assisted living. Retrieved from <https://www.euronews.com/next/2020/09/25/smarter-than-the-average-home-how-technology-is-aiding-assisted-living>

Enerji Sistemlerinde Metasezgisel Optimizasyon Teknikleri: Yenilikçi Algoritmalar ve Uygulama Alanları

Metaheuristic Optimization Techniques in Energy Systems: Innovative Algorithms and Application Areas

Mert Ökten^{1*}

^{1*} Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Turgutlu, Manisa, Türkiye

ÖZET

Optimizasyon, tüm olası alternatifler arasından bir problemin en optimal çözümünü belirleme sürecidir. Enerji sistemlerinde metasezgisel optimizasyon algoritmaları, karmaşık enerji problemlerini çözmede önemli bir rol oynamaktadır. Metasezgisel optimizasyon algoritmaları, genetik algoritmalar, parçacık sürü optimizasyonu, simüle edilen tavlama, karınca kolonisi optimizasyonu gibi doğal süreçlerden esinlenerek geliştirilen ve genellikle bilgisayar tabanlı modellerle kullanılan özel optimizasyon yöntemleridir. Metasezgisel optimizasyon algoritmaları, büyük veri setleriyle çalışabilir ve farklı kısıtlamalar altında optimize edilmesi gereken çok sayıda değişkeni ele alabilirler. Bu nedenle enerji sektöründe sürdürülebilirlik, verimlilik ve karlılık açısından büyük öneme sahiptirler. Bu algoritmalar, enerji verimliliğini artırmak, enerji maliyetini azaltmak, enerji üretimi, dağıtımı, tüketimi ve depolanması gibi enerji sistemlerinin farklı bileşenlerini optimize etmek için, yenilenebilir enerji kaynaklarını entegre etmek ve enerji sistemlerinin karbon ayak izini azaltmak gibi çeşitli hedeflere ulaşmak için kullanılmaktadırlar. Bu çalışmada, enerji sistemleri uygulamalarında metasezgisel optimizasyon algoritmalarının kullanımı örnekler üzerinden incelenmiştir. İncelenen 2532 makale dikkate alındığında en çok genetik algoritma (%37.4) ile parçacık sürü optimizasyonunun (%25.5) kullanıldığı görülmüştür. Bu algoritmaların kullanımı ile karmaşık problemlerin çözümlerinin daha kolay indirildiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Enerji sistemleri, Enerji verimliliği, Metasezgisel optimizasyon algoritmaları, Sürdürülebilirlik.

ABSTRACT

Optimization is the process of determining the most optimal solution to a problem from among all possible alternatives. In energy systems, metaheuristic optimization algorithms play a significant role in solving complex energy problems. Metaheuristic optimization algorithms are specialized optimization methods developed by drawing inspiration from natural processes, such as genetic algorithms, particle swarm optimization, simulated annealing, and ant colony optimization. These algorithms are typically used in conjunction with computer-based models. Metaheuristic optimization algorithms can work with large datasets and handle a multitude of variables that need to be optimized under different constraints. Therefore, they are of great importance in the energy sector in terms of sustainability, efficiency, and profitability. These algorithms are used to achieve various objectives in the energy sector, including increasing energy efficiency, reducing energy costs, optimizing different components of energy systems such as energy production, distribution, consumption, and storage, integrating renewable energy sources, and reducing the carbon footprint of energy systems. In this study, the use of metaheuristic optimization algorithms in energy system applications has been examined through examples. Considering the 2532 articles analyzed, it was seen that genetic algorithm (37.4%) and particle swarm optimization (25.5%) were used the most. It has been observed that the use of these algorithms simplifies the solutions to complex problems in various energy-related contexts.

Keywords: Energy systems, Energy efficiency, Metaheuristic optimization algorithms, Sustainability

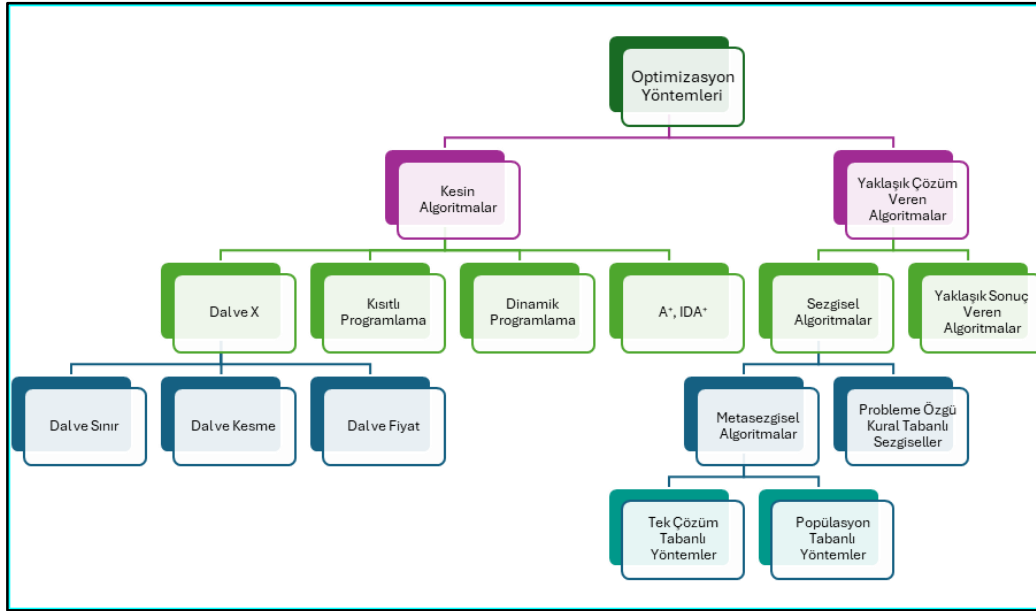
Başvuru: 02.09.2024 Son Revizyon: 17.10.2024 Kabul: 25.10.2024

Doi: 10.51764/smutgd.1542508

^{1*}Sorumlu yazar: Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Turgutlu, Manisa, Türkiye; E-mail: mert.okten@cbu.edu.tr ORCID: 0000-0003-0077-4471

1. GİRİŞ

Sürdürülebilirlik kavramı 1987 Brundtland Raporu ile ortaya çıkmış olsa da büyüme için gerekli olan enerji ihtiyacı ve enerjinin kullanımının neden olduğu çevresel bozulma 1968 Roma Kulübü'nün toplanmasından bu yana tartışılmaktadır. Optimizasyon, bir sistemi veya süreci en iyi sonuçları elde etmek için düzenleme veya ayarlama işlemidir. Karmaşık problemleri çözmek için sezgisel yaklaşımları kullanır. Sezgisel optimizasyon ile problemlerin çözümleri genelde çok fazla zaman almakla beraber elde edilen çözümler yerel çözümlerdir. Bilim insanları bu tekniklerinin sınırlamalarını aşmak için doğadan ilham alan metasezgisel algoritmalar geliştirmişlerdir (Varol Altay & Alataş, 2021). Bu yöntemler karmaşık problemlerin çözümünde başarılı sonuçlar üretmektedir (Varol Altay & Altay, 2021; Altay, 2022a). Şekil 1'de optimizasyon yöntemleri gösterilmiştir (Iqbal vd., 2014).



Şekil 1. Optimizasyon yöntemleri

Optimizasyon algoritmalarından popülasyon tabanlı algoritmalar çözüm uzayını geniş çapta keşfetmek ve optimize etmek için popülasyon kullanarak çok sayıda potansiyel çözümü aynı anda değerlendiren yöntemlerdir. Kesin (Deterministik) algoritmalar, belirli bir girişe her zaman aynı çıkışı veren, adım adım ilerleyen yöntemlerdir. Genellikle optimizasyon problemlerinde kesin çözüme ulaşmak için kullanılırlar. Bu algoritmalar doğrusal programlama, doğrusal kısıtlamalar ve doğrusal bir hedef fonksiyonu ile tanımlanmış problemlerde, en iyi çözümü bulmak için kullanılır. Dinamik programlama, büyük problemleri daha küçük, bağımsız alt problemlere ayırır. Alt problemlerin çözümleri birleştirilerek nihai çözüm elde edilir. Dallanma ve sınırlandırma yöntemi, kombinatoriyal optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılır. Problemi dallara ayırarak çözüm arar ve alt problemlerde mümkün olmayan çözümleri eler. Gradyan tabanlı algoritmalar, sürekli ve türevlenebilir fonksiyonların optimizasyonu için kullanılır. Sezgisel ve metasezgisel algoritmalar ise genellikle kesin çözümlerin zor olduğu durumlarda, çözüm uzayını keşfetmek için sezgisel yöntemler kullanır. Bu algoritmalar genellikle kesin çözüm garantisi vermez, ancak pratikte iyi sonuçlar üretir.

Metasezgisel algoritmalar, evrimsel süreçler, doğadaki sürü davranışları, fiziksel süreçler gibi çeşitli biyolojik ve doğal süreçlerden ilham alarak geliştirilmiştir. Bu, bilim dünyasına yeni optimizasyon algoritmalarının eklenmesini sağlamış, biyomimikri ve doğadan ilham alan algoritmalar gibi yeni araştırma alanlarının doğmasına yol açmıştır (Tablo 1). Metasezgisel optimizasyon algoritmaları, büyük ölçekli, karmaşık problemlerde verimli bir şekilde arama yapma sürecini yönetir ve kullanılırlar (Altay, 2022b; Altay & Varol Altay, 2022; Varol Altay & Altay, 2023a; Varol Altay & Altay, 2023b; Altay & Varol Altay, 2023). Geleneksel optimizasyon yöntemlerinin başarısız olduğu veya etkisiz kaldığı durumlarda, metasezgisel yöntemler esneklikleri sayesinde çözüm üretirler. Bilimsel araştırmalarda, mühendislikten biyolojiye, ekonomiden lojistiğe kadar geniş bir alanda uygulanabilirler. Birçok optimizasyon problemi yerel maksimum veya minimum noktalar içerir. Geleneksel algoritmalar bu yerel çözümlere takılabilirken, metasezgisel algoritmalar global optimuma yaklaşma becerisine sahiptir. Bu sayede, bilimsel araştırmalarda daha iyi ve global çözümler elde edilebilir. Metasezgisel algoritmalar problemden bağımsızdır ve farklı problem türlerine uyarlanabilirler. Bu durum, bilimsel araştırmalarda farklı alanlardaki problemlerin çözümünde kullanılacak evrensel optimizasyon yöntemlerinin geliştirilmesini sağlar. Örneğin, bir biyoloji problemi ile mühendislik problemini çözmek için aynı metasezgisel algoritmanın farklı modifikasyonlarla uygulanması mümkündür. Metasezgisel optimizasyon algoritmaları, bilimsel araştırmaların hemen her

disiplininde uygulanmaktadır. Bunlar; endüstriyel tasarım ve üretim alanında fabrika yerleşimi, üretim süreçleri ve lojistik yönetimi gibi endüstriyel problemlerin optimize edilmesinde (Ghalizadeh vd., 2022; Klar vd., 2023; Abualigah vd., 2023), taşıma ve lojistik alanında dağıtım rotalarının optimize edilmesi, taşıma maliyetlerinin azaltılması ve envanter yönetimi gibi lojistik uygulamalarında (Kinost vd., 2022; Detwal vd., 2023), telekomünikasyon alanında kablosuz ağların yerleşimi, sinyal gücü optimizasyonu ve frekans tahsisi gibi alanlarda (Dokeraglu vd., 2022; Khelili vd., 2023), finansal analiz alanında portföy optimizasyonu, risk yönetimi ve hisse senedi fiyat tahmini gibi finansal problemlerin çözümünde (Doering vd., 2019; Chou vd., 2022; Aghabegloo vd., 2023), sağlık ve tıp alanında tedavi planlaması, ilaç dozu optimizasyonu ve tıbbi görüntü işleme gibi sağlık alanlarında (Rahul & Banyal, 2022), ulaşım ve trafik yönetimi alanında trafik sinyalizasyonu, akıllı şehirlerin planlaması ve trafik sıkışıklığının azaltılması gibi alanlarda (Shirke vd., 2021; Fanian & Rafsanjani, 2023), enerji ve kaynak yönetimi alanında enerji tüketimi optimizasyonu (Nassef vd., 2023; Wang vd., 2023; Sulaiman vd., 2023; Wang vd., 2023), enerji üretim planlaması (Mendi vd., 2010; Cheraghi & Jahangir, 2023; Değer vd., 2023; Zhao vd., 2023) ve doğal kaynakların etkin kullanımı gibi alanlarda (Damgacı vd., 2017; Varol Altay vd., 2022; Mihaly vd., 2023; Ala vd., 2023), makine öğrenme ve veri madenciliği alanında makine öğrenme algoritmalarının hiper parametre ayarlaması ve model seçimi gibi problemlerdir (Lessmann vd., 2011; Khan vd., 2022). Bu geniş uygulama yelpazesi, bilimsel araştırmalarda çok disiplinli çözümler üretme yeteneğini güçlendirmiştir. Büyük veri analitiği ve yapay zeka gibi modern teknolojilerde optimizasyon büyük bir öneme sahiptir. Metasezgisel algoritmalar, bu alanlarda etkili çözümler üretmek için verilerin anlamlandırılmasına, karmaşık modellemelere ve hızlı çözüm üretimine katkı sağlamaktadır. Özellikle makine öğrenimi ve derin öğrenme süreçlerinde optimizasyon için sıklıkla metasezgisel yaklaşımlar kullanılmaktadır.

Tablo 1. Metasezgisel optimizasyon algoritmaları

Optimizasyon Adı	Referans	Optimizasyon Adı	Referans
Açgözlü Rastgele Uyarlanabilir Arama Prosedürleri	Feo & Resende, 1989	Açlık Oyunları Arama Optimizasyonu	Kutlu Onay & Aydemir, 2022
Ağaç-Tohum Algoritması	Kiran & Kiran, 2015	Ağırlıklı Üstünlük Çekimi	Baykasoglu & Senol, 2016
Akıllı Su Damlacıkları	Hosseini, 2007	Akıncı Optimizasyonu	Abualigah vd., 2021
Altın Kaplumbağa Optimizasyonu	Tarkheneh vd., 2021	Arama Yapan Algoritma	Dhiman & Kumar, 2019
Aritmetik Optimizasyon Algoritması	Li vd., 2022	Arşimet Optimizasyon Algoritması	Hashim vd., 2021
Aslan Optimizasyon Algoritması	Yazdani & Jolai, 2015	Ateşböceği Algoritması	Yang, 2010a
Atom Arama Optimizasyonu	Zhao vd., 2019a	Ayı Koku Arama Algoritması	Ghasemi-Marzbali, 2020
Bakteriyel Gezinme Optimizasyonu	Civicioglu, 2013a	Bal Arılarında Evlilik Optimizasyonu	Abbass, 2001
Balina Optimizasyon Algoritması	Mirjalili & Lewis, 2016	Bayesyen Optimizasyon Algoritması	Pelikan vd., 1999
Beyaz Balina Optimizasyonu	Zhong vd., 2022	Bilgi Kazanma ve Paylaşma Temelli Algoritma	Mohamed vd., 2020
Bitki Büyüme Simülasyonu	Boettcher & Percus, 2001	Biyocoğrafya Tabanlı Optimizasyon	Bhattacharya & Chattopadhyay, 2011
Büyük Patlama Büyük Çöküş	Sakthivel vd., 2013	Cıvık Mantar Optimizasyon Algoritması	Monismith & Mayfield, 2008
Çakal Optimizasyon Algoritması	Pierezan & Coelho, 2018	Çapraz Optimizasyon Algoritması	Meng vd., 2014
Çarpışan Cisimler Optimizasyonu	Feng vd., 2021	Çekirgeler Optimizasyonu	Saremi vd., 2017
Çıplak Kör Köstebek Algoritması	Salgotra vd., 2021	Çiçek Tozlaşma Algoritması	Yang, 2012
Çok Evrenli Optimizasyon Algoritması	Sayed vd., 2018	Çoklu Strateji İyileştirilmiş Sinüs Kosinüs Algoritması	Chen vd., 2020
Dağ Geyiği Optimizasyonu	Abdollahzadeh vd., 2022	Dağıtık Arama	Kirkpatrick vd., 1986
Dağıtım Tahmini Algoritmalar	Mühlenbein & Pass, 1996	Değişken Mahalle Arama	Mladenovi C & Hansen, 1997
Dentritik Hücre Algoritması	Greensmith vd., 2000	Denge Optimizasyonu	Faramarzi vd., 2020a
Deniz Yırtıcıları Algoritması	Faramarzi vd., 2020b	Denizanası Arama Optimizasyonu	Chou & Truong, 2021
Dev Yüzgeçli Manta Ray Avı Optimizasyonu	Zhao vd., 2020	Diferansiyel Arama Algoritması	Civicioglu, 2012
Diferansiyel Evrim	Storn & Price, 1997	Difüzyon Sınırlı Birikim	Witten & Sander, 1981
Dinamik Sanal Yarasa Algoritması	Topal & Altun, 2016	El Bombası Patlama Yöntemi	Ahrari & Atai, 2010
Elektromıknatis Benzeri Mekanizma	Emami & Derakhshan, 2015	Emperyalist Rekabetçi Algoritma	Atashpaz-Gargari & Lucas, 2007
Enerji Vadisi Optimizasyonu	Azizi vd., 2023	Evrim Algoritmaları	Rechenberg, 1971
Evrim Stratejileri	Fogel, 2009	Evrimci Çiftleşme Algoritması	Sulaiman vd., 2023
Fikir Fırtınası Süreci Algoritması	Yuhui, 2011	Fil Sürüsü Optimizasyonu	Wang vd., 2015a
Fitness'a Bağlı Optimizasyon	Mohammed & Rashid, 2021	Futbol Ligi Yarışma Algoritması	Moosavian & Roodsari, 2014

Tablo 1. Metasezgisel optimizasyon algoritmaları (devamı)

Optimizasyon Adı	Referans	Optimizasyon Adı	Referans
Galaksi Tabanlı Arama Algoritması	Hosseini, 2011	Galaktik Sürü Optimizasyonu	Muthiah-Nakarajan & Noel, 2016
Gazların Brownian Hareketi	Abdechiri vd., 2013	Geçen Araç Arama	Savsani & Savsani, 2016
Geçici Arama Algoritması	Qais vd., 2020	Geliştirilmiş Ateşböceği Optimizasyon Algoritması	Pelusi vd., 2020a
Geliştirilmiş Çekirge Optimizasyon Algoritması	Luo vd., 2018	Genetik Algoritmalar	Holland, 1992
Geriye İzleme Arama Algoritması	Passino, 2002	Girdap Arama Algoritması	Dogan & Olmez, 2015
Gravitasyonel Arama Algoritması	Rashedi vd., 2009	Gri Kurt Optimizasyonu	Mirjalili vd., 2014
Grup Arama Optimizasyonu	He vd., 2006	Güve Alevi Optimizasyonu	Mirjalili, 2015a
Güvercin İlhamlı Optimizasyon	Duan & Qiao, 2014	Harris Şahinleri Optimizasyonu	Heidari vd., 2019
Havai Fişek Algoritması	Tan & Zhu, 2010	Henry Gaz Çözünürlüğü Optimizasyonu	Hashim vd., 2019
Hızlı Grup Arama Optimizasyonu	Guang vd., 2010	Hibrid Örnekleme Evrim Stratejisi	Zhang & Shi, 2018
Hiperbolik Gravitasyonel Arama Algoritması	Pelusi vd., 2020b	Hiper-Küresel Arama Algoritması	Karami vd., 2014
Işın Optimizasyon Algoritması	Kaveh & Khayatazad, 2012	İstilacı Yabani Ot Optimizasyonu	Mehrabian & Lucas, 2006
İşbirliği Arama Algoritması	Salcedo-Sanz vd., 2014	İyon Hareket Optimizasyon Algoritması	Javidy vd., 2015
Jaya Algoritması	Rao, 2016	Kaotik Optimal Algoritma	Qu vd., 2010
Kaotik Optimizasyon Algoritması	Demir vd., 2020	Kapuçin Arama Algoritması	Braik vd., 2021
Kara Dul Optimizasyon Algoritması	Hayyolalam & Pourhaji Kazem, 2020	Karga Arama Algoritması	Askarzadeh, 2016
Karınca Kolonisi Optimizasyonu	Dorigo vd., 1991	Karınca Aslanı Optimizasyonu	Mirjalili, 2015b
Karışık Kurbağa Sıçraması Algoritması	Dai vd., 2006	Karides Sürüsü Algoritması	Gandomi & Alavi, 2012
Kartal Stratejisi	Kumar vd., 2017	Kedi Sürü Optimizasyonu	Chu vd., 2006
Kel Kartal Arama Algoritması	Alsattar vd., 2020	Kimyasal Reaksiyon Tabanlı Optimizasyon	Lam & Li, 2010
Kinetik Gaz Molekülü Optimizasyonu	Moein & Logeswaran, 2014	Klonal Seçim Algoritması (Clonalg)	De Castro vd., 2002
Kohort Zeka	Kulkarni vd., 2013	Kovaryans Matris Adaptasyon Evrim Stratejisi	Kaveh & Mahdavi, 2014
Kovaryans Matris Uyarlanmış Geri Çekilme Fazı ile Etkili Kelebek Optimizasyonu	Yang & Deb, 2010	Kuantum İlhamlı Evrimsel Algoritma	Narayanan & Moore, 1996
Kukumav Arama Algoritması	Yang & Deb, 2009	Kurt Arama Algoritması	Tang vd., 2012
Kuş Sürüsü Algoritmaları	Varol Altay & Alatas, 2020	Kuyruk Arama	Zhang vd., 2018
Kültürel Algoritma	Reynolds, 1994	Küresel Evrim Algoritması	Yang vd., 2021
Lichtenberg Algoritması	Pereira, 2021	Lig Şampiyonası Algoritması	Kashan, 2014
Martı Optimizasyonu	Glover, 1977	Mayın Patlaması Algoritması	Sadollah vd., 2013
Maymun Algoritması	Zhao & Tang, 2007	Melodi Arama Algoritması	Ashrafi & Dariane, 2013
Memetik Algoritmalar	Moscato, 1989	Memetik Kurbağa Sıçraması Algoritması	Eusuff & Lansey, 2003
Mercan Resifleri Optimizasyonu	Hansen vd., 2013	Meyve Sineği Optimizasyonu	Pan, 2012
Monarş Kelebeği Optimizasyonu	Wang vd., 2015b	Müzayede Tabanlı Algoritma	Binetti vd., 2013
Nehir Oluşumu Dinamikleri	Rabanal vd., 2007	Optik İlhamlı Optimizasyon	Kashan, 2015
Ortalama-Varyans Haritalama Optimizasyonu	Erlich vd., 2010	Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon	Rao vd., 2011
Ön Tabanlı Yin-Yang Çifti Optimizasyonu	Punnathanam & Kotecha, 2016	Papatya Arama Algoritması	El-Abd, 2013
Parçacık Sürü Optimizasyonu	Poli vd., 2007	Parlayan Solucan Sürü Optimizasyonu	Krishnanand & Ghose, 2005
Popülasyon Ekstremal Optimizasyon	Li vd., 2005	Radyal Hareket Optimizasyonu	Rahmani & Yusuf, 2014
Rüzgarla Sürücü Optimizasyon	Bayraktar vd., 2010	Sakar Optimizasyon Algoritması	Naruei & Keynia, 2021
Salp Sürü Algoritması	Mirjalili vd., 2017	Savaş Royale Optimizasyonu	Rahkar Farshi, 2021
Seçim Algoritması	Cuevas vd., 2012	Serçe Arama Algoritması	Zhang & Ding, 2021
Sıçan Sürü Optimizasyonu	Dhiman vd., 2021	Simbiyotik Organizmaların Arayış	Cheng & Prayogo, 2014
Simülasyonlu Tavlama	Eusuff vd., 2006	Sincap Arama Algoritması	Jain vd., 2019
Sinüs-Kosinüs Algoritması	Mirjalili, 2016	Snap-Drift Kuvayı Arama	Rakhshani & Rahati, 2017
Sosyal Grup Optimizasyonu	Satapathy & Naik, 2016	Sosyal Örümcek Algoritması	Yu & Li, 2015
Stokastik Fraktal Arama	Salimi, 2015	Su Dalgaları Optimizasyonu	Zheng, 2015
Su Döngüsü Algoritması	Eskandar vd., 2012	Tabu Arama	Glover, 1989
Tarım Alanı Verimliliği Optimizasyonu	Shayanfar & Gharehchopogh, 2018	Termal Değişim Optimizasyon Algoritması	Kaveh & Dadras, 2017
Uygar Sürü Optimizasyonu	Ray & Liew, 2003	Virüs Kolonisi Arama	Li vd., 2016
Virüs Optimizasyon Algoritması	Liang & Juarez, 2016	Voleybol Premier Ligi	Moghdani & Salimifard, 2018

Tablo 1. Metasezgisel optimizasyon algoritmaları (devamı)

Optimizasyon Adı	Referans	Optimizasyon Adı	Referans
Yağmur-Düşme Optimizasyonu	Kaboli vd., 2017	Yapay Alg Yosunu Algoritması	Uymaz vd., 2015
Yapay Arı Kolonisi	Karaboga & Basturk, 2007	Yapay Bağışıklık Sistemi	Farmer vd., 1986
Yapay Balık Sürüsü Algoritması	Xian vd., 2017	Yapay Ekosistem Tabanlı Optimizasyon	Zhao vd., 2019b
Yapay İşbirliği Arama Algoritması	Civicioglu, 2013b	Yapay Kalabalıkların Bilgeliği	Yampolskiy vd., 2012
Yapay Kertenkele Arama Optimizasyonu	Numar vd., 2021	Yarasa Algoritması	Yang & Hossein Gandomi, 2012
Yarasa İlhamlı Algoritma	Yang, 2010b	Yılan Optimizasyonu	Hashim & Hussein, 2022
Yırtıcı-Av Optimizasyonu	Higashitani vd., 2006	Yunus Eko-Lokasyon Algoritması	Kaveh & Farhoudi, 2013
Yusufçuk Algoritması	Mirjalili, 2013	Yüklü Sistem Arama	Kaveh & Talatahari, 2010

Bu çalışmada, enerji sistemlerinde metasezgisel optimizasyon algoritmalarının kullanımı örnekler üzerinden incelenmiştir. Bu makalenin amacı, enerji sistemlerindeki optimizasyon sorunlarına farklı metasezgisel yöntemlerin nasıl uygulandığını incelemek ve bu alandaki mevcut çalışmalarını bir araya getirerek derinlemesine analiz sunmaktır. Ayrıca enerji sistemlerinde karşılaşılan tipik optimizasyon problemlerini (örneğin, enerji üretim planlaması, dağıtım ağları optimizasyonu) belirleyip ve bu problemlerin doğasını açıklayarak metasezgisel algoritmaların enerji sistemleri problemlerine nasıl uygulandığını karşılaştırmaktır.

2. MATERYAL ve METOT

Popülasyon tabanlı metasezgisel optimizasyon yöntemlerinin genel yapısı aşağıdaki gibi temsil edilebilir (Radosavljević, 2018):

1. Hedef fonksiyon $F(x_i)$ ve mümkün çözüm uzayı X 'i tanımlama,
2. N elemanın başlangıç popülasyonunu oluşturma (Denklem 1):

$$POP(1) = [x_1(1), \dots, x_i(1), \dots, x_N(1)]^T \subseteq X \quad (1)$$

Genellikle her elemanın başlangıç konumları kontrol değişkenlerinin minimum ve maksimum değerleri arasından rastgele seçilir.

İterasyon sayacını ayarlama: $t = 1$

3. Mevcut popülasyon $POP(t)$ içindeki her eleman için $F(x_i(t))$ uygunluk değerini hesaplama, $x_i(t)$, $i = 1, \dots, N$
4. Algoritma operatörlerini mevcut popülasyon $POP(t)$ içindeki arama elemanlarına uygulayarak yeni popülasyonu oluşturma (Denklem 2):

$$POP(t+1) = [p_1(t+1), \dots, p_i(t+1), \dots, p_N(t+1)]^T \subseteq \mathbb{R} \quad (2)$$

5. Durdurma kriterleri karşılanana kadar iteratif işlemi tekrar etme.
6. En iyi çözüm x^* 'i belirleme.

Yeni bir popülasyon tabanlı optimizasyon algoritma oluşturmak için takip edilmesi gereken bazı kurallar vardır. Bunlar:

1. Başlangıçta, N elemandan (potansiyel çözümler) oluşan bir başlangıç popülasyonu, kontrol değişkenlerinin önceden tanımlanmış sınırları arasından rastgele seçilen değerlerle oluşturulur. Her eleman, kontrol değişkenlerinin değerlerini içeren n -boyutlu bir vektördür.
2. Mevcut popülasyondaki her eleman için amaç fonksiyonunun değeri hesaplanır, amaç fonksiyonunun en iyi ve en kötü değerleri belirlenir ve mevcut popülasyondaki en iyi (x_{iyi}) ve en kötü ($x_{kötü}$) elemanları bulunur.
3. En iyi, x_{iyi} , en kötü, $x_{kötü}$ 'ye dayanarak, mevcut popülasyondan mevcut çözümleri yeni (daha iyi) çözümler elde etmek için değiştirmek üzere doğada veya toplumda meydana gelen bir olay taklit edilerek bir düzen oluşturulur. Temel olarak, tüm güncelleme düzenleri, mevcut çözümleri mevcut en iyi çözümden uzaklıklarına göre değiştirmeye dayanır, ayrıca önemli bir bileşen ekler, bu da süreci yeni bir çözüm oluştururken rastgele bir değişkenlik (rastgeleleştirme) ekler. Bu adım, yeni algoritmanın tanımlanma sürecinde önemlidir.

4. 2 ve 3 numaralı maddelerde açıklanan tüm prosedür, maksimum iterasyon (nesil) sayısına ulaşılan kadar tekrarlanır. Son iterasyonda elde edilen çözüm, optimizasyon problemi için en iyi çözümdür.

Basit bir popülasyon tabanlı metasezgisel optimizasyon algoritmasının adımları şu şekildedir:

Adım 1: Amaç fonksiyonu $F(x)$ tanımlanır; aday bir çözüm olarak düşünülen vektör x içindeki kontrol değişkenleri (popülasyon büyüklüğü (N), kontrol değişkenlerinin sayısı (n), kontrol değişkenlerinin sınırları ve toplam iterasyon sayısı (t_{max})) tanımlanır.

Adım 2: Kontrol değişkenlerinin önceden tanımlanmış sınırları içinde N aday çözümün (arama elemanı) başlangıçta rastgele bir popülasyonu oluşturulur.

Adım 3: Mevcut popülasyondaki her eleman için $F(x_i(t))$ uygunluk değeri hesaplanır $[[x_i(t), i = 1, \dots, N]$, en iyi uygunluk değeri ve karşılık gelen en iyi eleman $x_{iyi}(t)$ mevcut popülasyonda belirlenir.

Adım 4: Tüm aday çözümler Denklem 3'te verildiği şekilde güncellenir:

$$x_i^d(t+1) = x_i^d(t) + r_1 \times K_1 [x_i^d(t) - x_{best}^d(t)] + S \times r_2 \times K_2 [(x_i^d(t))^2 - (x_{best}^d(t))^2] \quad (3)$$

$$i = 1, \dots, N; \quad d = 1, \dots, n$$

Burada, $x_i^d(t)$, t iterasyonunda i . aday çözümün d . kontrol değişkeninin değeri; r_1 ve r_2 $[0,1]$ aralığında rastgele üretilen sayılar; $x_{best}^d(t)$ (t), t iterasyonunda d . kontrol değişkeninin en iyi değeri; K_1 ve K_2 pozitif sabitler; S , her iterasyonda Denklem 4 ile belirlenen bir katsayıyı ifade etmektedir.

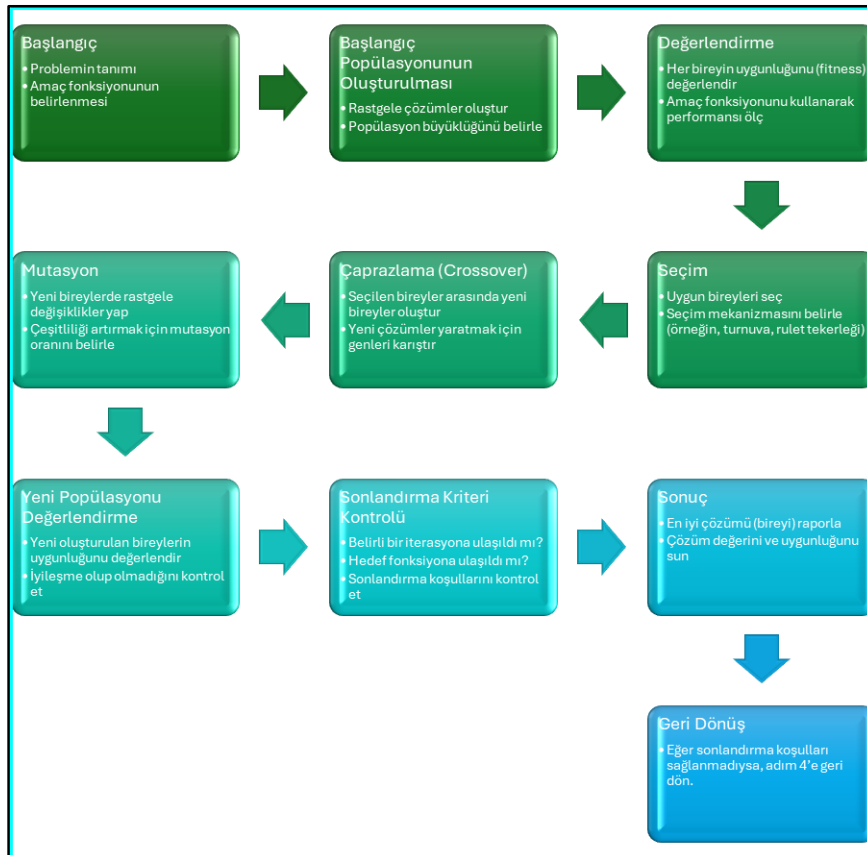
$$\text{if } rand > 0.5 \text{ then } S = 1; \text{ else } S = -1; \text{ end} \quad (4)$$

Adım 5: Tüm elemanlar için arama uzayı sınırlarını kontrol edilir. Arama uzayından çıkan elemanlar rastgele yeniden başlatılır.

Adım 6: İteratif işlem (Adım 3-5) durma kriterine ulaşıncaya kadar ($t = t_{max}$) tekrar edilir.

Adım 7: Son iterasyonda belirlenen en iyi çözümü raporlanarak işlem sonlandırılır.

Doğadan ilham alan bir metasezgisel optimizasyon algoritması için bir akış şeması Şekil 2'de, bu akış şemasının enerji sistemleri problemlerine uyarlanması ise Tablo 2'de gösterilmiştir (Iqbal vd., 2014).



Şekil 2. Doğadan ilham alan bir metasezgisel optimizasyon algoritması için bir akış şeması

Tablo 2. Enerji sistemleri problemleri optimizasyonu için akış şeması

Adım	Açıklama	Kriterler
Başlangıç	Enerji optimizasyon problemi tanımlanır ve amaç belirlenir.	- Güneş: Panel verimliliği, kurulum maliyeti. - Rüzgar: Türbin verimliliği, yer seçimi. - Nükleer: Güvenlik, kapasite. - Hidroelektrik: Su akışı, çevresel etkiler. - Jeotermal: Sıcaklık, sondaj derinliği. - Biyokütle: Hammadde verimliliği. - Hidrojen Üretimi: Elektrolizör verimliliği, maliyet. - Termik Santraller: Yakıt verimliliği, emisyonlar. - Elektrikli Araçlar: Batarya kapasitesi, şarj süreleri. - Hidrojen Yakıtlı Araçlar: Yakıt hücresi verimliliği, maliyet. - Enerji Depolama Sistemleri: Depolama kapasitesi, verimlilik. - Dalga Enerjisi: Dalgaların enerjisi, kurulum maliyeti. - Piller: Kapasite, döngü ömrü. - Termal Depolama: Isı kaybı, verimlilik.
Başlangıç Popülasyonu	Farklı enerji kaynaklarını temsil eden rastgele çözümler oluşturulması.	Rastgele tasarımlar oluşturulur. (Örneğin, 100 farklı enerji sistemi tasarımı)
Değerlendirme	Her bireyin uygunluğu değerlendirilir.	Uygunluk kriterleri her enerji kaynağı için belirlenir.
Seçim	Uygun bireyler seçilir.	Uygunluk skoru en yüksek olan bireyler seçilir.
Çaprazlama	Seçilen bireyler arasında yeni bireyler oluşturulması.	- Güneş ve rüzgar sistemlerinin birleşimi. - Nükleer ile yenilenebilir enerji entegrasyonu. - Hidrojen üretimi ile enerji depolama sistemlerinin entegrasyonu. - Termal enerji ile elektrik enerjisi entegrasyonu.
Mutasyon	Yeni bireylerde rastgele değişiklikler yapılması.	- Güneş paneli yerleşim düzeninin değiştirilmesi. - Rüzgar türbini yüksekliği değişimi. - Termik santral yakıt türü değişimi. - Elektrikli araç batarya kapasitesi değişimi. - Biyokütle yakıt türü değişimi.
Yeni Popülasyon Değerlendirme	Yeni bireylerin uygunluğu yeniden değerlendirilir.	Çevresel etkiler, ekonomik analizler ve sürdürülebilirlik kriterleri kontrol edilir.
Sonlandırma Kontrolü	Belirli bir iterasyona ulaşıldı mı? Hedef fonksiyona ulaşıldı mı?	Sonlandırma koşulları kontrol edilir.
Sonuç	En iyi çözüm (enerji sistemi tasarımı) raporlanır.	Çözüm değerleri (verimlilik, maliyet, çevresel etki) sunulur.
Geri Dönüş	Eğer sonlandırma koşulları sağlanmadıysa, adım 4 (Seçim)'e geri dön.	Uygun bireylerin yeniden seçimi ve sürecin devamı.

Günümüzde PYTHON (PYTHON, 1995) yazılım dili ve MATLAB (MATLAB, 2018) programında *metahopt*, *opfdngui* gibi yardımcı araç takımları ile hazır metasezgisel optimizasyon algoritmaları ile işlem yapılabilmektedir.

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

Enerji sistemleri problemleri, enerji üretimi, iletimi ve dağıtımını, tüketimi ve kaynak yönetimi ile ilgili çeşitli karmaşık mühendislik ve optimizasyon sorunlarını içerir. Bu problemler arasında şunlar bulunur (Chicco & Mazza, 2019; Lee & Vale, 2020):

- ❖ Ünite atama: Enerji santrallerinin hangi birimlerinin ve ne zaman devreye alınacağı belirlenmesi için yapılan bir optimizasyon sürecidir. Bu, enerji üretimini optimize etmek ve işletme maliyetlerini minimize etmek için önemlidir.
- ❖ Ekonomik dağıtım: Elektrik enerjisinin üreticiler arasında ekonomik bir şekilde dağıtılması ve enerji üretim maliyetlerinin minimize edilmesi için yapılan bir optimizasyon sürecidir.
- ❖ Optimal güç akışı: Elektrik iletim ağındaki gerilim seviyeleri, akım düzenlemeleri ve güç faktörü düzenlemelerini optimize etmek için kullanılan bir optimizasyon sürecidir. Elektrik ağının güvenli ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlar.
- ❖ Dağıtım sistemi yeniden yapılandırma: Dağıtım sistemlerinin yeniden yapılandırılması, enerji kaynaklarının daha iyi kullanılmasını ve enerji kaybını minimize etmeyi amaçlar.

- ❖ İletim ağı genişleme planlaması: Elektrik iletim ağındaki genişleme projelerinin planlanması ve optimize edilmesi için yapılan bir süreçtir. Bu, enerji talebinin karşılanmasını ve iletim ağı kapasitesinin artırılmasını hedefler.
- ❖ Dağıtım sistemi planlaması: Elektrik enerjisi dağıtım sistemlerinin planlanması ve optimize edilmesi için yapılan bir süreçtir. Dağıtım ağı verimliliğini artırmayı ve kesintileri minimize etmeyi amaçlar.
- ❖ Yük ve üretim tahmini: Elektrik tüketimini ve enerji üretimini gelecekte tahmin etmek için kullanılan modeller ve teknikler içerir. Bu tahminler, enerji üretim ve dağıtım planlamasında önemlidir.
- ❖ Bakım programlama: Enerji santralleri ve iletim ekipmanlarının bakım ve onarım çalışmalarının zamanlamasının optimize edilmesi için yapılan bir süreçtir. Bu, sistem güvenilirliğini ve işletim sürekliliğini sağlamayı amaçlar.

Enerji kaynaklarında yaygın kullanılan veriler, kısıtlar ve amaçlar Tablo 3'te (Iqbal vd., 2014), sistemler ve uygulama örnekleri ise Tablo 4'te gösterilmiştir.

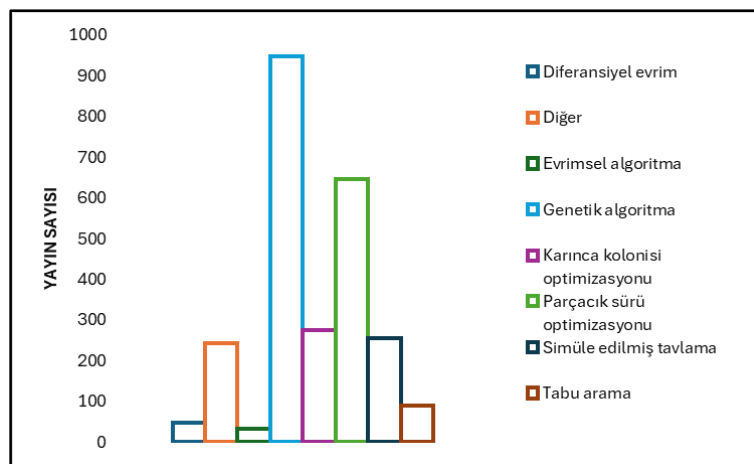
Tablo 3. Enerji kaynaklarında yaygın kullanılan veriler

Girdiler	Çözümü Araştıran Konular
Atmosfer koşulları	Beklenen kar
Enerji kaynağı birim teknolojisi	Enerji kaynağı birimlerinin en iyi karışımı
Enerji kaynak birimlerinin coğrafi yerleşimi	Enerji kaynağı yerleşimi
Enerji kaynak, birim, tip ve sayısı	Enerji kaynağının güvenilirliği
Etkinlik	Enerji kaynağının ömrü
İşlem ömrü	İşlem ve bakım maliyetleri
Kullanılan arazi miktarı	Özel değişkenler
Meteoroloji şartları	Tahmin edilen arazi kullanımı
Operasyon bakım ve maliyeti	Toplam yatırım
Operasyon çeşidi	Toplam üretilen enerji
Özel girdiler	Üretim birim kapasite ve sayısı
Kısıtlar	Amaçlar
Atmosfer ve çevre koşulları	<i>En küçükleme (Minimizasyon)</i>
Bileşenlerin yaşam ömrü	Arazi alanı
Bütçe	Birim başına üretilen enerji maliyeti
Dağıtım hatlarında maksimum güç akış limiti	Enerji tedarik kayıp olasılığı
Enerji kaynak birimlerinin güç oran kısıtı	Gürültü ve kirlilik emisyonu
Enerji kaynakları için kullanılan arazi boyutu	Sistem toplam maliyeti
Enerji kısıt maliyeti	Toplam bakım maliyeti
Güç kaybı olasılığı	Yatırım
Karbondioksit emisyonu	<i>En büyükleme (Maksimizasyon)</i>
Özel kısıtlar	Kar
Pillerin depolama kapasitesi	Özel amaçlar
Sosyal düzenleyici koşullar	Sistem güvenilirliği
Şarj ve boşaltma limiti	Termal verimlilik
Talep ve yük yönetimi	Toplam gelir
Üretim birimleri	Toplam güç üretimi
	Yaşam süresi

Tablo 4. Sistemler ve uygulama örnekleri

Sistemler	Özellikler	Uygulama Örnekleri	Girdi Verileri	Çıktı Verileri
Biyokütle enerjisi	Hammadde verimliliği, emisyonlar.	- Biyokütle santralleri. - Biyogaz üretimi.	- Hammadde özellikleri. - Üretim koşulları.	- Üretilen enerji miktarı. - Emisyon düzeyleri.
Dalga enerjisi	Dalgaların enerjisi, kurulum maliyeti.	- Dalga enerjisi santralleri.	- Dalgaların yüksekliği ve frekansı. - Kurulum şartları.	- Üretilen enerji miktarı. - Maliyet analizi.
Elektrikli araçlar	Batarya kapasitesi, şarj süreleri.	- Elektrikli otomobiller. - Elektrikli otobüs ve ticari araçlar.	- Batarya durumu. - Şarj süresi.	- Araç menzili. - Enerji tüketimi.
Enerji depolama sistemleri	Depolama kapasitesi, verimlilik.	- Lityum-iyon piller. - Enerji depolama sistemleri.	- Depolama kapasitesi. - Enerji akış verileri.	- Depolanan enerji miktarı. - Verimlilik oranı.
Güneş enerjisi	Panel verimliliği, kurulum maliyeti.	- Güneş enerjisi santralleri. - Güneşle çalışan su ısıtıcıları.	- Güneş ışınımı verileri. - Panel verimliliği.	- Üretilen enerji miktarı. - Geri dönüş süresi.
Hidroelektrik enerji	Su akışı, çevresel etkiler.	- Barajlı hidroelektrik santralleri. - Nehir akışı hidroelektrik sistemleri.	- Su debisi verileri. - Baraj yüksekliği.	- Üretilen enerji miktarı. - Çevresel etki raporu.
Hidrojen üretimi	Elektrolizör verimliliği, maliyet.	- Yeşil hidrojen üretimi. - Yakıt hücresi sistemleri.	- Su ve enerji girdi verileri. - Elektrolizör verimliliği.	- Üretilen hidrojen miktarı. - Enerji kaybı.
Hidrojen yakıtlı araçlar	Yakıt hücresi verimliliği, maliyet.	- Hidrojenle çalışan otomobiller. - Hidrojenle çalışan otobüs ve kamyonlar.	- Yakıt hücresi verimliliği. - Depolama şartları.	- Araç menzili. - Enerji tüketimi.
Jeotermal enerji	Sıcaklık, sondaj derinliği.	- Jeotermal enerji santralleri. - Jeotermal ısıtma sistemleri.	- Sıcaklık verileri. - Sondaj derinliği.	- Üretilen enerji miktarı. - Isı verimliliği.
Nükleer enerji	Güvenlik, enerji kapasitesi.	- Nükleer santraller. - Nükleer tıp uygulamaları.	- Yakıt türü. - Reaktör tasarımı.	- Elektrik üretim kapasitesi. - Emisyon değerleri.
Piller	Kapasite, döngü ömrü.	- Taşınabilir elektronik cihazlar. - Yenilenebilir enerji sistemlerinde depolama.	- Batarya durumu. - Şarj/deşarj döngüleri.	- Batarya ömrü. - Enerji çıkışı.
Rüzgar enerjisi	Türbin verimliliği, yer seçimi.	- Rüzgar çiftlikleri. - Küçük ölçekli rüzgar türbinleri.	- Rüzgar hızı ve yönü. - Türbin özellikleri.	- Üretilen enerji miktarı. - Verimlilik oranı.
Termal depolama	Isı kaybı, verimlilik.	- Güneş enerjisi ile ısı depolama sistemleri. - Endüstriyel süreçlerde ısı depolama.	- Depolama tankı sıcaklığı. - Isı akış verileri.	- Depolanan ısı miktarı. - Isı kaybı oranı.
Termik santraller	Yakıt verimliliği, emisyonlar.	- Kömür, doğalgaz veya biyokütle ile çalışan termik santraller.	- Yakıt türü. - İşletme koşulları.	- Üretilen enerji miktarı. - Emisyon düzeyleri.

Enerji sistemlerinde metasezgisel optimizasyon algoritmalarının kullanımı ile ilgili Web of Science dizininde 2532 adet çalışma incelenmiş ve en sık karşılaşılan metasezgisel optimizasyon algoritmaları listelenmiş ve Şekil 3'te dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 3. Enerji alanında kullanılan metasezgisel algoritmalar

İncelenen 2532 makale dikkate alındığında (Şekil 3) en çok %37.4'ünde genetik algoritma (%37.4) ile parçacık sürü optimizasyonunun (%25.5) kullanıldığı görülmüştür. Bu iki algoritmayı %10.8 ile karınca kolonisi optimizasyonu, %10.1 ile simüle edilmiş tavlama algoritması izlemektedir. Kalan diğer algoritmalar arasında ise en çok tabu arama (%3.5), diferansiyel evrim (%1.9) ve evrimsel algoritmalar (%1.3) öne çıkmaktadır.

Tablo 5'te enerji sektöründe en sık kullanılan metasezgisel optimizasyon algoritmaları verilmiştir. Bu tabloda yer alan bilgilere göre enerji üretim planlaması, enerji tesislerinin bakım ve işletme optimizasyonu, ve enerji portföyü yönetimi gibi konularda genetik algoritma (GA); dağıtık enerji kaynaklarının koordinasyonu, enerji verimliliği artırma ve enerji tüketimini minimize etme amaçlarıyla karınca kolonisi optimizasyonu (KKO); enerji dağıtım ağı optimizasyonu, rüzgar enerjisi türbinlerinin kontrolü ve enerji depolama sistemlerinin yerleşimi gibi uygulamalarda parçacık sürü optimizasyonu (PSO); enerji üretim tesislerinin yerleşimi, enerji kaynaklarının tahsisi ve akıllı şebeke planlaması gibi alanlarda simüle edilmiş tavlama algoritması (TA); elektrik enerjisi üretimi, enerji portföy optimizasyonu ve enerji tesislerinin sürdürülebilir bakımı gibi enerji alanlarında da yapay arı kolonisi algoritması (YAK) tercih edildiği görülmüştür.

Tablo 5. Enerji sektöründe kullanılan metasezgisel optimizasyon algoritmaları

Enerji Sistemleri Problemleri	Sık Kullanılan Metasezgisel Algoritmalar
Bakım programlama	GA, PSO, ST, TA
Dağıtım sistemi planlaması	GA, PSO, TA
Dağıtım sistemi yeniden yapılandırma	GA, PSO, ST, KKO
Ekonomik dağıtım	GA, PSO, EA, DE
İletim ağı genişleme planlaması	GA, PSO, ST, TA
Optimal güç akışı	GA, PSO, EA, DE
Ünite atama	GA, PSO, EA
Yük ve üretim tahmini	GA, PSO, EA, ST

4. SONUÇLAR

Metasezgisel optimizasyon algoritmaları, karmaşık enerji sistemleri problemlerini çözmede önemli bir rol oynamaktadır. Kısaca metasezgisel optimizasyon algoritmaları;

- Güneş enerjisi sistemlerinde panellerin ideal konumlarının ve açılarının belirlenmesinde,
- Rüzgar enerjisi sistemlerinde türbin kanat profillerinde, türbin sayısının belirlenmesinde ve yerleşiminde,
- Hidroelektrik santrallerde su rezervuarlarının seviyelerinin optimize edilmesinde,
- Jeotermal enerji sistemlerinde kuyu konumlarının ve derinliklerinin belirlenmesinde,
- Dalga enerjisinde deniz akıntısı türbinlerinin konumlandırılmasında,
- Biyokütle enerjisinde kaynakların toplanması, depolanması süreçlerinin kontrolünde, biyoyakıt bitkilerinin türleri, ekim zamanlamaları ve bakım süreçlerinde,
- Nükleer reaktörlerin işletimi, nükleer yakıt döngüsü, nükleer atık üretiminin kontrolünde,
- Fosil enerji kaynaklarının emisyonlarının minimize edilmesi ve enerji verimliliğinin artırılmasında,
- Enerjinin günlük veya saatlik üretim planlarının optimize edilmesinde, enerji taleplerinin tahmin edilmesi, ağı kapasitesinin optimize edilmesi ve enerji iletimini yönlendirme,
- Enerji depolama sistemlerinin yönetilmesinde,
- Elektrikli araçların batarya sistemlerinin optimal yerleşiminin ve kapasitesinin belirlenmesinde,
- Enerji portföylerinin düzenlenmesi, enerji üretim kaynaklarının dağılımını, karbon ayak izini minimize etmede kullanılabilmektedir.

Bu çalışma, enerjinin verimli kullanılması ve sürdürülebilirliğin sağlanması amacıyla metasezgisel optimizasyon tekniklerinin kullanımına ilişkin kapsamlı bir araştırma sağlamıştır. Bu çalışmanın önemli amacı, çok sayıda metasezgisel optimizasyon yönteminin enerji sistemleri problemlerine uygulanmasını incelemektir. Metasezgisel optimizasyon algoritmaları, matematiksel olarak temellendirilmiş karmaşık optimizasyon problemlerini çözmeye yönelik yöntemleri temsil ederler.

Bu makale;

- Enerji sistemlerinde optimizasyon konusunda çalışan araştırmacılara, hangi metasezgisel algoritmaların hangi problemlere uygun olduğunu göstererek bir rehber sunar,

- Literatürdeki eksikleri ve gelecekte üzerinde çalışılabilecek yeni alanları belirleyerek araştırma yönünü şekillendirir,
- Enerji sistemlerinin daha verimli, güvenilir ve maliyet etkin bir şekilde çalışmasını sağlamak için en iyi algoritmaların belirlenmesine yardımcı olur,
- Enerji sistemlerinde optimizasyon süreçlerini daha etkili kılmak için metasezgisel algoritmaların değerini ortaya koyarak hem akademik hem de endüstriyel uygulamalar için önemli bir kaynak teşkil eder.

Sonuç olarak, mevcut enerji sistemlerinin performansının üstesinden gelmek için metasezgisel optimizasyon algoritmalarının kullanılması, bu zorlukları başarılı bir şekilde yönetme konusundaki yetenekleri sayesinde akademik araştırmacılar ve endüstri uygulamaları için cazip bir konudur. Son yıllarda yapay zekaya olan ilginin artmasıyla birlikte, metasezgisel algoritmalar giderek daha da geliştirilmektedir. Bu algoritmalar, mevcut problemler için gelişmiş performans sağlayabilirler.

Çıkar Çatışması Beyanı

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Yazar Katkısı Beyanı

Yazar, çalışma konsepti ve tasarım, veri toplama, verilerin analizi ve yorumlanması ve taslağın oluşturulması aşamalarında görev almıştır.

KAYNAKLAR

- Abbass, H.A. (2001). "MBO: Marriage in honey bees optimisation: A haplometrosis polygynous swarming approach", *In Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation—CEC*, 27–30 May, (pp. 207–214). Seoul, Korea.
- Abdechiri, M., Meybodi, M.R., & Bahrami, H. (2013). "Gases brownian motion optimization: An algorithm for optimization (GBMO)." *Applied Software Computational*, 13, 2932–2946.
- Abdollahzadeh, B., Gharehchopogh, F.S., Khodadadi, N., & Mirjalili, S. (2022). "Mountain gazelle optimizer: A new nature-inspired metaheuristic algorithm for global optimization problems." *Advances in Engineering Software*, 174, 103282.
- Abualigah, L., Hanandeh, E.S., Zitar, R.A., Thanh, C.L., Khatir S., & Gandomi, A.H. (2023). "Revolutionizing sustainable supply chain management: A review of metaheuristics." *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 126(A), 106839.
- Abualigah, L., Yousri, D., Abd Elaziz, M., Ewees, A.A., Al-Qaness, M.A.A., & Gandomi, A.H. (2021). "Aquila optimizer: a novel meta-heuristic optimization algorithm." *Computational Industry Engineering*, 157, 107250.
- Aghabegloo, M., Rezaie, K., Torabi, S.A., & Yazdani, M. (2023). "A metaheuristic-driven physical asset risk management framework for manufacturing system considering continuity measures." *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 126(A), 106789.
- Ahrari, A., & Atai, A.A. (2010). "Grenade explosion method: A novel tool for optimization of multimodal functions." *Applications Software Computational*, 10, 1132–1140.
- Ala, A., Mahmoudi, A., Mirjalili, S., Simic, V., & Pamucar, D. (2023). "Evaluating the performance of various algorithms for wind energy optimization: A hybrid decision-making model." *Expert Systems with Applications*, 221, 119731.
- Alsattar, H.A., Zaidan, A.A., & Zaidan, B.B. (2020). "Novel meta-heuristic bald eagle search optimisation algorithm." *Artificial Intelligent Revolution*, 53, 2237–2264.
- Altay, O. (2022a). "Güncel metasezgisel yöntemlerin standart kalite testi fonksiyonlarında karşılaştırılması." *International Journal Pure Applied Science*, 8(2), 286-301.
- Altay, O. (2022b). "Chaotic slime mould optimization algorithm for global optimization." *Artificial Intelligence Review*, 55, 3979-4040.
- Altay, O. & Varol Altay, E. (2022). "Investigation of slime mould algorithm and hybrid slime mould algorithms performance in global optimization problems." *Dicle University Journal of Engineering*, 13(4), 661-671.
- Altay, O. & Varol Altay, E. (2023). "A novel chaotic transient search optimization algorithm for global optimization, real-world engineering problems and feature selection." *PeerJ Computational Science*, 9, 1526.
- Ashrafi, S.M., & Dariane, A.B. (2013). "Performance evaluation of an improved harmony search algorithm for numerical optimization: Melody search (MS)." *Engineering Applied Artificial Intelligent*, 26, 1301–1321.
- Askarzadeh, A. (2016). "A novel metaheuristic method for solving constrained engineering optimization problems: Crow search algorithm." *Computers & Structures*, 169, 1–12.

- Atashpaz-Gargari, E., & Lucas, C. (2007). "Imperialist competitive algorithm: An algorithm for optimization inspired by imperialistic competition." *In Proceedings of the 2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, 25–28 September, (pp. 4661–4667). Singapore.
- Azizi, M., Aickelin, U., Khorshidi, H.A., & Shishehgharkhaneh, M.B. (2023). "Energy valley optimizer: A novel metaheuristic algorithm for global and engineering optimization." *Scientific Reports*, 13, 226.
- Baykasoglu, A., & Senol, M.E. (2016). "Combinatorial optimization via weighted superposition attraction." *In Proceedings of the International Conference on Operations Research of the German Operation Society (GOR 2016)*, 30 August–12 September, Hamburg, Germany.
- Bayraktar, Z., Komurcu, M., & Werner, U.H. (2010). "Wind driven optimization (WDO): A novel nature-inspired optimization algorithm and its application to electromagnetics." *In Proceedings of the 2010 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 11–17 July, (pp. 1–4). Toronto, ON, Canada.
- Bhattacharya, A., & Chattopadhyay, P. (2011). "Application of biogeography-based optimisation to solve different optimal power flow problems." *IET Generation Transmission Distribute*, 5, 70–80.
- Binetti, G., Davoudi, A., Naso, D., Turchiano, B., & Lewis, F.L. (2013). "A distributed auction-based algorithm for the nonconvex economic dispatch problem." *IEEE Transfer Industry Information*, 10, 1124–1132.
- Braik, M., Sheta, A., & Al-Hiary, H. (2021). "A novel meta-heuristic search algorithm for solving optimization problems: Capuchin search algorithm." *Neural Computational Applied*, 33, 2515–2547.
- Boettcher, S., & Percus, A.G. (2001). "Optimization with extremal dynamics." *Physics Revolution Letter*, 86, 5211–5214.
- Chen, H., Wang, M., & Zhao, X. (2020). "A multi-strategy enhanced sine cosine algorithm for global optimization and constrained practical engineering problems." *Applied Mathematical Computational*, 369, 124872.
- Cheng, M.Y., & Prayogo, D. (2014). "Symbiotic organisms search: A new metaheuristic optimization algorithm." *Computers & Structures*, 139, 98–112.
- Cheraghi, R., & Jahangir, R.H. (2023). "Multi-objective optimization of a hybrid renewable energy system supplying a residential building using NSGA-II and MOPSO algorithms." *Energy Conversion and Management*, 294, 117515.
- Chicco, G., & Mazza, A. (2019). "Heuristic optimization of electrical energy systems: Refined metrics to compare the solutions." *Sustainable Energy Grids Network*, 17, 100197.
- Chou, J.S., & Truong, D.N. (2021). "A novel metaheuristic optimizer inspired by behavior of jellyfish in ocean." *Applied Mathematical Computational*, 389, 125535.
- Chou, J.S., Nguyen, N.M., & Chang, C.P. (2022). "Intelligent candlestick forecast system for financial time-series analysis using metaheuristics-optimized multi-output machine learning." *Applied Soft Computing*, 130, 109642.
- Chu, S.C., Tsai, P.W., & Pan, J.S. (2006). "Cat swarm optimization." *In Trends in Artificial Intelligence (PRICAI 2006)*, Q. Yang, & G. Webb, (Eds.), Springer, (pp. 854–858).
- Civicioglu, P. (2012). "Transforming geocentric cartesian coordinates to geodetic coordinates by using differential search algorithm." *Computational Geoscience*, 46, 229–247.
- Civicioglu, P. (2013a). "Backtracking search optimization algorithm for numerical optimization problems." *Applied Mathematical Computational*, 219, 8121–8144.
- Civicioglu, P. (2013b). "Artificial cooperative search algorithm for numerical optimization problems." *Informatics Science*, 229, 58–76.
- Cuevas, E., Oliva, D., Zaldivar, D., Perez, M.A., Sossa-Azuela, H., & Zaldivar, D. (2012). "Circle detection using electro-magnetism optimization." *Informatics Science*, 182, 40–55.
- Dai, C., Chen, W., & Zhu, Y. (2006). "Seeker Optimization Algorithm." *In Computational Intelligence and Security (CIS 2006)*, Y. Wang, Y. Cheung & H. Liu (Eds.), Springer, (pp. 225–229).
- Damgacı, E., Boran, K. & Boran, F.E. (2017). "Sezgisel bulanık TOPSIS yöntemi kullanarak Türkiye'nin yenilenebilir enerji kaynaklarının değerlendirilmesi." *Politeknik Dergisi*, 20(3), 629-637.
- De Castro, L., Von Zuben, C.J., & De Castro, L.N. (2002). "Learning and optimization using the clonal selection principle." *IEEE Transmission Evolution Computer*, 6, 239–251.
- Değer, K., Özkaya, M.G., & Boran, F.E. (2023). "Modelling and analysis of future energy scenarios on the sustainability axis." *Journal of Polytechnic*, 26(2), 665-678.
- Demir, F.B., Tuncer, T., & Kocamaz, A.F. (2020). "A chaotic optimization method based on logistic-sine map for numerical function optimization." *Neural Computing and Applications*, 32(17), 14227–14239.

- Detwal, P.K., Agrawal, R., Samadhiya, A., & Kumar, A. (2023). "Metaheuristics in circular supply chain intelligent systems: A review of applications journey and forging a path to the future." *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 126(D), 107102.
- Dhiman, G., & Kumar, D. (2019). "Seagull optimization algorithm: Theory and its applications for large-scale industrial engineering problems." *Knowledge-Based System*, 165, 169–196.
- Dhiman, G., Garg, M., Nagar, M., Kumar, V., & Dehghani, M. (2021). "A novel algorithm for global optimization: Rat swarm optimizer." *Journal of Ambient Intelligence Humanization Computational*, 12, 8457–8482.
- Doering, J., Kizys, R., Juan, A.A., Fito, A., & Polat, O. (2019). "Metaheuristics for rich portfolio optimisation and risk management: Current state and future trends." *Operations Research Perspectives*, 6, 100121.
- Dogan, B., & Olmez, T. (2015). "A new metaheuristic for numerical function optimization: Vortex search algorithm." *Informatics Science*, 293, 125–145.
- Dokeraglu, T., Deniz, A., & Kiziloz, H.E. (2022). "A comprehensive survey on recent metaheuristics for feature selection." *Neurocomputing*, 494, 269-296.
- Dorigo, M., Maniezzo, V., & Colorni, A. (1991). "Positive feedback as a search strategy. Politecnico di Milano: Dipartimento di Elettronica." *Technical Report*, 91, 16.
- Duan, H., & Qiao, P. "Pigeon-inspired optimization: A new swarm intelligence optimizer for air robot path planning." *International Journal of Intelligence Computer Cybernetics*, 7, 24–37.
- El-Abd, M. (2013). "An improved global-best harmony search algorithm." *Applied Mathematical Computational*, 222, 94–106.
- Emami, H., & Derakhshan, F. (2015). "Election algorithm: A new socio-politically inspired strategy." *AI Community*, 28, 591–603.
- Erlich, I., Venayagamoorthy, G.K., & Worawat, N. (2010) "A mean-variance optimization algorithm." *In Proceedings of the 2010 IEEE World Congress on Computational Intelligence*, 18–23 July, Barcelona, Spain.
- Eskandar, H., Sadollah, A., Bahreininejad, A. & Hamdi, M. (2012). "Water cycle algorithm: A novel metaheuristic optimization method for solving constrained engineering optimization problems." *Computers & Structures*, 110, 151–166.
- Eusuff, M.M., & Lansey, K.E. (2003). "Optimization of water distribution network design using the shuffled frog leaping algorithm." *Journal of Water Resource Planning Management*, 129, 210–225.
- Eusuff, M., Lansey, K.E., & Pasha, F. (2006). "Shuffled frog-leaping algorithm: A memetic meta-heuristic for discrete optimization." *Engineering Optimization*, 38, 129–154.
- Fanian, F., & Rafsanjani, M.K. (2023). "CFMCRS: Calibration fuzzy-metaheuristic clustering routing scheme simultaneous in on-demand WRSNs for sustainable smart city." *Expert Systems with Applications*, 211, 118619.
- Faramarzi, A., Heidarinejad, M., Stephens, B., & Mirjalili, S. (2020a). "Equilibrium optimizer: A novel optimization algorithm." *Knowledge-Based Systems*, 191, 105190.
- Faramarzi, A., Heidarinejad, M., Mirjalili, S., & Gandomi, A.H. (2020b). "Marine predators algorithm: A nature-inspired metaheuristic." *Expert Systems Applied*, 152, 113377.
- Farmer, J., Packard, N.H., & Perelson, A.S. (1986). "The immune system, adaptation, and machine learning." *Physical Differential Nonlinear Phenomena*, 22, 187–204.
- Feng, Z.K., Niu, W.J., & Liu, S. (2021). "Cooperation search algorithm: A novel metaheuristic evolutionary intelligence algorithm for numerical optimization and engineering optimization problems." *Applied Soft Computing*, 98, 106734.
- Feo, T.A., & Resende, M.G. (1989). "A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem." *Operational Research Letter*, 8, 67–71.
- Fogel, D.B. (2009). *Artificial Intelligence through Simulated Evolution*. Wiley, New York, USA.
- Gandomi, A.H., & Alavi, A.H. (2012). "Krill herd: A new bio-inspired optimization algorithm." *Community Nonlinear Science Numerical Simulation*, 17, 4831–4845.
- Ghalizadeh, H., Goh, M., Fazlollahtabar, H., & Mamashli, Z. (2022). "Modelling uncertainty in sustainable-green integrated reverse logistics network using metaheuristics optimization." *Computers & Industrial Engineering*, 163, 107828.
- Ghasemi-Marzbali, A. (2020). "A novel nature-inspired meta-heuristic algorithm for optimization: bear smell search algorithm." *Software Computation*, 24, 13003–13035.
- Glover, F. (1977). "Heuristics for integer programming using surrogate constraints." *Decision Science*, 8, 156–166.
- Glover, F. (1989). "Tabu Search: Part I." *ORSA Journal of Computational*, 1, 190–206.
- Greensmith, J., Aickelin, U., & Cayzer, S. (2000). "Introducing dendritic cells as a novel immune-inspired algorithm for anomaly detection." *In Haptics: Science, Technology, Applications*, 3627, 153–167.

- Guang, Q., Feng, L., Lijuan, L., Lu, J.W.Z., Leung, A.Y.T., Lu, V.P., & Mok, K.M. (2010). "A quick group search optimizer and its application to the optimal design of double layer grid shells." *AIP Publishing*, 1233, 718.
- Hansen, N., Müller, S.D., & Koumoutsakos, P. (2013). "Reducing the time complexity of the derandomized evolution strategy with covariance matrix adaptation (CMA-ES)." *Evolution Computer*, 11, 1–18.
- Hashim, F.A., Houssein, E.H., Mabrouk, M.S., Al-Atabany, W., & Mirjalili, S. (2019). "Henry gas solubility optimization: A novel physics based algorithm." *Futurist General Computational Systems*, 101, 646–667.
- Hashim, F.A., Hussain, K., Houssein, E.H., Mabrouk, M.S., & Al-Atabany, W. (2021). "Archimedes optimization algorithm: A new metaheuristic algorithm for solving optimization problems." *Applied Intelligence*, 51, 1531–1551.
- Hashim, F.A., & Hussien, A.G. (2022). "Snake optimizer: A novel metaheuristic optimization algorithm." *Knowledge-Based Systems*, 242, 108320.
- Hayyolalam, V., & Pourhaji Kazem, A.A. (2020). "Black widow optimization algorithm: a novel meta-heuristic approach for solving engineering optimization problems." *Engineering Applied Artificial Intelligence*, 87, 103249.
- He, S., Wu, Q., & Saunders, J. (2006). "A novel group search optimizer inspired by animal behavioral ecology." *In Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, 16–21 July, Vancouver, BC, Canada.
- Heidari, A.A., Mirjalili, S., Faris, H., Aljarah, I., Mafarja, M., & Chen, H. (2019). "Harris hawks optimization: Algorithm and applications." *Futurist General Computational Systems*, 97, 849–872.
- Higashitani, M., Ishigame, A., & Yasuda, K. (2006). "Particle swarm optimization considering the concept of predator-prey behavior." *In Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, 16–21 July, (pp. 434–437). Vancouver, BC, Canada.
- Holland, J.H. (1992). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, MIT Press, Cambridge, MA, USA.
- Hosseini, H.S. (2007). "Shah Problem solving by intelligent water drops." *In Proceedings of the 2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, 25–28 September, (pp. 3226–3231). Singapore.
- Hosseini, H.S. (2011). "Principal components analysis by the galaxy-based search algorithm: A novel metaheuristic for continuous optimization." *International Journal of Computational Science Engineering*, 6, 132–140.
- Iqbal, M., Azam, M., Naeem, M., Khwaja, A. S. & Anpalagan, A. (2014) " Optimization classification, algorithms and tools for renewable energy: A review" *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 640–654.
- Jain, M., Singh, V., & Rani, A. (2019). "A novel nature-inspired algorithm for optimization: Squirrel search algorithm." *Swarm Evolution Computational*, 44, 148–175.
- Javidy, B., Hatamlou, A., & Mirjalili, S. (2015). "Ions motion algorithm for solving optimization problems." *Applied Software Computational*, 32, 72–79.
- Kaboli, S.H.A., Selvaraj, J., & Rahim, N. (2017). "Rain-fall optimization algorithm: A population based algorithm for solving constrained optimization problems." *Journal of Computer Science*, 19, 31–42.
- Karaboga, D., & Basturk, B.A. (2007). "Powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: Artificial bee colony (ABC) algorithm." *Journal of Global Optimization*, 39, 459–471.
- Karami, H., Sanjari, M.J., & Gharehpetian, G.B. (2014). "Hyper-spherical search (HSS) algorithm: A novel meta-heuristic algorithm to optimize nonlinear functions." *Neural Computational Applied*, 25, 1455–1465.
- Kashan, A.H. (2014). "League championship algorithm (LCA): An algorithm for global optimization inspired by sport championships." *Applied Software Computational*, 16, 171–200.
- Kashan, A.H. (2015). "A new metaheuristic for optimization: Optics inspired optimization (OIO)." *Computational Operation Research*, 55, 99–125.
- Kaveh, A., & Talatahari, S. (2010). "A novel heuristic optimization method: Charged system search." *Acta Mechanical*, 213, 267–289.
- Kaveh, A., & Khayatad, M. (2012). "A new meta-heuristic method: Ray optimization." *Computers & Structures*, 112–113, 283–294.
- Kaveh, A., & Farhoudi, N. (2013). "A new optimization method: Dolphin echolocation." *Advance Engineering Software*, 59, 53–70.
- Kaveh, A., & Mahdavi, V. (2014). "Colliding bodies optimization: A novel meta-heuristic method." *Computers & Structures*, 139, 18–27.
- Kaveh, A., & Dadras, A. (2017). "A novel meta-heuristic optimization algorithm: Thermal exchange optimization." *Advance Engineering Software*, 110, 69–84.

- Khan, A.A., Laghari, A.A., Gadekallu, T.R., Shaikh, Z.A., Javed, A.R., Rashid, M., Estrela, V.V., & Mikhaylov, A. (2022). "A drone-based data management and optimization using metaheuristic algorithms and blockchain smart contracts in a secure fog environment." *Computers and Electrical Engineering*, 102, 108234.
- Khelili, M.A., Slatnia, S., Kazar, O., Merizig, A., & Mirjalili, S. (2023). "Deep learning and metaheuristics application in internet of things: A literature review." *Microprocessors and Microsystems*, 98, 104792.
- Kiran, M.S., & Kiran, M.S. (2015). "TSA: Tree-seed algorithm for continuous optimization." *Experimental System Applications*, 42, 6686–6698.
- Kinost, A., Doerner, K.F., & Rinderle-Ma, S. (2022). "Combining metaheuristics and process mining: Improving cobot placement in a combined cobot assignment and job shop scheduling problem." *Procedia Computer Science*, 200, 1836-1845.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, J.C.D., & Vecchi, M.P. (1986). "Optimization by simulated annealing." *World Scientific Lecture Notes in Physics*, 220, 339–348.
- Klar, M., Glatt M., & Aurich, J.C. (2023). "Performance comparison of reinforcement learning and metaheuristics for factory layout planning." *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 45, 10-25.
- Krishnanand, K., & Ghose, D. (2005). "Detection of multiple source locations using a glowworm metaphor with applications to collective robotics." In *Proceedings of the 2005 IEEE Swarm Intelligence Symposium*, 8–10 June, (pp. 84–91). Pasadena, CA, USA.
- Kulkarni, A.J., Durugkar, I.P., & Kumar, M. (2013). "Cohort Intelligence: A self-supervised learning behavior." In *Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 13–16 October, (pp. 1396–1400). Manchester, UK.
- Kumar, A., Misra, R.K., & Singh, D. (2017). "Improving the local search capability of effective butterfly optimizer using covariance matrix adapted retreat phase." In: *Proceedings of the 2017 IEEE Congress Evolution Computer*, 1835–1842.
- Kumar, N., Singh, N., & Vidyarthi, D.P. (2021). "Artificial lizard search optimization (ALSO): A novel nature-inspired metaheuristic algorithm." *Software Computational*, 25, 6179–6201.
- Kutlu Onay, F., & Aydemir, S.B. (2022). "Chaotic hunger games search optimization algorithm for global optimization and engineering problems." *Mathematics and Computers in Simulation*, 192(10), 514–536.
- Lam, A.Y.S., & Li, V.O.K. (2010). "Chemical-reaction-inspired metaheuristic for optimization." *IEEE Transmission Evolution Computer*, 14, 381–399.
- Lee, K.Y., & Vale, Z.A. (2020). *Applications of Modern Heuristic Optimization Methods in Power and Energy Systems*. Wiley: Hoboken, NJ, USA.
- Lessmann, S., Caserta, M., & Arango, I.M. (2011). "Tuning metaheuristics: A data mining based approach for particle swarm optimization." *Expert Systems with Applications*, 38(10), 12826-12838.
- Li, M.D., Zhao, H., Weng, X.W., & Han, T. (2016). "A novel nature-inspired algorithm for optimization: Virus colony search." *Advance Engineering Software*, 92, 65–88.
- Li, T., Wang, C.F., Wang, W.B., & Su, W.L. (2005). "A global optimization bionics algorithm for solving integer programming-plant growth simulation algorithm." *Systems Engineering-Theory Practical*, 25, 76–85.
- Li, X.D., Wang, J.S., Hao, W.K., Zhang, M., & Wang, M. (2022). "Chaotic arithmetic optimization algorithm." *Applied Intelligence*, 52(14), 16718–16757.
- Liang, Y.C., & Juarez, J.R.C. (2016). "A novel metaheuristic for continuous optimization problems: Virus optimization algorithm." *Engineering Optimization*, 48(1), 73–93.
- Luo, J., Chen, H., Zhang, Q., Xu, Y., Huang, H., & Zhao, X. (2018). "An improved grasshopper optimization algorithm with application to financial stress prediction." *Applied Mathematical Modelling*, 64, 654–668.
- MATLAB. (2018). *R2019b*. The MathWorks Inc., Natick, Massachusetts, USA.
- Mehrabian, A., & Lucas, C. (2006). "A novel numerical optimization algorithm inspired from weed colonization." *Ecological Information*, 1, 355–366.
- Mendi, F., Başkal, T., Boran, K., & Boran, F.E. (2010). "Optimization of module, shaft diameter and rolling bearing for spur gear through algorithm." *Energy Systems with Applications*, 37, 8058-8064.
- Meng, A.B., Chen, Y.C., Yin, H., & Chen, S.Z. (2014). "Crisscross optimization algorithm and its application." *Knowledge-Based Systems*, 67, 218–229.
- Mihaly, N.B., Luca, A.V., Simon Varhelyi, M., & Cristea, V.M. (2023). "Improvement of air flowrate distribution in the nitrification reactor of the waste water treatment plant by effluent quality, energy and greenhouse gas emissions optimization via artificial neural networks models." *Journal of Water Process Engineering*, 54, 103935.

- Mirjalili, S. (2013). "Dragonfly algorithm: A new meta-heuristic optimization technique for solving single-objective, discrete, and multi-objective problems." *Neural Computational Applied*, 27, 1053–1073.
- Mirjalili, S., Mirjalili, S.M., & Lewis, A. (2014). "Grey wolf optimizer." *International Journal of Advance Engineering Software*, 69, 46–61.
- Mirjalili, S. (2015a). "Moth-flame optimization algorithm: A novel nature-inspired heuristic paradigm." *Knowledge-Based Systems*, 89, 228–249.
- Mirjalili, S. (2015b). "The ant lion optimizer." *Advance Engineering Software*, 83, 80–98.
- Mirjalili, S. (2016). "SCA: A sine cosine algorithm for solving optimization problems." *Knowledge-Based Systems*, 96, 120–133.
- Mirjalili, S., & Lewis, A. (2016). "The whale optimization algorithm." *Advance Engineering Software*, 95, 51–67.
- Mirjalili, S., Gandomi, A.H., Mirjalili, S.Z., Saremi, S., Faris, H., & Mirjalili, S.M. (2017). "Salp swarm algorithm: A bio-inspired optimizer for engineering design problems." *Advance Engineering Software*, 114, 163–191.
- Mladenovi 'C, N., & Hansen, P. (1997). "Variable neighborhood search." *Computational Operational Research*, 24, 1097–1100.
- Moein, S., & Logeswaran, R. (2014). "KGM0: A swarm optimization algorithm based on the kinetic energy of gas molecules." *Informatics Science*, 275, 127–144.
- Moghdani, R., & Salimifard, K. (2018). "Volleyball premier league algorithm." *Applied Software Computational*, 64, 161–185.
- Mohamed, A.W., Hadi, A.A., & Mohamed, A.K. (2020). "Gaining-sharing knowledge based algorithm for solving optimization problems: A novel nature-inspired algorithm." *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 11, 1501–1529.
- Mohammed, H.M., & Rashid, T.A. (2021). "Chaotic fitness-dependent optimizer for planning and engineering design." *Software Computing*, 25(22), 14281–14295.
- Monismith, D.R., & Mayfield, B.E. (2008). "Slime mould as a model for numerical optimization." *In Proceedings of the IEEE Swarm Intelligence Symposium*, 21–23 September, St. Louis, MO, USA.
- Moosavian, N., & Roodsari, B.K. (2014). "Soccer league competition algorithm: A novel meta-heuristic algorithm for optimal design of water distribution networks." *Swarm Evolution Computational*, 17, 14–24.
- Moscato, P. (1989). "On evolution, search, optimization, genetic algorithms and martial arts: towards memetic algorithms." *In Caltech Concurrent Computation Program (Report 826)*, California Institute of Technology, pp. 158–179, Pasadena, CA, USA.
- Muthiah-Nakarajan, V., & Noel, M.M. (2016). "Galactic swarm optimization: A new global optimization metaheuristic inspired by galactic motion." *Applied Software Computational*, 38, 771–787.
- Mühlenbein, H., & Pass, G. (1996). "From recombination of genes to the estimation of distributions I. Binary parameters." *In Computer Vision*, 1141, 178–187.
- Narayanan, A., & Moore, M. (1996). "Quantum-inspired genetic algorithms." *In Proceedings of the IEEE International Conference on Evolutionary Computation ICEC-96*, 20–22 May, (pp. 61–66). Nagoya, Japan.
- Naruei, I., & Keynia, F. (2021). "A new optimization method based on coot bird natural life model." *Expert Systems with Applications*, 115352.
- Nassef, A.M., Abdelkareem, M.A., Maghrabie, H.M., & Baroutaji, A. (2023). "Review of metaheuristic optimization algorithms for power systems problems." *Sustainability*, 15, 9434.
- Pan, W.T. (2012) "A new fruit fly optimization algorithm: Taking the financial distress model as an example." *Knowledge-Based Systems*, 26, 69–74.
- Passino, K. (2002). "Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control." *IEEE Controlling Systems*, 22, 52–67.
- Pelikan, M., Goldberg, M.E., & Cant-Paz, E. (1999). "BOA: The Bayesian optimization algorithm." *In Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference—GECCO-99*, I, 13–17 July, (pp. 525–532). Orlando, FL, USA.
- Pelusi, D., Mascella, R., Tallini, L., Nayak, J., Naik, B., & Deng, Y. (2020a). "An improved moth- flame optimization algorithm with hybrid search phase." *Knowledge-Based Systems*, 191, 105277.
- Pelusi, D., Mascella, R., Tallini, L., Nayak, J., Naik, B., & Deng, Y. (2020b). "Improving exploration and exploitation via a hyperbolic gravitational search algorithm." *Knowledge-Based Systems*, 193, 105404.
- Pereira, J.L.J. (2021). "Lichtenberg algorithm: A novel hybrid physics-based meta-heuristic for global optimization." *Expert Systems Applied*, 170, 114522.
- Pierezan, J., & Coelho, L.D.S., (2018). "Coyote optimization algorithm: A new metaheuristic for global optimization problems." *In Proceedings of the 2018 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, (pp. 1–8). 8–13 July, Rio de Janeiro, Brasil.

- Poli, R., Kennedy, J., & Blackwell, T. (2007). "Particle swarm optimization." *Swarm Intelligent*, 1, 33–57.
- Punnathanam, V., & Kotecha, P. (2016). "Yin-yang-pair optimization: A novel light weight optimization algorithm." *Engineering Applied Artificial Intelligence*, 54, 62–79.
- PYTHON. (1995). Centrum voor Wiskunde en Informatica Amsterdam, The Netherlands.
- Qais, M.H., Hasanien, H.M., & Alghuwainem, S. (2020). "Transient search optimization: A new meta-heuristic optimization algorithm." *Applied Intelligence*, 50(11), 3926–3941.
- Qu, G., Cheng, H., Yao, L., Ma, Z., & Zhu, Z. (2010). "Transmission surplus capacity based power transmission expansion planning." *Electrical Power Systems Research*, 80, 19–27.
- Rabanal, P., Rodríguez, L., & Rubio, F. (2007). "Using river formation dynamics to design heuristic algorithms in swarm." *Evolutionary, and Memetic Computational*, 4618, 163–177.
- Radosavljević, J. (2018). *Metaheuristic Optimization in Power Engineering*. The Institution of Engineering and Technology, British Library Cataloguing in Publication Data, Herts, United Kingdom.
- Rahmani, R., & Yusof, R. (2014). "A new simple, fast and efficient algorithm for global optimization over continuous search-space problems." *Applied Mathematical Computational*, 248, 287–300.
- Rahul, K., & Banyal, R.K. (2022). "Metaheuristics approach to improve data analysis process for the healthcare sector." *Procedia Computer Science*, 215, 98-103.
- Rahkar Farshi, T. (2021). "Battle royale optimization algorithm." *Neural Computational Applied*, 33, 1139–1157.
- Rakhshani, H., & Rahati, A. (2017). "Snap-drift cuckoo search: A novel cuckoo search optimization algorithm." *Applied Software Computational*, 52, 771–794.
- Rao, R.V., Savsani, V.J., & Vakharia, D. (2011). "Teaching-learning-based optimization: A novel method for constrained mechanical design optimization problems." *Computational Deserve*, 43, 303–315.
- Rao, R.V. (2016). "Jaya: A simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization problems." *International Journal of Industry Engineering Computational*, 7, 19–34.
- Rashedi, E., Nezamabadi-Pour, H., & Saryazdi, S. (2009). "GSA: A gravitational search algorithm." *Informatics Science*, 179, 2232–2248.
- Ray, T., & Liew, K. (2003). "Society and civilization: An optimization algorithm based on the simulation of social behavior." *IEEE Transfer Evolution Computational*, 7, 386–396.
- Rechenberg, I. (1971). *Evolutionsstrategie-optimierung technischer systeme nach prinzipien der biologischen evolution (in German)*. [Ph.D. Thesis, Technical University of Berlin].
- Reynolds, R.G. (1994). "An introduction to cultural algorithms." In *Proceedings of the Third Annual Conference on Evolutionary Programming*, 24–26 February, (pp. 131–139). San Diego, CA, USA.
- Sadollah, A., Bahreininejad, A., Eskandar, H., & Hamdi, M. (2013). "Mine blast algorithm: A new population based algorithm for solving constrained engineering optimization problems." *Applied Software Computational*, 13, 2592–2612.
- Sakthivel, S., Pandiyan, S.A., Marikani, S., & Selvi, S.K. (2013). "Application of big-bang big-crunch algorithm for optimal power flow problems." *International Journal of Engineering Science*, 2, 41–47.
- Salcedo-Sanz, S., Del Ser, J., Landa-Torres, I., Gil-López, S., & Portilla-Figueras, J.A. (2014). "The coral reefs optimization algorithm: A novel metaheuristic for efficiently solving optimization problems." *Science World Journal*, 1–15.
- Salgotra, R., Singh, U., Singh, G., Mittal, N., & Gandomi, A.H. (2021). "A self-adaptive hybridized differential evolution naked mole-rat algorithm for engineering optimization problems." *Computational Methods Applied Mechanical Engineering*, 383, 113916.
- Salimi, H. (2015). "Stochastic fractal search: A powerful metaheuristic algorithm." *Knowledge-Based Systems*, 75, 1–18.
- Saremi, S., Mirjalili, S., & Lewis, A. (2017). "Grasshopper optimisation algorithm: Theory and application." *Advance Engineering Software*, 105, 30–47.
- Satapathy, S.C., & Naik, A. (2016). "Social group optimization (SGO): A new population evolutionary optimization technique." *Complex Intelligence Systems*, 2, 173–203.
- Savsani, P., & Savsani, V. (2016). "Passing vehicle search (PVS): A novel metaheuristic algorithm." *Applied Mathematical Modelling*, 40, 3951–3978.
- Sayed, G.I., Darwish, A., & Hassanien, A.E. (2018). "A new chaotic multi-verse optimization algorithm for solving engineering optimization problems." *Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*, 30(2), 293–317.
- Shayanfar, H., & Gharehchopogh, F.S. (2018). "Farmland fertility: A new metaheuristic algorithm for solving continuous optimization problems." *Applied Software Computational*, 71, 728–746.

- Shirke, C., Sabar, N., Chung, E., & Bhaskar, A. (2021). "Metaheuristic approach for designing robust traffic signal timings to effectively serve varying traffic demand." *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 26(3), 343-355.
- Storn, R. & Price, K. (1997). "Differential evolution: A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces." *Journal of Global Optimization*, 11, 341-359.
- Sulaiman, M.H., & Mustafa, Z. (2023). "Using the evolutionary mating algorithm for optimizing the user comfort and energy consumption in smart building." *Journal of Building Engineering*, 76, 107139.
- Sulaiman, M.H., Mustafa, Z., Saari, M.M., Daniyal, H., & Mirjalili, S. (2023). "Evolutionary mating algorithm." *Neural Computational Applied*, 35(1), 487-516.
- Tan, Y., & Zhu, Y. (2010). "Fireworks algorithm for optimization." *In Computer Vision*, 6145, 355-364.
- Tang, R., Fong, S., Yang, X.S., & Deb, S. (2012). "Wolf search algorithm with ephemeral memory." *In Proceedings of the Seventh International Conference on Digital Information Management (ICDIM 2012)*, 22-24 August, (pp. 165-172). Macau, China.
- Tarkhaneh, O., Alipour, N., Chapnevis, A., & Shen, H. (2021). "Golden tortoise beetle optimizer: A novel nature-inspired meta-heuristic algorithm for engineering problems." *Arxiv*. <https://arxiv.org/pdf/2104.01521.pdf>
- Topal, A.O., & Altun, O. (2016). "A novel meta-heuristic algorithm: dynamic virtual bats algorithm." *Informatics Science*, 354, 222-235.
- Uymaz, S.A., Tezel, G., & Yel, E. (2015). "Artificial algae algorithm (AAA) for nonlinear global optimization." *Applied Software Computational*, 31, 153-171.
- Varol Altay, E., & Alatas, B. (2020). "Bird swarm algorithms with chaotic mapping." *Artificial Intelligence Review*, 53(2), 1373-1414.
- Varol Altay, E. & Alatas, B. (2021). "Differential evolution and sine cosine algorithm based novel hybrid multiobjective approaches for numerical association rule mining." *Information Sciences*, 554, 198-221.
- Varol Altay, E. & Altay, O. (2021). "Güncel metasezgisel optimizasyon algoritmalarının CEC2020 test fonksiyonları ile karşılaştırılması." *Dicle University Journal of Engineering*, 12(5), 729-741.
- Varol Altay, E., Gurgenc, E., Altay, O., & Dikici, A. (2022). "Hybrid artificial neural network based on a metaheuristic optimization algorithm for the prediction of reservoir temperature using hydrogeochemical data of different geothermal areas in Anatolia (Turkey)." *Geothermics*, 104, 102476.
- Varol Altay, E. & Altay, O. (2023a). "Assessment of grey wolf optimizer and its variants on benchmark functions", *International Conference on Computing, Intelligence and Data Analytics (ICCIDA) 2022: Computational Intelligence, Data Analytics and Applications*. (pp. 55-66), Springer.
- Varol Altay, E. & Altay, O. (2023b) "A novel hybrid multilayer perceptron neural network with improved grey wolf optimizer." *Neural Computing and Applications*, 35, 529-556.
- Wang, G.G., Deb, S., & Coelho, L.D.S. (2015a). "Elephant herding optimization." *In Proceedings of the 3rd International Symposium on Computational and Business Intelligence*, 7-9 December, (pp. 1-5). Bali, Indonesia.
- Wang, G.G., Deb, S., & Cui, Z. (2015b). "Monarch butterfly optimization." *Neural Computational Applied*, 31, 1995-2014.
- Wang, Q.Y., Lv, X.L., & Zeman, A. (2023). "Optimization of a multi-energy microgrid in the presence of energy storage and conversion devices by using an improved gray wolf algorithm." *Applied Thermal Engineering*, 234, 121141.
- Wang, Z., Chen, L., Wang, B., Huang, L., Wang, K., & Ma, R. (2023). "Integrated optimization of speed schedule and energy management for a hybrid electric cruise ship considering environmental factors." *Energy*, 282, 128795.
- Witten, T.A., & Sander, L.M. (1981) "Diffusion-limited aggregation: A kinetic critical phenomenon." *Physical Revolution Letter*, 47, 1400-1403.
- Xian, S., Zhang, J., Xiao, Y., & Pang, J. (2017). "A novel fuzzy time series forecasting method based on the improved artificial fish swarm optimization algorithm." *Software Computational*, 22, 3907-3917.
- Yampolskiy, R.V., Ashby, L., & Hassan, L. (2012). "Wisdom of artificial crowds: A metaheuristic algorithm for optimization." *Journal of Intelligence Learning Systems Applications*, 4(2), 10.
- Yang, L., Gao, S., Yang, H., Cai, Z., Lei, Z., & Todo, Y. (2021). "Adaptive chaotic spherical evolution algorithm." *Memetic Computing*, 13(3), 383-411.
- Yang, X.S., & Deb, S. (2009). "Cuckoo search via lévy flights." *In Proceedings of the 2009 World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBIC)*, 9-11 December, (pp. 210-214). Coimbatore, India.
- Yang, X.S., & Deb, S. (2010). "Eagle strategy using lévy walk and firefly algorithms for stochastic optimization." *In Studies in Computational Intelligence*, 284, 101-111.

- Yang, X.S. (2010a). "Firefly algorithm, stochastic test functions and design optimization." *International Journal Bio-Inspired Computational*, 2, 78.
- Yang, X.S. (2010b). "A New Metaheuristic Bat-Inspired Algorithm." *In Studies in Computational Intelligence*, 284, 65–74.
- Yang, X.S. (2012). "Flower pollination algorithm for global optimization." *In Computer Vision*, 7445, 240–249.
- Yang, X.S., & Hossein Gandomi, A. (2012). "Bat algorithm: A novel approach for global engineering optimization." *Engineering Computational*, 29, 464–483.
- Yazdani, M., & Jolai, F. (2015). "Lion optimization algorithm (LOA): A nature-inspired metaheuristic algorithm." *Journal of Computational Design Engineering*, 3, 24–36.
- Yu, J.J., & Li, V.O. (2015). "A social spider algorithm for global optimization." *Applied Software Computational*, 30, 614–627.
- Yuhui, S. (2011). "An optimization algorithm based on brainstorming process." *International Journal of Swarm Intelligence Research*, 2, 35–62.
- Zhang, C., & Ding, S. (2021). "A stochastic configuration network based on chaotic sparrow search algorithm." *Knowledge-Based Systems*, 220(10), 106924.
- Zhang, G., & Shi, Y. (2018). "Hybrid sampling evolution strategy for solving single objective bound constrained problems." *In: Proceedings of the 2018 IEEE Congress Evaluation Computational*, 1–7.
- Zhang, J., Xiao, M., Gao, L., & Pan, Q. (2018). "Queuing search algorithm: a novel metaheuristic algorithm for solving engineering optimization problems." *Applied Mathematical Modelling*, 63, 464–490.
- Zhao, R., & Tang, W. (2007). "Monkey algorithm for global numerical optimization." *Journal of Uncertain Systems*, 2, 165–176.
- Zhao, W., Wang, L., & Zhang, Z. (2019a). "Atom search optimization and its application to solve a hydrogeologic parameter estimation problem." *Knowledge-Based Systems*, 163, 283–304.
- Zhao, W., Wang, L., & Zhang, Z. (2019b). "Artificial ecosystem-based optimization: A novel nature-inspired meta-heuristic algorithm." *Neural Computational Applied*, 32, 9383–9425.
- Zhao, W., Zhang, Z., & Wang, L. (2020). "Manta ray foraging optimization: An effective bio-inspired optimizer for engineering applications." *Engineering Applied Artificial Intelligent*, 87, 103300.
- Zhao, X., Guo, J., & He, M. (2023). "Multi-objective optimization and improvement of multi-energy combined cooling, heating and power system based on system simplification." *Renewable Energy*, 217, 119195.
- Zheng, Y.J. (2015). "Water wave optimization: A new nature-inspired metaheuristic." *Computational Operation Research*, 55, 1–11.
- Zhong, C., Li, G., & Meng, Z. (2022). "Beluga whale optimization: a novel nature-inspired metaheuristic algorithm." *Knowledge Based System*, 251, 109215.

Aerogelin Tuğla Üretiminde Kullanımı: Bir İnceleme

Use Of Aerogel In Brick Production: A Review

Abudalrhman Mohamed Bsher ALDAKSHE^{1*}, Ahmet Celal APAY²

^{1*}Duzce University, Graduate Education Institute, Duzce, Türkiye

²Duzce University, Faculty of Art, Design and Architecture, Department of Architecture, Duzce, Türkiye

ÖZET

Tuğla, geçmişten günümüze varlığını sürdürmüş yapı malzemelerinden biridir. Zaman içerisinde ihtiyaçları karşılayamamış ve iyileştirilmiştir. Bu iyileştirmeler organik atıklar, endüstriyel atıklar ya da bunlardan türetilen yeni malzemelerle yapılabilmektedir. Son yıllarda iyileştirme için kullanılan popüler malzemelerden biri de aerogeldir. Birçok alanda kullanılan aerogel, inşaat sektöründe de kullanılmaya başlanmıştır.

Bu çalışmada, aerojelle tuğla iyileştirilmesi yapılan çalışmalar irdelenerek aerogelin tuğla üzerindeki etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. Çalışmada aerogel hakkında yapılan makale ve tezler irdelenmiştir. Çalışma sonucunda, aerogelin tuğlanın bazı özelliklerini iyileştirirken bazı özelliklerini olumsuz yönde etkilediği görülmüştür. Ayrıca aerogelin miras yapılarının yeniden işlevselleştirilmesinde de kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Aerogel kullanımı ile sürdürülebilir ve mükemmel termal özelliklere sahip tuğlalar üretilebileceği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tuğla, aerogel, katkı maddesi, yapı malzemesi

ABSTRACT

Brick is one of the building materials that has survived from the past to the present. It has not been able to meet the needs over time and has been improved. These improvements can be made with organic waste, industrial waste or new materials derived from them. One of the popular materials used for improvement in recent years is aerogel. Aerogel, which is used in many areas, has also started to be used in the construction industry.

In this study, it was aimed to investigate the effects of aerogel on bricks by examining the studies on brick improvement with aerogel. In the study, articles and theses about aerogel were examined. As a result of the study, it was seen that aerogel improved some properties of the brick while negatively affecting some of its properties. It was also concluded that aerogel can be used in the re-functionalization of heritage structures. It has been determined that sustainable bricks with excellent thermal properties can be produced by using aerogel.

Keywords: Brick, aerogel, additive, building material

Başvuru: 08.10.2024 Kabul: 01.11.2024

Doi: 10.51764/smutgd.1563731

^{1*}Sorumlu yazar: Duzce University, Graduate Education Institute, Düzce, Türkiye; E-mail: daqshabdalrhman94@gmail.com ; ORCID: 0009-0009-8355-3586

¹ E-mail: aapay@sakarya.edu.tr ORCID: 0000-0003-2008-6588

1. INTRODUCTION

Human beings need shelter to protect themselves from environmental conditions and feel safe (Aldakshe et al., 2020). They had to build structures to meet their shelter needs (Tezel et al., 2020). The most important element of these constructed structures is the material (Al-Hasani et al., 2023b). Among these materials, concrete comes first (Palta et al., 2020), and brick comes second. Brick is a building material obtained by mixing clay soil with water and, if necessary, sand and burning it in ovens at high temperatures (Çağlar and Çağlar, 2019; Al-Amara and Çağlar, 2023). The transformation of brick into building material by heat treatment from adobe dates back to the times of protohistoric societies (2500-1750 BC). Fired brick is a block that has been used for thousands of years, especially until the discovery of reinforced concrete (Çağlar et al., 2018).

The abundance of soil, which is the raw material for bricks and the ease of production stages have made the use of bricks attractive in the construction sector (Çimen et al., 2020; Kale et al., 2021). In the construction industry, bricks are generally used in the construction of exterior and interior walls (Al-Amara and Çağlar, 2022).

As the world population increases rapidly (Demircan, 2020a), almost half of the world's population builds its load-bearing structures with bricks. For this reason, it is improved by substituting different materials into the brick structure. The number of these studies has been increasing significantly in recent years (Al-Hasani et al., 2023a, Demircan, 2020b).

Recently, the most popular additive for brick improvements has been aerogels (Çağlar, 2023). Aerogel is a unique material with nanostructure, high porosity and ultra-low density (Stojanovic et al., 2021; Ng et al., 2016). Aerogels are used as additives in the construction industry in high-performance plaster (Buratti et al., 2014; Bianco et al., 2015), mortar (Jia et al., 2023; Tay et al., 2024; Bostancı, 2020), plaster (Melita et al., 2024; Gavrilă et al., 2023), cement (Shah et al., 2021; Du et al., 2023) and concrete (Wu et al., 2023; Welsch et al., 2023; Chen and Yu, 2024).

In this study, it is aimed to determine the changes that may occur in the brick when aerogel is used in brick production. For this purpose, the studies in the literature were examined in detail.

2. AEROGEL

Aerogels, the lightest solid material ever made by mankind (Çimen, 2023), are nanoporous solids with a fine, open pore structure that makes them extra lightweight. Aerogels are porous and very light materials because they contain 99% air. Their densities vary between 0.001 and 0.5 g/cm³ (Çimen, 2021).

Aerogels have many excellent physical properties, such as high specific surface area, low bulk density, high cross-linking structures, high porosity, small thermal conductivity, small density and large acoustic resistance (Mohannan & Brock, 2004; Yang et al., 2011). An image of the aerogel is given in Figure 1.

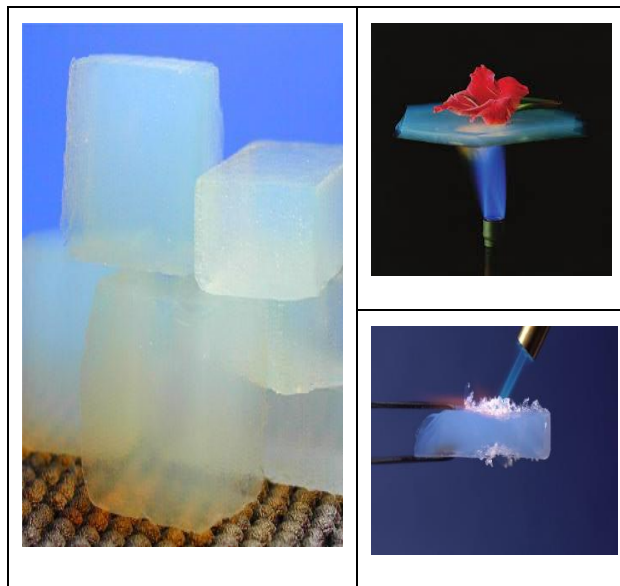


Figure 1. Aerogel

Aerogel is one of the important materials preferred today due to its high physical properties. Aerogel is important because it has high porosity and low density due to the exchange of liquid matter with air inside it. Aerogels have high specific surface area and high nanoporosity structure. In addition, its thermal insulation properties came to the fore with the porosity rate reaching 95% (Öztürk, 2012; Gürsoy, 2019).

Aerogels have much more superior and efficient properties than other insulation materials. It is a type of material that can insulate even the fire reflected directly from the oxygen source (Çimen, 2021). In fact, aerogels are a very good insulation material due to their high porosity and high air voids, and they are ultra-lightweight. This is another desired feature in the construction industry (Figure 1) (Çimen, 2023).

These properties enable aerogels to have application value in many areas such as efficient superthermal insulation systems (Cuce et al., 2014; Koebel et al., 2012), drug delivery (Simirnova et al., 2004), acoustic insulation, oil spill cleanup (Reynolds et al., 2001), catalyst supports (Kogel et al., 2006) and other advanced technologies (Schmidt et al., 1998; Gao et al., 2009; Engel-Herbert et al., 2007).

Aerogel, which can be used for many purposes in buildings, is a highly waterproof and lightweight material (Kistler, 1941). It is almost three times denser than air and has over 95% porosity. Aerogels are characterized by both good temperature resistance (Ghazi and Wakili, 2017; Wei et al., 2016) and a simple production process (Koebel et al., 2016; Huber et al., 2017).

2.1. Aerogel Types

The most convenient way to classify aerogels is to determine according to their chemical composition. Therefore, considering the number of components they contain, aerogels are divided into single-component and multi-component (composite) aerogels (Gürsoy, 2019). Aerogels can be obtained from silica (Çimen, 2023), carbon (Job et al., 2005), different organic materials (Liu et al., 2002) or organic-inorganic composites (Chen et al., 2013; Wang et al., 2014).

Aerogels commonly used in the construction industry are graphene aerogel (Lin et al., 2011), silica aerogel (Dorcheh and Abbasi, 2008), carbon aerogel (Lee et al., 2010) and cellulose aerogel (Sehaqui et al., 2011).

2.1.1. Organic (Carbon) aerogels

Carbon aerogels are covalently bonded, nanometer-sized materials. The network structure can be three-dimensionally symmetrical and asymmetrical. High porosity and high surface area are among its features. Thanks to its controllable porosity feature, it can be produced in different forms such as powder and solid state. Carbon aerogels have become the subject of research of scientists in recent years because they are inert, environmentally friendly, non-toxic, have a porous structure and are easy to control (Çimen, 2021).

Aerogels, most of which are synthesized from inorganic materials, are also synthesized from organic materials. Organic aerogels have properties such as high specific surface area, low dielectric coefficient, high porosity structure, heat and mechanical resistance. Another feature of organic aerogels is that they keep the amount of porosity within the structure under control. This feature of organic aerogels allows them to be synthesized differently in various fields. Carbon aerogels exist in a covalently bonded 3D structure. Organic aerogels do not cause any environmental problems or pollution due to the components they contain (Gürsoy, 2019).

Organic aerogels have different areas of use. These are;

- ✓ Studies to reduce environmental pollution,
- ✓ Space industry
- ✓ Insulation material in daily used white goods

In addition, organic aerogels are promising for future studies because they have the ability to absorb kinetic energy. An example of a carbon aerogel image is given in Figure 2 (Radha, 2008).

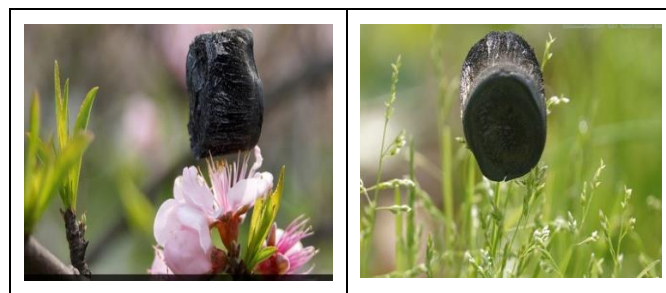


Figure 2. Carbon aerogel

2.1.2. Inorganic (Silica) aerogels

Inorganic aerogels are synthesized from cross-linked and transparent hydrogels produced by the polycondensation of metal alkoxides (Gürsoy, 2019). The properties of inorganic aerogels are; high porosity structure, high surface area, low dielectric coefficient and low density. In addition, inorganic aerogels have low thermal conductivity and are preferred for use in the production of insulation materials.

Inorganic aerogels are produced by sol-gel technique. In this technique, the starting material silica is mixed with a mixture of water and alcohol. After mixing, sol is formed. The sol structure consists of colloidal-cross-linked particles. The resulting sol fills the voids of the particles with liquid material, forming a long bond and gelation occurs. Acid or base catalyst can be added to make gelation more efficient (Öz et al., 2018). Table 2.1 shows the general properties of inorganic aerogels.

Table 2.1. General properties of silica aerogels (Çimen, 2021).

Feature	Value
Porosity	%80-99,8
Porosity diameter	20-150 nm
Thermal conductivity	0,017-0,021 W/mK
Dielectric constant	1,1
Intensity	0,003 g/cm ³
Surface area	500-1000 m ² /g
Primary particle diameter	2-5 nm
Refractive index	1-1,05
Coefficient of thermal expansion	4-4.10-6 1/K

Silica Aerogels can be used as potential materials in sensor materials, adsorbents, insulation materials, catalysts, architecture, space and aviation, and construction applications (Bakış et al., 2006). It is preferred due to its superior qualities such as having an open cell structure, low density, large surface area, high thermal insulation properties, high porosity, refractive properties and very low dielectric constant.

2.1.3. Alumina aerogels

Alumina aerogels with large specific surface area are abundantly available as raw materials. Alumina aerogels are formed by hydrolysis reactions (Mackenzie, 1992). Metal oxide aerogels are produced by using the starting material metal elements with the sol-gel method and extending the process time. Alumina aerogels produced by hydrolysis reaction have begun to be used frequently in recent years. The metal species and hydroxyl used in the hydrolysis reaction come together at the center of the metal to form the Al-OH structure. As the process progresses, it is observed that hydroxyls increase in the center of the metal. As a result of the process operations, a metal-oxide-metal structure (Al-O-Al) emerges. As a result of drying of metal alkoxides, metal (alumina) aerogel is obtained (Çimen, 2021). An image of alumina aerogel is given in Figure 3.



Figure 3. Alumina aerogel

2.1.4. Other aerogels

There are aerogel types other than organic, inorganic and alumina. These are: Borasilicate, Zirconia Carbonized, Formaldehyde, Chalcogenide, nanotube, semiconductor metal aerogels, polymer aerogels and Gradient aerogels (Gürsoy, 2019). In addition, copper-doped metal aerogels were first produced in 2002 and have a unique structure with the advantages of transparency, permeability and photoluminescence properties (Bozoğlu, 2014). Examples of other aerogels are given in Figure 4.



Figure 4. Other aerogel examples

In recent studies, graphene, carbide and silicon aerogels have been synthesized and taken their place under the aerogel class. X-aerogels with very good properties have been synthesized by NASA and these synthesized aerogels have very high elastic and mechanical properties. Its density is very low. Its strength is quite high compared to other produced aerogels. X-aerogels are used in heating fuels and rocket industry (Bozoğlu, 2014).

2.2. Historical Development of Aerogels

The historical development of aerogels, which are called frozen smoke because they create a smoke-like image, is given below.

- ✚ It was first synthesized by Steven Kistler in early 1932, based on silica gels (Çimen, 2021; Çağlar, 2023).
- ✚ After his studies at the University of the Pacific between 1940 and 1945, Monsanto commercialized his product under the name Aerogel Santocel (Çalapkulu, 2024).
- ✚ In 1970, the subject of research at a university in France on rocket fuel or hydrogen storage in porous structures increased the interest in aerogels again (Yılmaz, 2013).
- ✚ After their production began in 1980, carbon aerogel was obtained in 1990. After the production of composite aerogels, studies on aerogels have increased. Today, there are types of aerogels such as silica, carbon, alumina, and composite aerogels (Çimen, 2021).
- ✚ In 1990, carbon aerogels began to be synthesized, and with the good chemical and physical properties of the aerogels obtained, their importance in terms of use increased.
- ✚ Nickel aerogel, synthesized in a study conducted in the USA in 2011, is the lightest material of recent times (Gürsoy, 2019).

3. USE OF AEROGEL IN BRICK PRODUCTION: LITERATURE REVIEW

Mazın (2024), in his master's thesis, investigated the effects of rice husk ash and silica aerogel on the properties of bricks. In the study, 0.5%, 1.0% and 1.5% aerogel and 10%, 20% and 30% rice husk ash were used. He applied physical and mechanical experiments to bricks. As a result of the study, it was determined that the thermal properties of the brick improved with the increase in the silica aerogel ratio. He reported that some of the samples he produced (B1, B2, B3 and B4) were classified as medium strength bricks, while some samples (B5, B6 and B7) were classified as low strength bricks. He also stated that silica aerogel is a suitable substitute material for brick production.

Buratti et al., (2022), In their study, examined the effect of granular aerogel in clay-aerogel blended bricks on both thermal and acoustic properties. In the study, they used 5% granular aerogel at a rate of 5%. As a result of the study, they revealed that the thermal conductivity of the clay sample with 5% aerogel decreased to 0.212 W/(mK), while the reference sample had a thermal conductivity of 0.310 W/(mK).

Çağlar (2023), in his study, examined the effect of silica aerogel produced from boron waste on the compressive strength and thermal performance of the brick. She carried out her work in three stages. In the first stage, silica aerogel was produced using boron waste supplied from the Eskişehir/Kırka region of Türkiye. In the second stage, the silica aerogel produced was substituted into the brick structure at different ratios by volume (0% (REF), 15% (AB1), 25% (AB2), 35% (AB3), 45% (AB4)). They produced mixed brick samples by firing the samples at 900 oC and 1000 oC. In the third and final stage, She applied to the produced samples to compressive strength and heat transfer coefficient determination tests.

Additionally, SEM images were taken to examine the internal structure of the samples. In conclusion;

- ✓ At both temperatures, with the increase of amount of aerogel resulted to decrease in the compressive strength and heat transfer coefficient value,
- ✓ In SEM images, it is seen that as the amount of silica aerogel increases, the amorphous structure increases and voids and cracks form in some places,
- ✓ It has been reported that the use of silica-containing wastes such as boron waste in aerogel production is a suitable solution for the disposal of wastes.

Ganobjak et al., (2023), in their study, investigated the thermal and structural characterization of aerogel glass bricks providing high level of insulation. In their study, they aimed to create an aesthetically pleasing building component that can transmit daylight and has excellent thermal insulation properties. As a result of the study, they compared to obtained the data with traditional brick material. In their studies, they found that aerogel glass bricks can significantly reduce energy consumption and transmit daylight. They also stated that aerogel glass brick is a suitable option for architects and engineers looking for a sustainable and efficient building component.

Wernery et al., (2017), In their article, replaced with aerogel to the perlite filling of insulation bricks commercially available. In other words, it has produced perlite and aerogel filled insulation bricks. They determined the heat conduction coefficient of produced bricks. As a result, it was reported that the U value of the produced brick samples was 0.157 W/(m²K). They also stated that the thickness of the insulation bricks could be reduced with aerogel filling.

Joo et al., (2021), In their study, produced two-component aerogel and 3D printed load-bearing polymer bricks. The aerogel that used was derived from fully cross-linked SLA resin and fully cured epoxy resin. They discussed the flexural and compressive strengths of the produced samples.

Ganobjak et al., (2020) investigated the technical properties of plate, boards and plasters to commercially available. They examined that the usage scenarios of these materials in heritage buildings and considering heritage criteria such as authenticity, integrity, recyclability and compatibility. The study was carried out in two stages: theoretical evaluation and the study with calculated U values. As a result of the study, they reported that aerogel materials, which provide excellent insulation, would be an excellent alternative in the renovation of heritage buildings. In their renovations using aerogel, they stated that aerogel is an easily applicable material. In addition, they observed that an excellent improvement was achieved in terms of both comfort and thermal properties.

4. CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS

In this study, the effects of aerogel substitution on brick, which is an interior and exterior wall element, were investigated. The results obtained from the study conducted in the form of a literature review are listed below.

- ✓ Since the unit volume weight and density of the aerogel are very low, the unit volume weight and density of the brick decreases.
- ✓ Aerogel with high porosity increased the porosity value of the brick.
- ✓ The increase in porosity value caused an increase in water absorption rate.
- ✓ Due to the fact that its porous structure traps heat, the heat conduction coefficient of the brick has been greatly reduced.
- ✓ Aerogel improves not only the thermal insulation properties of the brick but also its acoustic properties.
- ✓ Aerogel, which has a brittle structure, caused the compressive strength of the brick to decrease.
- ✓ It is thought that the compressive strength of the brick can be improved by using wastes such as silica fume, fly ash, etc. as additives in brick production.
- ✓ It has been seen that aerogel can be easily used not only in structures that are being built for the first time but also in heritage structures.
- ✓ It has been determined that aerogel can be easily used in the production of sustainable and energy efficient building materials.
- ✓ It has been observed that aerogel is not used sufficiently in brick production.

KAYNAKLAR

- Al Amara, S. N. A., & Çağlar, A. (2022). "Academic Studies on the Use of Waste in Geopolymer Brick Production". *Journal of Sustainable Engineering Applications and Technological Developments*, 5(2), 171-176. <https://doi.org/10.51764/smutgd.1205987>.
- Al Amara, S.N.A., Çağlar, A. (2023). "Use of Boron Waste in Fly Ash Based Geopolymer Bricks", *Engineering and Technology Journal*, 8(9), 27-95,2800.
- Aldakshe, A., Çağlar, H., Çağlar, A., & Avan, Ç. (2020). "The investigation of use as aggregate in lightweight concrete production of boron wastes". *Civil Engineering Journal*, 6(7), 1328-35. DOI:10.28991/cej-2020-03091551.
- Al-Hasani, H. J. M., Çağlar, H., & Çağlar, A. (2023a). "Improvement Of Heat Conductivity Coefficient Of Fly Ash-Based Geopolymer Brick By Substitution Of Blast Furnace Slag". *Engineering Applications and Technological Developments*, 6(1), 23-33. <https://doi.org/10.51764/smutgd.1247965>.
- Al-Hasani, H. J. M., Çağlar, H., & Çağlar, A. (2023b). Effect of Blast Furnace Slag on Environmentally Friendly Fly Ash Based Geopolymer Bricks. *Euroasia Journal of Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences*, 10(29), 151-163. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8418240>.
- Bakış R., Koyuncu H., Demirbaş Y. (2006). "An investigation of waste foundry sand in asphalt concrete mixtures". *Waste Management & Research*, 24(3), 269-274. <https://doi.org/10.1177/0734242X06064822>.
- Bianco, V., Manca, O., Nardini, S. & Vafai, K. (2015). *Heat transfer enhancement with nanofluids*. CRC Press.
- Bostancı, L. (2020). "A comparative study of petroleum coke and silica aerogel inclusion on mechanical, pore structure, thermal conductivity and microstructure properties of hybrid mortars". *Journal of Building Engineering*, 31, 101478. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101478>.
- Bozoğlu, D. (2014). *Preparation, characterization and investigation of dielectric properties of aerogel-reinforced polymer composites*. [Master's Thesis, İstanbul University]. Yök Tez Arşivi, <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/>.
- Buratti, C., Merli, F., Belloni, E., & Spaccini, F. (2022). Thermal and acoustic performance of additive aerogel-clay bricks. In *Journal of Physics: Conference Series 2385 (1), 012016*. IOP Publishing.
- Chen, H.B., Chiou, B.S., Wang, Y.Z., & Schiraldi, D.A. (2013). "Biodegradable pectin/clay aerogels. *ACS Applied Materials & Interfaces*", 5(5), 1715-1721. <https://doi.org/10.1021/am3028603>.
- Chen, Y. X., & Yu, Q. (2024). "Surface modification of miscanthus fiber with hydrophobic silica aerogel for high performance bio-lightweight concrete". *Construction and Building Materials*, 411, 134478. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134478>.
- Cuce, E., Cuce, P.M., Wood, C.J., & Riffat, S.B. (2014). "Toward aerogel based thermal superinsulation in buildings: a comprehensive review". *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 34, 273-299. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.017>.
- Çağlar, H., & Çağlar, A. (2019). "Research of Physical and Mechanical Properties of Blended Bricks with Fly Ash Based, Blast Furnace Slag Addition". *International Journal of Research-Granthaalayah*, 7(1), 126-136. <https://doi.org/10.29121/granthaalayah.v7.i1.2019.1041>.
- Çağlar, H., Çağlar, A., Korkmaz, S. Z., Demirel, B., & Bayraktar, O. Y. (2018). "Comparison of Physical, Mechanical and Structural Characterization Properties of Current and Factory Produced Blend Bricks Used in Traditional Kastamonu Houses". *Firat University Journal of Engineering Sciences*, 32(2).
- Çağlar, A. (2023). "Effects of silica airgel produced from boron waste on compressive strength and thermal performance of environmentally friendly bricks". *Turkish Journal of Nature and Science*, 12(3), 24-32.
- Çalapkulu, S. (2024). "The World's Lightest Solid, Aerogel". My Sector Smart Business Magazine. <https://www.sektorundergisi.com/dunyanin-en-hafif-katisi-aerogel/>. Erişim Tarihi: 01.10.2024.
- Çimen, S. (2023). *Examination of engineering properties of silica aerogel added lightweight concrete produced using volcanic tufa wastes*, [Master's Thesis, Bayburt University]. Yök Tez Arşivi, <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/>.
- Çimen, A.E. (2021). *Silica based aerogel production and characterization from cast sand and waste casting sand*, [Master's Thesis, Sakarya University]. Yök Tez Arşivi, <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/>.
- Çimen, S., Çağlar, H., Çağlar, A., & Can, Ö. (2020). "Effect of boron wastes on the engineering properties of perlite

based brick". *Turkish Journal of Nature and Science*, 9(2), 50-56.

- Demircan, H. (2020a). "Demircan, H. (2020). "Detection of heat losses in buildings by using thermal camera method (Adapazarı example)". *Journal of Sustainable Engineering Applications and Technological Developments*, 3(1), 26-31.
- Demircan, H. (2020a). Comparison of Temperature Controlled and Natural Circulation Solar Powered Domestic Hot Water Preparation Systems, *Journal of Sustainable Engineering Applications and Technological Developments* 3(1), 12-25.
- Dorcheh, A.S., & Abbasi, M.H. (2008). "Silica aerogel; synthesis, properties and characterization", *Journal of Materials Processing Technology*, 199 (1), 10 – 26. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.10.060>.
- Du, F., Zhu, W., Yang, R., Zhang, Y., Wang, J., Li, W., & Li, T. (2023). "Bioinspired super thermal insulating, strong and low carbon cement aerogel for building envelope". *Advanced Science*, 10(18), 2300340.
- Engel-Herbert, R., Pforte, H., & Hesjedal, T. (2007). "CVD synthesis and purification of singlewalled carbon nanotubes using silica-supported metal catalyst". *Materials Letters*, 61(11), 2589-2593. <https://doi.org/10.1002/advs.202300340>.
- Gao, G.M., Miao, L.N., Ji, G.J., Zou, H.F., & Gan, S.C. (2009). "Preparation and characterization of silica aerogels from oil shale ash". *Materials Letters*, 63(30), 2721-2724. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2009.09.053>.
- Ganobjak, M., Brunner, S., & Wernery, J. (2020). "Aerogel materials for heritage buildings: Materials, properties and case studies". *Journal of Cultural Heritage*, 42, 81-98. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.09.007>.
- Ganobjak, M., Malfait, W. J., Just, J., Käppeli, M., Mancebo, F., Brunner, S., & Wernery, J. (2023, November). Development and evaluation of highly thermally insulating aerogel glass bricks. In *Journal of Physics: Conference Series*, 2600(11), 112015. IOP Publishing.
- Gavrila, C., & Melita, L. (2023, March). Statistical analysis of the compositions of insulating plasters with aerogel. In *Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotechnologies XI*, 12493, pp. 384-389. SPIE.
- Ghazi, K., & Wakili, A. (2017). "Remhof Reaction of aerogel containing ceramic fibre insulation to fire exposure". *Fire and Materials*, 41(1), 29-39. <https://doi.org/10.1002/fam.2367>.
- Gürsoy, M. (2019). *Evaluation of boron wastes in aerogel production*, [Master's Thesis, Ahi Evran University]. Yök Tez Arşivi, <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/>.
- Huber, L., Zhao, S., Malfait, W.J., Vares, S., & Koebel, M.M. (2017). "Fast and minimal-solvent production of superinsulating silica aerogel granulate". *Angewandte Chemie International Edition*, 56(17), 4753-4756. <https://doi.org/10.1002/anie.201700836>.
- Jia, G., Guo, J., & Li, Z. (2023). "Controllable preparation of aerogel/expanded perlite composite and its application in thermal insulation mortar". *Construction and Building Materials*, 394, 132257. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132257>.
- Job, N., Thery, A., Pirard, R., Marien, J., Kocon, L., Rouzaud, J.N., Beguin, F., & Pirard, J.P. (2005). "Carbon aerogels, cryogels and xerogels: influence of the drying method on the textural properties of porous carbon materials". *Carbon*, 43(12), 2481-2494. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2005.04.031>.
- Joo, P., Yao, Y., Teo, N., & Jana, S. C. (2021). "Modular aerogel brick fabrication via 3D-printed molds". *Additive Manufacturing*, 46, 102059. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102059>.
- Kale, M. O., Çağlar, H., Çağlar, A., Apay, A. C., & Çimen, S. (2021). "Improving of lightweight concrete properties produced with Pumice Aggregate of Nevşehir Region with fly Ash Substitution". *Academic Platform-Journal of Engineering and Science*, 9(2), 302-308. <https://doi.org/10.21541/apjes.732592>.
- Kistler, S.S. (1941). Method of making aerogels. *U. S. Patent 2 (767)*, 249.
- Koebel, M., Rigacci, A., & Achard, P. (2012). "Aerogel-based thermal superinsulation: an overview". *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 63 (3) (2012), 315-339.
- Koebel, M.M., Huber, L., Zhao, S., & Malfait, W.J. (2016). "Breakthroughs in cost-effective, scalable production of superinsulating, ambient-dried silica aerogel and silicabiopolymer hybrid aerogels: from laboratory to pilot scale". *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 79 (2), 308-318.
- Kogel, J.E., Trivedi, N.C., Barker, J.M., & Krukowski S.T(Eds.), (2006). *Industrial Minerals & Rocks: Commodities, Markets, and Uses*, SME.

- Lee, Y.J, Jung, J.C., Yi, J., Baeck, S.H., Yoon, J.R & Song, K. (2010). "Preparation of carbon aerogel in ambient conditions for electrical double - layer capacitor". *Current Applied Physics*, 10(2), 682-686. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2009.08.017>.
- Lin, Y., Ehlert, G.J., Bukowsky, C., & Sodano, H.A. (2011). "Superhydrophobic functionalized graphene aerogels". *ACS Applied Materials & Interfaces*, 3 (7), 2200 - 2203.
- Liu, X., Wang, M., & Risen V.M. (2002). Polymer-attached functional inorganic-organic hybrid nano-composite aerogels materials research society. *Boston, MA, United States*, 435-440.
- Mackenzie J.D., Chung Y., Hu Y. (1992). "Rubbery ormosils and their applications", *Journal of Non-Crystalline Solids*, 147, 271-279. [https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(05\)80629-5](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(05)80629-5).
- Mazın, A. K. M. (2024). *Silika Aerojel Ve Pirinç Kabuğu Külünün Tuğla Özelliklerine Etkisi* [Master's Thesis, Ahi Evran University]. Yök Tez Arşivi, <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/>.
- Meliță, L., Calotă, R., & Amăreanu, M. (2024). "Silica Aerogel-Incorporated Cement and Lime Plasters for Building Insulation: An Experimental Study". *Buildings*, 14(8), 2300. <https://doi.org/10.3390/buildings14082300>.
- Mohan, J.L., & Brock, S.L. (2004). "A new addition to the aerogel community: unsupported CdS aerogels with tunable optical properties". *Journal of Non-Crystalline Solids*, 350, 1- 8. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2004.05.020>.
- Ng S, Jelle BP, Staehli T. (2016). "Calcined clays as binder for thermal insulating and structural aerogel incorporated mortar". *Cement and Concrete Composites*, 72(2016): 213-221. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.06.007>.
- Öz, D. C., Öz, B., & Kaya, N. (2018). "Effect of aging and drying time on physical properties of alumina Aerogels". *Journal of Balikesir University Institute of Science*, 20(1), 198-211.
- Öztürk, B., (2012). *Production of Metal-Doped Carbon Aerogel and Investigation of Its Electrochemical Properties*. [Master's Thesis, Gazi University]. Yök Tez Arşivi, <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/>.
- Palta, E., Çağlar, H., & Çağlar, A. (2020). "The effect of boric acid on mechanical properties and structural characterization of self-compacting concrete". *Turkish Journal of Nature and Science*, 9(Special Issue), 160-166. <https://doi.org/10.46810/tdfd.726131>.
- Radha, M. A. Atık Sularda Karbon Aerojel ile Ağır Metal Tutunması. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2008.
- Reynolds, J.G., Coronado, P.r., & Hrubesh, L.W. (2001). "Hydrophobic aerogels for oil-spill clean up - synthesis and characterization". *Journal of Non-Crystalline Solids*, 292 (1), 127-137. [https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(01\)00882-1](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(01)00882-1).
- Schmidt, M., & Schwertfeger, F. (1998). "Applications for silica aerogel products". *Journal of Non-Crystalline Solids*, 225, 364 - 368. [https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(98\)00054-4](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(98)00054-4)
- Sehaqui, H., Qi, Z., & Berglund, L.A. (2011). "High - porosity aerogels of high specific surface area prepared from nanofibrillated cellulose (NFC)". *Composites Science and Technology*, 71 (13), 1593 - 1599. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2011.07.003>.
- Shah, S. N., Mo, K. H., Yap, S. P., & Radwan, M. K. (2021). "Towards an energy efficient cement composite incorporating silica aerogel: A state of the art review". *Journal of Building Engineering*, 44, 103227. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103227>.
- Smirnova, I., Suttiruengwong, S., & Arlt, W. (2004). "Feasibility study of hydrophilic and hydrophobic silica aerogels as drug delivery systems". *Journal of Non-Crystalline Solids*, 350, 54-60. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2004.06.031>.
- Stojanovic, A., Zhao, S., Angelica, E., Malfait, W.J. & Koebel, M.M. (2021). "Three routes to superinsulating silica aerogel powder". *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 90, 57-66.
- Tay, L. T., Lee, Y. Y., Kueh, A. B. H., & Lee, Y. H. (2024). "Mechanical Characteristics of Silica Aerogel Mortar and Sandwiched Mortar with Silica Aerogel Mat Core". *Journal of Materials in Civil Engineering*, 36(1), 04023516. <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-15207>.
- Tezel, H., Çağlar, H., Çağlar, A., Can, Ö., & Çimen, S. (2020). "Effects of boric acid additive to pumice aggregate lightweight concrete properties". *International Journal of Scientific and Technological Research*, 6(9), 1-10.

- Wang, L., Schiraldi, D.A., & Sánchez-Soto, M. (2014). "Foamlike xanthan gum/clay aerogel composites and tailoring properties by blending with agar". *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53 (18), 7680-7687. <https://doi.org/10.1021/ie500490n>.
- Wei T. Y., Lu S. Y., & Chang Y. C. (2009). "A new class of opacified monolithic aerogels of ultralow high-temperature thermal conductivities". *The Journal of Physical Chemistry C - ACS Publications*, 113(17), 7424-7428. <https://doi.org/10.1021/jp900380q>.
- Welsch, T., Vievers, Y., Schnellenbach-Held, M., Bialuschewski, D., & Milow, B. (2023). "Comparison of Different Aerogel Granules for Use as Aggregate in Concrete". *Gels*, 9(5), 406. <https://doi.org/10.3390/gels9050406>.
- Wernery, J., Ben-Ishai, A., Binder, B., & Brunner, S. (2017). Aerobrick—An aerogel-filled insulating brick. *Energy Procedia*, 134, 490-498. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.607>.
- Wu, H., Zhang, H., Zhang, G., Liu, J., Liu, Z., & Du, F. (2023). Study on preparation and performance of advanced aerogel foamed concrete with ultra-light aerogel. *Construction and Building Materials*, 366, 130166. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130166>.
- Yang, H., Kong, X., Zhang, Y., Wu, C., Cao, E., (2011), "Mechanical properties of polymer- modified silica aerogels dried under ambient pressure", *Journal Of Non-Crystalline Solids*, 357(19-20), 3447 - 3453.
- Yılmaz, Y. (2013). *Farklı başlangıç maddeleri kullanılarak sol-jel yöntemiyle monolitik silika arojel ve silika arojel sentezi ve karakterizasyonu*. [Master's Thesis, Gazi University]. Yök Tez Arşivi, <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/>.

Derin Öğrenmeye Dayalı 2 Boyutlu İnsan Poz Tahmin Modellerinin Karşılaştırılması Comparison of Deep Learning Based 2D Human Pose Estimation Models

Cumhur TORUN^{1*}, Abdulkadir KARACI²

^{1*} Kastamonu Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Kastamonu, Türkiye

² Samsun Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Yazılım Mühendisliği, Samsun, Türkiye

ÖZET

İnsan hareketlerinin analizi, bilgisayarlı görü ve yapay zekâ alanlarında büyük öneme sahip bir çalışma alanıdır. Özellikle eklem noktalarının tespiti, insan hareketlerinin ve duruşlarının dijital ortamda modellenmesi açısından kritik rol oynar. Bu alan, tıp, spor, rehabilitasyon, güvenlik, insan-bilgisayar etkileşimi gibi birçok disiplinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Eklem noktalarının doğru ve etkin bir şekilde belirlenmesi sayesinde, sporcuların performans değerlendirilmesi, hastaların rehabilitasyon süreçlerinin izlenmesi ve işaret dili gibi karmaşık hareketlerin dijital ortamda tanınması sağlanabilmektedir. Eklem noktalarını tespit etmek için geliştirilen çeşitli yazılım kütüphaneleri, farklı algoritmalar kullanarak hız, doğruluk ve kullanım kolaylığı açısından avantajlar sunmaktadır. MediaPipe, MoveNet, OpenPose, AlphaPose, Detectron2 ve HRNet gibi popüler kütüphaneler, bu alanda yaygın olarak kullanılmakta ve her birinin belirli avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Bu çalışmada, kütüphaneler karşılaştırılarak insan hareketlerinin analizinde kullanılan yöntemler ve kullanılacakları alanlara yönelik değerlendirmeler yapılmıştır. MediaPipe Holistic ve MoveNet kütüphaneleri gerçek zamanlı uygulamalarda başarılı bulunurken, AlphaPose, ViTPose ve HRNet'in yüksek doğruluk gerektiren uygulamalar için daha etkili olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: İnsan hareket analizi, eklem noktası tespiti, bilgisayarlı görü, poz tahmin modelleri

ABSTRACT

Human motion analysis is a field of study of great importance in computer vision and artificial intelligence. In particular, the detection of joint points plays a critical role in digitally modeling human movements and postures. This field has many applications in many disciplines such as medicine, sports, rehabilitation, security, and human-computer interaction. By accurately and efficiently identifying joint points, it is possible to evaluate athletes' performance, monitor patients' rehabilitation process, and recognize complex gestures such as sign language in a digital environment. Various software libraries developed to detect joint points offer advantages in terms of speed, accuracy, and ease of use by using different algorithms. Popular libraries such as MediaPipe, MoveNet, OpenPose, AlphaPose, Detectron2, and HRNet are widely used in this field, and each has certain advantages and disadvantages. In this study, libraries are compared and compared for analyzing human movement. evaluations of the methods used and the areas where they can be used It was done. MediaPipe Holistic and MoveNet libraries were found to be successful in real-time applications, whereas AlphaPose, ViTPose, and HRNet were found to be more effective for applications requiring high accuracy.

Keywords: Human motion analysis, joint point detection, computer vision, pose estimation models

Başvuru: 25.10.2024 Son Revizyon: 19.11.2024 Kabul: 06.12.2024

Doi: 10.51764/smutgd.1573626

^{1*}Sorumlu yazar: Kastamonu Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Kampüs, Kastamonu, Türkiye;
E-mail: cumhurtorun@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9984-1384>

² E-mail: akaraci@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2430-1372>

1. GİRİŞ

İnsan hareketinin analizi üzerine geçmişten günümüze kadar çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Kinetik ve kinematik hareket analizi için birçok deney, yöntem ve araç geliştirilmiştir. Bilgisayarlı görü alanında eklem noktalarının tespiti, insan hareketlerinin ve duruşlarının dijital olarak anlaşılması ve modellenmesi açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu tespit işlemi, insan vücudunun anatomik yapısına uygun olarak belirli anahtar noktaların (örneğin, eklemler ve uzuvlar) konumlarının hassas bir şekilde belirlenmesini içerir. Eklem noktalarının doğru ve etkin bir şekilde saptanması, çeşitli uygulama alanlarında derinlemesine analiz ve yenilikçi çözümler sunar. Özellikle tıp ve rehabilitasyon alanlarında, eklem noktalarının analizi sayesinde hastaların hareket bozuklukları teşhis edilebilir ve tedavi süreçleri izlenebilir (Wu vd, 2020). Spor bilimlerinde atletlerin performans değerlendirmeleri ve hareket optimizasyonu için kullanılırken, insan-bilgisayar etkileşimi kapsamında doğal ve sezgisel arayüzlerin geliştirilmesine katkı sağlar (Jafarzadeh vd, 2021). Ayrıca, güvenlik ve gözetim sistemlerinde anormal davranışların tespiti, artırılmış ve sanal gerçeklik uygulamalarında gerçekçi avatarların oluşturulması ve robotik alanında insan hareketlerinin taklit edilmesi gibi çeşitli disiplinlerde de yaygın olarak kullanılmaktadır (Gao vd, 2019) (Wu vd, 2020).

Bilgisayarlı görü alanında eklem noktalarının tespiti, işaret dili tanıma ve analizinde temel bir rol oynamaktadır. İşaret dili, el hareketleri, yüz ifadeleri ve beden duruşlarının kombinasyonu ile zengin bir iletişim biçimi sunar. Bu karmaşık hareketlerin doğru anlaşılması ve dijital ortama aktarılması için el ve parmak eklemlerinin hassas tespiti kritik öneme sahiptir. Eklem noktalarının tespiti, işaret dilinin bileşenlerinin ayrıştırılmasını ve hareketlerin zamansal ve mekânsal özelliklerinin analiz edilmesini sağlar. Bu sayede, derin öğrenme tabanlı modeller ve hareket yakalama teknikleri kullanılarak işaretlerin otomatik olarak tanınması ve sınıflandırılması mümkün hale gelir (Karacı vd, 2021). Ayrıca, bu yaklaşım işaret dili eğitimi, tercümesi ve işitme engelli bireylerle etkileşimde yeni teknolojik çözümlerin geliştirilmesine katkı sunar. Dolayısıyla, bilgisayarlı görü ile eklem noktalarının tespiti, işaret dili araştırmalarında ve uygulamalarında hem teorik hem de pratik açıdan önemli bir araştırma alanıdır.

Bilgisayarlı görü alanında eklem noktalarının tespiti için çeşitli yazılım kütüphaneleri geliştirilmiştir. Bu kütüphaneler, insan vücudu üzerindeki eklem noktalarını belirlemek için farklı algoritmalar ve mimariler kullanarak, hareket analizi ve tanıma görevlerinde önemli rol oynamaktadır. Her bir kütüphane, işlem hızı, doğruluk, platform uyumluluğu ve kullanım kolaylığı gibi farklı avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Özellikle işaret dili kelimelerinin tespitinde, el ve parmak hareketlerinin hassas bir şekilde analiz edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, kullanılacak yazılım kütüphanesinin bu spesifik gereksinimleri karşılayabilmesi kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, işaret dili kelimelerinin tespiti için uygun olabilecek yazılım kütüphaneleri karşılaştırılmış ve performansları detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir.

2. LİTERATÜR İNCELEMESİ

Bu çalışmada, literatür taraması yapılırken Google Scholar, IEEE Xplore, ScienceDirect ve Springer gibi önde gelen veri tabanları kullanılmıştır. Arama sırasında 'insan poz tahmini', 'derin öğrenme', 'bilgisayarlı görü', 'MediaPipe', 'OpenPose', 'AlphaPose', 'Detectron2' ve 'HRNet' gibi anahtar kelimeler kullanılmıştır. Araştırmaya dahil edilen çalışmalar, 2021-2024 yılları arasında yayımlanmış, yüksek etki faktörüne sahip dergilerde ve önemli konferanslarda sunulan makalelerden seçilmiştir. Seçim kriterleri olarak, insan poz tahmini alanındaki güncel ve özgün çalışmaların yanı sıra uygulama alanlarında kullanılan modellerin performanslarını değerlendiren çalışmalar dikkate alınmıştır.

Kim vd. (2023), evde yalnız yaşayan yaşlı bireyler için bir mobil robot kullanarak poz tahminine odaklanan bir çalışma yapmıştır. MediaPipe'in hızlı ve hafif 2D poz tahmin yeteneklerini kullanarak eklem açılarını tahmin eden bir model geliştirmişlerdir. Bu sistem, derin öğrenme yöntemleri ve optimizasyon teknikleriyle 3D poz tahmininde karşılaşılan zorlukları çözmek için kullanılmıştır. Çalışmada, eklem açılarının doğru bir şekilde tahmin edilmesi için hareket verileri analiz edilmiş ve video görüntüleri kullanılarak pratik senaryolarda test edilmiştir. Dill vd. (2023) çalışması, MediaPipe Pose'un doğruluğunu değerlendirmeye odaklanarak, özellikle fiziksel egzersizlerin analizi için potansiyelini araştırmaktadır. Araştırma, dört katılımcının çeşitli egzersizleri yaparken iki kamera ve hareket yakalama sistemi kullanılarak gerçekleştirilen deneyler üzerine kurulmuştur. Elde edilen bulgular, MediaPipe Pose'un doğruluğunun hem kameranın bakış açısına hem de egzersiz türüne göre önemli ölçüde değiştiğini ortaya koymaktadır. Optimal bakış açıları yüksek doğruluk sağlarken, öz-örtüşme veya elverişsiz açılarda önemli doğruluk kayıpları gözlemlenmiştir. Çalışmada, çoklu kamera entegrasyonu ve biyomekanik modellerin doğruluğu artırabileceği öne sürülmektedir. Garg vd. (2023) yaptığı çalışmada yoga duruşlarının sınıflandırılmasına yönelik MediaPipe kütüphanesi gibi araçlar kullanılarak vücut anahtar noktalarının tespiti ve iskeletleştirme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, iskeletleştirilmiş görüntülerle eğitilen derin öğrenme modellerinin, iskeletleştirilmemiş görüntülere kıyasla daha yüksek doğruluk oranlarına ulaştığını göstermektedir. Bora vd.

(2023), Assamese İşaret Dili'ni tanıyan bir sistem geliştirmek için makine öğrenimi tekniklerini kullanarak el hareketlerini tanımlamaya yönelik bir yaklaşım sunmuştur. Çalışmada Assamese el hareketlerinin iki ve üç boyutlu görüntülerinin yer aldığı 2094 veri noktasından oluşan bir veri seti hazırlanmış ve MediaPipe görüntülerdeki işaret noktalarını tespit etmek için kullanılmıştır. Dokuz statik kelimeyi içeren bu veri seti, bir ileri beslemeli yapay sinir ağı modeliyle eğitilmiş ve %99 doğruluk oranı elde edilmiştir. Singh vd. (2021), MediaPipe Holistic çözümü, yüz, el ve vücut pozlarını eşzamanlı olarak gerçek zamanlı tahmin edebilen bir sistemin tasarımında kullanmıştır. Bu çalışmada, özellikle insan-bilgisayar etkileşimi ve güvenlik uygulamaları için hızlı ve doğruluk oranı yüksek bir çözüm sunulmuştur. Çalışmada, gerçek zamanlı video analiziyle insan hareketleri yakalanmış ve analiz edilmiştir.

Parashar vd. (2023), MediaPipe ve MoveNet'i entegre ederek yoga pozlarının tespitini ve sınıflandırmasını gerçekleştirmişlerdir. Bu modellerin kombinasyonu, yoga pozlarını doğru şekilde iskeletleştirme ve anahtar noktaları tespit etme konusunda önemli bir iyileşme sağlamıştır. Model, sağlık ve fitness alanlarında geniş uygulama potansiyeline sahip olup, eğitim verisi olarak geniş ve çeşitli yoga veri setleri kullanılmıştır. Jo vd. (2022), MoveNet, OpenPose ve PoseNet gibi poz tespiti modellerini karşılaştırmışlardır. Çalışma sonuçlarına göre, MoveNet'in özellikle mobil cihazlarda hız ve hesaplama verimliliği açısından öne çıktığı tespit edilmiştir. Ayrıca, OpenPose'un daha fazla ayrıntılı anahtar nokta tespiti yapabildiği ve MoveNet'in daha hızlı ve daha az kaynak kullanımıyla daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir.

Liv vd. (2024), yaşlıların sağlık durumları takibi ve acil durum müdahalesi için derin öğrenmeye dayalı gerçek zamanlı düşme tespiti yapmışlardır. Mevcut poz tanıma yöntemlerinin büyük model boyutları, zayıf zamanlılık ve çoklu hedef pozları doğru şekilde tanıma yetersizliği gibi sorunlarına çözüm getirmek amacıyla, hafif ve geliştirilmiş bir OpenPose tabanlı gerçek zamanlı düşme tespit algoritması önermişlerdir. Bu algoritma, VGG-19 yerine hafif bir MobileNet ağı kullanarak model boyutunu ve hesaplama yükünü önemli ölçüde azaltmaktadır. Deneysel sonuçlar, algoritmanın başarılı bir gerçek zamanlı performans sergileyerek çoklu kişi poz tespiti için uygulama gereksinimlerini karşıladığını göstermektedir. Arkushin vd. (2023), HamNoSys işaret dili notasyonunu işaret hareket dizilerine dönüştüren ilk yöntem olan Ham2Pose'u sunmuştur. HamNoSys, dil bağımsızlığı sunan evrensel bir işaret dili transkripsiyon sistemidir ve bu çalışma, farklı işaret dillerine uygun genel bir çözüm sunmayı hedeflemektedir. Araştırma, HamNoSys metnini ve referans bir poz çerçevesini alarak adım adım doğru işaret hareketini üretecek şekilde bir model tasarlamıştır. Model, OpenPose ile elde edilen anahtar noktalar üzerinde eğitim gerçekleştirmiştir. Cao vd. (2017) yaptığı çalışmada, OpenPose kullanılarak insan vücut pozlarının çoklu kişiyle eş zamanlı tespiti üzerine odaklanılmaktadır. Yapılan sistemde, Part Affinity Fields (PAFs) adlı bir teknik kullanarak insan vücudundaki parçalar arasındaki ilişkileri öğrenmiş ve bu parçaları doğru bir şekilde bireylere atanmıştır. Badiola-Bengoa vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada, insan vücut pozlarının spor ve egzersizlerde izlenmesi amacıyla OpenPose'un kullanıldığı çalışmaların sistematik bir incelemesi yapılmıştır. Çalışmada, spor ve egzersiz uygulamalarında HPE'nin (Human Pose Estimation) nasıl geliştirildiği ve OpenPose'un bu bağlamda kullanımının nasıl optimize edilebileceği üzerine odaklanılmıştır.

Song vd. (2024) masa tenisi teknik hareketlerini tanımaya yönelik iki model geliştirmiştir. Çalışma, dinamik ve statik karmaşık ağ analizlerini topluluk algılama algoritmalarıyla birleştirerek oyuncuların teknik ve taktiksel örüntülerini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. AlphaPose ile 37 elit oyuncunun 8015 yüksek çözünürlüklü videosunu içeren iki veri seti oluşturulmuştur. YOLOv8-AlphaPose tabanlı yapay zeka algoritmasının tanıma ve tahmin performansının çalışmadaki diğer algoritmalara (LTSM, biGRU, CNN) göre başarılı olduğu görülmüştür. Areerob vd. (2024), kişisel koruyucu ekipman (PPE- Personal Protective Equipment) tespitini, kalabalık sahnelerde iyileştirmek amacıyla dikkat tabanlı YOLOv7 ve insan duruş tahmini için AlphaPose'u kullanmışlardır. Çalışma, PPE'nin doğru konumlandırılıp konumlandırılmadığını doğrulamak için insan poz tahminini kullanarak yanlış tespitleri ortadan kaldırmış ve tespit doğruluğunu artırmıştır. AlphaPose'un, kalabalık sahnelerde yüksek doğruluk sağlaması ve mevcut yöntemlerin sınırlamalarını aşması hedeflenmiştir. Fang vd. (2022) yaptığı çalışmada, AlphaPose kullanılarak vücut, yüz, el ve ayak anahtar noktalarının eşzamanlı tespiti ve izlenmesi üzerine odaklanılmaktadır. Önerilen yöntem, COCO-WholeBody ve Halpe-FullBody gibi geniş veri setlerinde test edilmiştir ve mevcut yöntemlerden daha hızlı ve doğru sonuçlar sağlamıştır. Zhu vd. (2020) yaptığı çalışma; insan vücudunun 133 anahtar noktasını (vücut, yüz, el, ayak) içeren tam vücut poz tahminini ele alır. AlphaPose sistemine dayalı olarak, özellikle eller ve yüz gibi daha ince ayrıntıları tespit etmeyi hedefler. Çalışma, YOLO insan algılayıcısını kullanarak yüksek verimlilik ve doğruluk sağlamıştır ve MSCOCO2017 veri setinde test edilmiştir.

Bibin (2024) yaptığı çalışmada; Detectron2, insan hareketlerinin tanınması için LSTM modeliyle birleştirilmiştir. Video analizinde, her bir karedeki anahtar noktalar Detectron2 ile tespit edilmiş ve LSTM modeli bu hareketleri analiz etmiştir. Sonuç olarak, model %91'in üzerinde doğruluk sağlamış ve gerçek zamanlı hareket tanımadaki etkili olmuştur. Bu çalışma, spor analizi ve güvenlik gibi alanlarda kullanılacak bir sistem önermektedir. Lee vd. (2024) yaptığı çalışmada yanlış duruş alışkanlıklarından olan baş öne duruşunu (FHP-Front Head Position) tespit eden bir sistem geliştirmişlerdir. İnsan duruşunu standart 2D görüntülerden tahmin etmeye yönelik, mevcut

modellerin çoğu, FHP'nin tanısı için hayati öneme sahip olan C7 omuru ve kraniyovertebral açığı ölçmemektedir. Bu eksiklik, FHP tespit sistemlerinin geliştirilmesinde önemli bir zorluk teşkil etmektedir. Detectron 2 kullanarak geliştirilen sistem ile gerçek zamanlı FHP teşhisi yapılabilmektedir. Davoudi Khaskoli vd. (2024), süper düşük çözünürlüklü görüntülerde nesne tespiti için Detectron2 kullanarak verimli bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu çalışmada, kişilerin tespit edilmesi amacıyla sentezlenmiş veri setleri oluşturulmuş ve Faster R-CNN ile RetinaNet modelleri eğitilmiştir. Modeller, COCO değerlendirme metrikleriyle test edilmiş ve RetinaNet'in daha yüksek doğruluk sağladığı gösterilmiştir. Yöntem, çeşitli çözünürlüklerde yüksek performans sergileyerek düşük çözünürlüklü senaryolar için etkili bir çözüm sunmuştur. Hernandez vd. (2021) yaptığı çalışmada, Detectron2, insan-robot etkileşimi bağlamında, özellikle rehabilitasyon süreçlerinde uygulanmıştır. Bu çalışmada, omuz ve dirsek açılarının tespit edilmesi için kullanılmıştır. Detectron2, üst ekstremitte rehabilitasyon hareketlerinin değerlendirilmesinde başarılı sonuçlar elde etmiş olsa da OpenPose gibi modellerle karşılaştırıldığında daha düşük doğruluk gösterdiği tespit edilmiştir.

Li vd. (2024), HRNet'in karmaşık yapısını hafifleterek sınırlı kaynaklara sahip cihazlarda daha verimli kullanılmasını amaçlamışlardır. Özellikle tıbbi rehabilitasyon ve insan-bilgisayar etkileşimine uygulamışlardır. Çalışmada, Convolutional Block Attention Module (CBAM) kullanılarak ağırlıklı korunurken yüksek doğruluk elde edilmiştir. Model, COCO 2017 ve MPII veri setlerinde test edilmiştir ve yüksek performans göstermiştir. Wang vd. (2024) HR-xNet adlı yeni bir yüksek çözünürlüklü poz tahmin algoritması geliştirmişlerdir. HR-xNet'te, HRNet'in özellik çıkarımı değiştirilmiş ve modelin kaynak tüketimi azaltılmıştır. HR-xNet ile düşük seviyeli detaylı özellikler ve yüksek seviyeli anlamsal özellikler birleştirilerek, küçük anahtar noktalar ve değişken insan pozları için kaybolan anahtar noktaların tespit edilmesi sağlanmıştır. Bao vd. (2023) yaptığı çalışmada hareketlerin çok hızlı olduğu skyjump spor dalındaki sporcuların hareketleri analiz edilmiştir. Sporcuların poz tespitinde HRNet'e, Efficient Channel Attention (ECA) modülünü ekleyerek daha doğru anahtar nokta tespiti yapılmıştır. Zhou vd. (2022) yaptığı çalışma, HRNet'in ağırlıklı hesaplama maliyetini azaltmayı amaçlamıştır. X-HRNet, özellikle daha küçük kişiler ve karmaşık sahnelerde ölçek farklarını daha iyi yönetmek için Spatially Unidimensional Self-Attention (SUSA) modüllerini kullanır. Çalışma, COCO val2017 veri seti üzerinde yapılan testlerde, diğer hafif ağırlıklara kıyasla rekabetçi performans sağlamıştır.

Chen vd. (2024), yaşlı bireylerin evde hareketsizliklerini izlemek için bir RGB-D kamera tabanlı sistem geliştirmişlerdir. Özellikle düşük ışık ve TV ışığı değişimleri gibi zorlu koşullarda hareketsizliği tespit etmeyi hedeflemişlerdir. ViTPose ve RAFT yöntemleri kullanılarak hareket algılama gerçekleştirilmiş ve sistem, çevresel değişimlere karşı yüksek doğruluk ve hassasiyet sergilemiştir. Model, çeşitli senaryolarda test edilerek zorlu ev ortamlarında güçlü bir performans ortaya koymuştur. Chen vd. (2024) yaptığı çalışmada ViTPose'i temel alan FanPose isimli bir insan poz tahmin modeli geliştirmiştir. Modelin başarısını arttırmak için ilk olarak giriş verisindeki tüm parçalar arasında daha güçlü bağlantılar kurabilen gelişmiş bir dikkat mekanizması kullanılmıştır. İkinci olarak, anahtar nokta yerelleştirme doğruluğunu artırmak amacıyla geleneksel Gauss çekirdekleri yerine Laplacian çekirdekleri kullanılarak modelin tanıma hassasiyeti iyileştirilmiştir. Xu vd. (2023), Vision Transformer mimarisini kullanarak vücut poz tahmini yapan ViTPose++ modelini geliştirmişlerdir. Top-Down ve Bottom-Up tarama yöntemlerine uyarlanabilen model, 20M ila 1B parametre arasında ölçeklenebilir ve hem insanlar hem de hayvanlar için eklem noktası tespiti sağlayabilmektedir. Model, MAE pre-training ile transfer öğrenmesini geliştirir ve çok görevli öğrenmede başarılıdır. Üstek vd. (2023), akıllı havalimanlarında şiddetli gerçek zamanlı tespit etmek amacıyla ViTPose kullanarak insan vücut duruşlarını analiz eden iki aşamalı bir şiddet tespit çerçevesi sunmuştur. ViTPose ile eklem noktaları tespit edilmiş ve ardından bir CNN-BiLSTM sınıflandırıcı, bu eklemlerden elde edilen mekânsal ve zamansal bilgileri analiz ederek şiddet içeren davranışları sınıflandırmıştır. Sistem, yüksek doğrulukla şiddetli ve şiddetsiz davranışları ayırt edebilmiştir.

Yukarıda özetlenen önceki çalışmalarda da görüldüğü üzere, insan poz tahmini ve hareket analizleri için farklı kütüphaneler ve modeller kullanılmıştır. MediaPipe, MoveNet, OpenPose, AlphaPose, Detectron2 ve HRNet gibi kütüphaneler, insan vücudunun anahtar noktalarının doğru ve hızlı bir şekilde tespit edilmesi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kütüphaneler, özellikle sağlık, güvenlik ve spor alanlarında önemli avantajlar sunmakla birlikte, her birinin kendine özgü avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Bu çalışmada, insan poz tahmini ve hareket analizinde kullanılan kütüphanelerin avantaj ve dezavantajları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Kütüphanelerin kullanım alanlarına uygunluğu analiz edilmiştir.

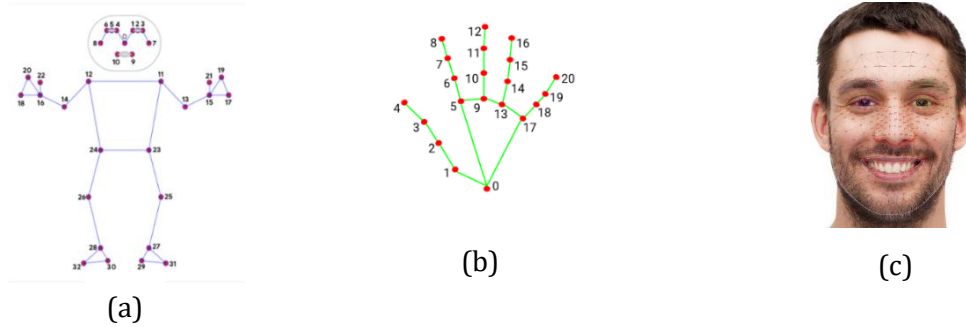
3. POZ TAHMİN YÖNTEMLERİ

3.1. Poz Tahmininde Kullanılan Metotlar

3.1.1. Media Pipe

MediaPipe, Google tarafından geliştirilen, insan vücudu, yüz ve eller gibi çeşitli algılama görevlerini gerçekleştiren açık kaynaklı bir bilgisayarla görme kütüphanesidir. Özellikle gerçek zamanlı poz tahmini ve el izleme uygulamalarıyla öne çıkar. Bu kütüphane, düşük gecikmeli çalışabilmesi sayesinde mobil cihazlar ve gömülü sistemler gibi sınırlı kaynaklara sahip ortamlarda bile yüksek performans sağlar. Derin öğrenme algoritmalarını kullanarak, insan vücudunun 2D ve 3D poz tahmininde önemli bir doğruluk sunar ve özellikle insan-bilgisayar etkileşimi, sağlık, fitness ve güvenlik gibi alanlarda geniş bir kullanım bulur (Google AI, 2024). *MediaPipe*, hızlı ve optimize edilmiş yapısıyla kullanıcıların gerçek zamanlı algılama ve analiz yapmasına olanak tanır. Kütüphane, insan hareketlerinin yakalanması, hareket bozukluklarının teşhisi ve eğitim uygulamaları gibi alanlarda yaygın olarak kullanılır.

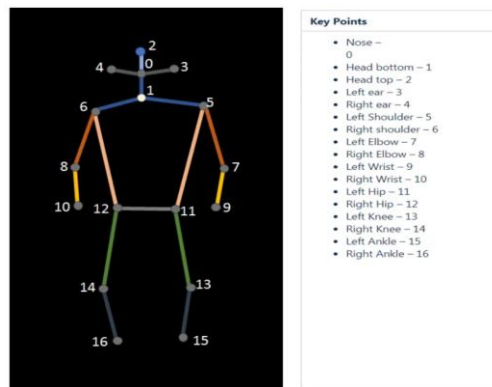
MediaPipe ile tespit edilebilecek yer işaretleri Şekil 1'de gösterilmiştir. Vücut üzerindeki temel eklem noktalarını tespit etmek için *MediaPipe*'in 'Pose' çözümü kullanılabilir. Pose çözümü, kişinin 33 yer işaretini tespit edilebilir. *MediaPipe*'in el algılama çözümü 'Hands' ile bir görüntüdeki eller ve el eklemleri algılanabilir. *MediaPipe*, bir el üzerindeki 21 anahtar noktayı tespit edebilir. Bu anahtar noktaların koordinatları, işaret dili tespitinde kullanılabilir. *MediaPipe*'in 'Face' çözümü, yüz üzerindeki 468 yer işaretini tespit edebilir. *MediaPipe* Holistic, bu 3 modeli birleştirerek kullanılabilir.



Şekil 1. MediaPipe Pose (a), Hand (b) ve Face (c) ile tespit edilen anahtar noktaları (Google AI, 2024)

3.1.2. MoveNet

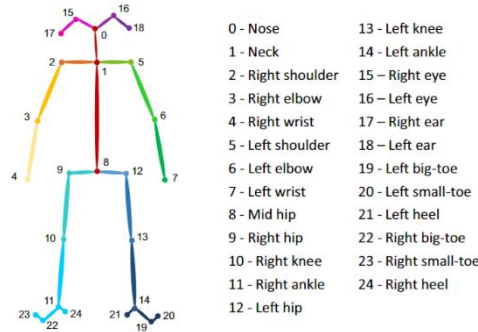
MoveNet, Google tarafından geliştirilen ve gerçek zamanlı insan vücut poz tahmini için kullanılan bir derin öğrenme modelidir. Model, özellikle sınırlı donanım kaynaklarına sahip mobil cihazlar ve gömülü sistemlerde yüksek performanslı ve düşük gecikmeli poz tahmini sağlamak üzere optimize edilmiştir. *MoveNet*, Şekil 2'de gösterilen burun, gözler, kulaklar, omuzlar, dirsekler, el bilekleri, kalçalar, dizler ve ayak bilekleri dahil olmak üzere, insan vücudundaki 17 eklem noktasını tespit edebilir (Grover vd, 2022). Modelin *MoveNet* Lightning ve *MoveNet* Thunder adında iki farklı versiyonu vardır. *Lightning* versiyonu, daha hızlı ve hafif bir modeldir; bu nedenle mobil ve düşük güçlü cihazlar için uygundur. *Thunder* versiyonu ise daha yüksek doğruluk sağlamak için tasarlanmıştır, bu yüzden daha fazla hesaplama gücü gerektirir (TensorFlow, 2024).



Şekil 2. MoveNet, Detectron2, VitPose, AlphaPose, HRNeT tarafından tespit edilebilen vücut anahtar noktaları (Anuj, 2024)

3.1.3. OpenPose

OpenPose, birden fazla kişinin 2D vücut, yüz, el ve ayak anahtar noktalarını (Şekil 3) gerçek zamanlı olarak tespit edebilen açık kaynaklı bir poz tahmin sistemidir. OpenPose'un temel yöntemi, Part Affinity Fields (PAFs) kullanarak vücut parçaları arasındaki ilişkileri öğrenmek ve bu parçaları doğru şekilde bireylere atamaktır. Sistem, her bir kişi için anahtar noktaların konumunu tahmin etmeye dayalı bir yaklaşım kullanır. OpenPose, hem tek kişilik hem de çok kişilik poz tespiti yapabilir ve bu süreçte, CNN türevi olan VGG-19 modeli gibi evrişimli sinir ağlarını kullanarak yüksek doğrulukta sonuçlar elde eder (Gineshidalgo, 2024).



Şekil 3. OpenPose (Temel Model) tarafından tespit edilebilen vücut anahtar noktaları (Zhang vd., 2023)

3.1.4 Detectron2

Detectron2, Facebook AI Research (FAIR) tarafından geliştirilen ve PyTorch tabanlı bir nesne algılama ve segmentasyon kütüphanesidir. Kütüphane, bilgisayarla görü alanında nesne tespiti, örnek tabanlı segmentasyon, semantik segmentasyon ve insan poz tahmini gibi çeşitli görevleri yerine getirmek için kullanılır. İnsan vücudunun eklem noktalarını tespit etmek için, vücut parçalarının konumunu ve oryantasyonunu belirleyen modeller içerir. *Detectron2*, özellikle Mask R-CNN üzerine inşa edilmiş olup, insan vücudundaki 17 anahtar noktayı (örneğin omuzlar, dirsekler, dizler) tespit eder ve bu noktalar üzerinden poz tahmini gerçekleştirir. Tespit edilen vücut eklem noktalarını kullanarak, her eklem için doğru pozisyonunu ve yön bilgisini (örneğin, dirseklerin açısı, dizlerin bükülme durumu) belirleyebilir. Böylece hareketlerin ve vücut duruşunun ayrıntılı bir şekilde analiz edilmesini sağlar (Chatterjee vd., 2021). Gerçek zamanlı uygulamalarda yüksek doğruluk ve hız sunan bu sistem, spor analizi, insan-robot etkileşimi ve video analizinde yaygın olarak kullanılır (Lyttonhao, 2024).

3.1.5. ViTPose

ViTPose, Vision Transformer (ViT) tabanlı bir insan poz tahmin modelidir ve insan pozlarını yüksek doğrulukla tespit etmek için ViT mimarisini kullanır. Geleneksel CNN yaklaşımlarından farklı olarak, *ViTPose* geniş veri setleri üzerinde eğitilmiştir ve Transformer yapısının sunduğu geniş bağlam bilgisi sayesinde özellikle karmaşık sahnelerde başarılı performans gösterir. Temel model, insan vücudundaki 17 eklem noktasını tespit edebilir (Xu vd., 2022).

3.1.6. AlphaPose

AlphaPose, insan vücudu poz tahmini alanında kullanılan açık kaynaklı bir kütüphanedir ve özellikle çoklu kişilerin eklem noktalarını yüksek doğrulukla tespit etmek amacıyla geliştirilmiştir. *AlphaPose*, derin öğrenme tabanlı bir yöntem olarak, karmaşık insan pozlarının tespitinde üstün performans sunar ve bu süreçte hem vücut eklemlerinin konumlarını hem de bu eklemler arasındaki ilişkileri dikkate alarak poz tahmini gerçekleştirir. Kütüphane, insan eklemlerinin yüksek çözünürlükte tahmin edilmesini sağlayan "Spatio-Temporal Affinity Fields" gibi yenilikçi teknikler kullanır (Fang vd., 2022). *AlphaPose*, çoklu kişi tespitinde gerçek zamanlı performans sunarak geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılabilir; bu uygulamalar arasında video analitiği, insan-bilgisayar etkileşimi ve spor analizleri yer alır. Sağladığı yüksek doğruluk ve esneklik, onu hem akademik araştırmalar hem de endüstriyel projeler için tercih edilen bir araç haline getirmektedir.

3.1.7. HRNet

HRNet (High-Resolution Network), insan pozunu tespiti konusunda yüksek çözünürlüklü temsil öğrenmesi sağlayan ve derin öğrenme tekniklerini kullanan bir modeldir. *HRNet*'in en büyük avantajı, yüksek çözünürlüklü temsili modelin her aşamasında koruyarak, özellikle insan poz tespitinde yüksek doğruluk ve hassasiyet sunmasıdır. Bu model, MS-COCO gibi geniş veri setlerinde test edilmiş ve derinlikli öğrenme tabanlı yaklaşımlar arasında öne çıkmıştır (Wang vd., 2020). *HRNet*, insan poz tahmini yanında semantik segmentasyon ve yüz tespiti gibi farklı bilgisayarlı görü problemlerinde de başarıyla kullanılmış ve literatürde bu alanda yeni bir standart oluşturmuştur.

(Sun vd., 2019). Sağladığı yüksek doğruluk ve verimlilik, HRNet'i hem akademik araştırmalarda hem de endüstriyel uygulamalarda tercih edilen bir model haline getirmiştir.

3.2. Poz Tahmininde Kullanılan Tarama Modları

İnsan vücudu eklem noktalarının tespiti için kullanılan Top-Down ve Bottom-Up yöntemleri, iki farklı yaklaşımla poz tahmini yapmaktadır. Top-Down yönteminde önce görüntüdeki bireyler tespit edilir, ardından her birey için poz tahmini yapılır. Bu yöntem yüksek doğrulukla çalışır ve karmaşık pozlarda başarılıdır. Fakat yüksek hesaplama maliyeti ve kalabalık sahnelerde yavaş performans gösterir. Bottom-Up yönteminde ise tüm eklem noktaları aynı anda algılanır, ardından bu eklem noktalarına göre kişi oluşturulur. Bu yöntem hızlı ve verimli olup, kalabalık sahnelerde iyidir. Ancak daha düşük doğruluk ile tahmin yapmasına ve karmaşık pozlarda hatalar yapmasına neden olur (Fang vd, 2021). Çalışmanın, Bulgular ve Tartışma bölümünde poz tahmininde kullanılan metotların hangi tarama modlarını kullandığı sunulmaktadır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tablo 1'de AlphaPose, ViTPose, Detectron2, MoveNet, OpenPose, MediaPipe Holistic, ve HRNet modelleri eklem noktası sayısı, tarama modu, programlama dili, eklem noktası üst üste binme oranı ve gerçek zamanlı performans (FSP) gibi kriterler açısından karşılaştırılmıştır.

Eklem noktası sayısı, modellerin tespit edebildiği insan vücudu eklemlerinin sayısını ifade eder ve el, yüz, vücut gibi bölümlere göre hassasiyet gösterir. AlphaPose, VitPose, Detectron2, MoveNet ve HRNet modelleri temel olarak COCO veriseti ile eğitilmiştir. COCO verisetinde Şekil 2'de gösterildiği gibi 17 vücut anahtar noktası bulunmaktadır. OpenPose modeli, COCO formatındaki 17 anahtar noktanın ötesine geçerek, daha fazla anahtar noktayı tespit eden bir model sunar. Body_25 adı verilen bu genişletilmiş format, insan vücudunun daha detaylı bir iskelet yapısını sağlar (Fang vd, 2022). MediaPipe Holistic çözümünde 3 model birleştirilmiştir. Bu sayede insan vücudunda tespit edilebilen anahtar nokta sayısı diğer modellere göre daha fazladır. MediaPipe Pose, temel vücut noktalarını tespit eder. Tespit edilen bilek ve yüz noktalarına göre görüntü yeniden boyutlandırılır. Tespit edilen bilek ve yüz noktalarından itibaren görüntü yeniden boyutlandırılır. El ve yüz anahtar noktaları, MediaPipe Hand ve MediaPipe Face kullanılarak yeniden boyutlandırılan görüntü içinde tespit edilmeye çalışılır. MediaPipe Holistic, yeniden boyutlandırma işlemi, nesnenin çerçeveler arasında önemli ölçüde hareket etmediğini varsayar ve mevcut çerçevedeki nesne bölgesine bir kılavuz olarak önceki çerçeveden elde edilen tahmini kullanır. Bu da tepki süresinin kısılmasını sağlar. Aynı zamanda, çerçevedeki bir kişinin sol ve sağ ellerinin ya da vücut bölümlerinin karışmasını önleyerek modelin gövde ve parçaları arasında anlamsal tutarlılığı korur.

Tarama modu, Top-Down ve Bottom-Up olmak üzere ikiye ayrılır. Top-Down'da önce birey tespit edilir, ardından poz tahmini yapılır. Bottom-Up'da tüm eklem noktaları aynı anda bulunur ve kişilere atanır. AlphaPose, ViTPose ve MoveNet modelleri Top-Down tarama modunu, OpenPose ise Bottom-Up tarama modunu kullanır. Detectron2 ve MediaPipe Holistic modelleri iki tarama modu arasında geçiş yapabilir. Bu da yapılacak çalışmanın özelliğine göre tarama modunu değiştirerek uygulamanın performansının artmasına fayda sağlar.

Programlama dili, modellerin performans ve kullanım kolaylığı açısından önemlidir. Tüm modeller Python programlama dilini desteklemektedir. Python'un geniş kullanıcı tabanı, zengin kütüphane ekosistemi ve makine öğrenimi alanındaki yaygın kullanımı, bu modellerin hızlı prototipleme, kolay entegrasyon ve geniş kapsamlı uygulamalarda kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Derin öğrenme ve bilgisayarla görme kütüphaneleri olan TensorFlow, PyTorch ve OpenCV gibi popüler framework'lerin Python tabanlı olması, bu modellerin geliştirilme ve uygulanma süreçlerini hızlandırmaktadır. Ayrıca, Python'un öğrenimi kolay bir dil olması, araştırmacıların ve mühendislerin karmaşık algoritmaları daha hızlı bir şekilde test etmelerine ve uygulamalarına olanak sağlamaktadır. Geniş topluluk desteği, güçlü dökümantasyon kaynakları ve veri işleme, analiz ile görselleştirme araçlarının Python'da yaygın olması, vücut anahtar nokta tahmin modellerinin etkin bir şekilde kullanılmasını ve gerçek zamanlı uygulamalara entegrasyonunu kolaylaştırmaktadır. Bu bağlamda, Python'un sağladığı bu esneklik ve gücü, derin öğrenme tabanlı insan poz tahmini projelerinde geniş bir kullanım alanı yaratmaktadır.

Eklem noktası üst üste binme değeri, kalabalık sahnelerde veya eklem noktalarının üst üste geldiği durumlarda anahtar noktaların doğru atanıp atanmadığını gösterir. Örneğin, bir kişinin kolları üst üste geldiğinde, dirseklerden bileklere doğru bağlantının tespit edilmesi modelin başarısını gösterir. Üst üste binme değeri yüksek olduğunda modeldeki üst üste binen eklem noktalarının tespitinin başarısız olduğu, düşük olduğunda ise üst üste inen eklem noktalarının tespitinin başarılı olduğunu gösterir.

FPS, modellerin saniyede işlediği kare sayısını belirler ve gerçek zamanlı uygulamalarda kritik bir ölçüttür. Yüksek FPS, saniyede daha fazla görüntü karesinin işlenmesini sağlayarak, akıcı ve doğru hareket algılamayı mümkün kılar. Bu durum, özellikle spor analizi, sağlık uygulamaları ve insan-bilgisayar etkileşimi gibi gerçek zamanlı geri bildirim

gerektiren alanlarda büyük avantaj sağlar. Düşük FPS, hareketlerin kesik kesik algılanmasına, gecikmeye ve doğruluk kaybına yol açarak hem uygulamanın performansını hem de kullanıcı deneyimini olumsuz etkileyebilir. Yüksek FPS, bu nedenle vücut anahtar noktalarının tahmini modellerinin çeşitli uygulama alanlarında etkin kullanımını belirleyen önemli bir faktördür.

Karşılaştırması yapılan modeller arasında MediaPipe Holistic, el ve parmak eklemlerini yüksek doğrulukla tespit edebilmesi ve düşük donanım gereksinimleri sayesinde işaret dili tanıma uygulamalarında öne çıkmaktadır. Bu model, mobil cihazlar gibi sınırlı kaynaklarda dahi hızlı ve gerçek zamanlı performans sağlayarak işaret dili uygulamaları için büyük bir potansiyele sahiptir. AlphaPose, vücut, el, yüz ve ayak gibi çok sayıda eklem noktasını hassas bir şekilde tespit edebildiği için daha karmaşık işaret dili ifadelerini tanımada avantaj sunmaktadır. OpenPose, genişletilmiş iskelet yapısı (Body_25) sayesinde, özellikle işaret dili ifadelerinde el hareketlerinin ve parmak pozisyonlarının ayrıntılı analizinde güçlü bir araç olarak değerlendirilebilir. Bu bağlamda, işaret dili tanıma uygulamaları için seçilecek modelin hem hareketlerin doğruluğu hem de uygulama ortamının kaynak kısıtlamaları göz önüne alınarak belirlenmesi önemlidir.

Tablo 1. Modellerin Karşılaştırılması

Model	Eklem Noktası Sayısı	Tarama Modu	Programlama Dili	Eklem Noktası Üst Üste Binme	FPS	Donanım Gereksinimi	Kullanım Alanları
AlphaPose	17	Top-Down	Python, C++	Orta	10-15	GPU (NVIDIA), CPU	Spor analizi, hareket tespiti (Hu, 2024)
ViTPose	17 (temel model)	Top-Down	Python	Yüksek	5-10	Yüksek performanslı GPU (NVIDIA)	Poz tahmini, insan-bilgisayar etkileşimi (Yu, 2024)
Detectron2	17	Top-Down Bottom-Up	Python	Yüksek	15-20	GPU (NVIDIA), CPU	Nesne ve insan poz tespiti, güvenlik uygulamaları (Abu Awwad, 2024)
MoveNet	17	Top-Down	Python	Orta	30	Düşük-orta GPU, mobil cihaz	Gerçek zamanlı poz tahmini, mobil uygulamalar (Parle, 2024)
OpenPose	25	Bottom-Up	Python, C++	Yüksek	10-15	Yüksek performanslı GPU (NVIDIA)	Çok kişili poz tespiti, insan hareket analizi (Gineshidalgo, 2024)
MediaPipe Holistic	543 (el, yüz, vücut)	Top-Down Bottom-Up	Python	Düşük	30	Mobil cihazlar, CPU	İşaret dili tanıma, insan hareket analizi, artırılmış gerçeklik (Singh, 2021)
HRNet	17	Bottom-Up	Python	Yüksek	15-20	Yüksek performanslı GPU (NVIDIA)	Karmaşık poz tespiti, insan-bilgisayar etkileşimi, tıp (Lin, 2024)

5. SONUÇLAR

MoveNet ve MediaPipe Holistic, gerçek zamanlı performans gerektiren uygulamalarda öne çıkmaktadır. MoveNet, düşük donanım gereksinimleri ve yüksek FPS ile mobil cihazlarda hızlı egzersiz takibi ve sağlık uygulamaları için idealdir. MediaPipe Holistic ise vücut, yüz ve el hareketlerini aynı anda takip edebilmesi sayesinde işaret dili tanıma gibi uygulamalarda büyük avantaj sağlar. Hem üst hem de alt vücut hareketlerini doğru bir şekilde algılayarak çok yönlü çözümler sunar ve düşük donanım gereksinimiyle geniş bir kullanım alanına sahiptir. Daha karmaşık ve yüksek doğruluk gerektiren uygulamalarda, özellikle spor analizi, fizyoterapi ve tıp alanlarında, AlphaPose,

ViTPose ve HRNet gibi modeller tercih edilmelidir. AlphaPose ve HRNet, çok kişili sahnelerde yüksek doğrulukla çalışırken, ViTPose, Vision Transformer mimarisi sayesinde bireysel egzersiz ve insan-bilgisayar etkileşimi projelerinde etkili bir performans sunar. Yüksek doğruluk ve işlevsellik gerektiğinde bu modellerin kullanımı önerilmektedir. Detectron2, nesne tanıma ve poz tahmini görevlerini aynı anda gerçekleştirebilen, daha genel amaçlı bir modeldir. Güvenlik uygulamaları, nesne algılama, spor ve sağlık analizlerinde yer bulabilse de karmaşık sahnelerde düşük FPS değeri nedeniyle gerçek zamanlı performansta dezavantaj oluşturabilir. İşaret dili tanıma uygulamalarında ise her modelin farklı avantajlar sunduğu görülmektedir. MediaPipe Holistic, el ve parmak eklemlerini yüksek doğrulukla tespit etme yeteneği ve düşük donanım gereksinimi ile mobil ve gerçek zamanlı işaret dili uygulamaları için idealdir. MediaPipe Pose'un bilek noktasını tespit ederek elin konumunu belirlemesi ve ardından el üzerindeki anahtar noktaları MediaPipe Hand çözümü ile yüksek doğrulukla analiz etmesi, bu kütüphaneyi işaret dili tanıma sistemleri için öne çıkarır. AlphaPose, el ve yüz hareketlerinin ayrıntılı analizini gerektiren karmaşık işaret dili ifadelerinde yüksek doğruluk sağlar ve sabit sistemlerde ya da yüksek işlem gücüne sahip ortamlarda etkili bir çözüm sunar. OpenPose, genişletilmiş iskelet yapısı sayesinde çok kullanıcı senaryolarında el ve parmak hareketlerini hassas bir şekilde analiz edebilir.

Sonuç olarak, gerçek zamanlı ve mobil uyumlu projeler için MoveNet veya MediaPipe Holistic önerilirken, yüksek doğruluk gerektiren projeler için AlphaPose, ViTPose veya HRNet tercih edilmelidir. Projenin gereksinimlerine göre uygun modeli seçmek hem verimlilik hem de doğruluk açısından istenilen sonuçları elde etmeye yardımcı olacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 124E379 numaralı hibe kapsamında desteklenmiştir. Yazarlar destekleri için TÜBİTAK'a teşekkürlerini sunarlar.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Yazar Katkısı Beyanı

Yazar-1: Fikir, Orijinal Taslak Oluşturma, Yazım, Revize, Metot Oluşturma, Verilerin Düzenlenmesi, Sonuç ve Tartışma

Yazar-2: Revize, Verilerin Düzenlenmesi, Sonuç ve Tartışma

KAYNAKLAR

- Abu Awwad, Y., Rana, O., & Perera, C. (2024). Anomaly detection on the edge using smart cameras under low-light conditions. *Sensors*, 24(3), 772.
- Areerob, P., Matangkasombut, T., Monnikhof, K. O., & Kumwilaisak, W. (2024, May). Crowded Scene PPE Detection Using Attention Based YOLOv7 and Alpha Pose. In 2024 21st International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON) (pp. 1-6). IEEE.
- Arkushin, R. S., Moryossef, A., & Fried, O. (2023). Ham2pose: Animating sign language notation into pose sequences. In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (pp. 21046-21056).
- Anuj Shah. (2024, Eylül 10). Posetrack data set summary. https://medium.com/@anuj_shah/posetrack-data-set-summary-9cf61fc6f44e
- Badiola-Bengoia, A., & Mendez-Zorrilla, A. (2021). A systematic review of the application of camera-based human pose estimation in the field of sport and physical exercise. *Sensors*, 21(18), 5996.
- Bao, W., Niu, T., Wang, N., & Yang, X. (2023). Pose estimation and motion analysis of ski jumpers based on ECA-HRNet. *Scientific Reports*, 13(1), 6132.
- Bibin Sebastian. (2024, Eylül 10). Human Action Recognition using Detectron2 and LSTM. <https://learnopencv.com/human-action-recognition-using-detectron2-and-lstm/>
- Bora, J., Dehingia, S., Boruah, A., Chetia, A. A., & Gogoi, D. (2023). Real-time assamese sign language recognition using mediapipe and deep learning. *Procedia Computer Science*, 218, 1384-1393.

- Cao, Z., Simon, T., Wei, S. E., & Sheikh, Y. (2017). Realtime multi-person 2d pose estimation using part affinity fields. In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition (pp. 7291-7299).
- Chatterjee, R., Roy, S., Islam, S. H., & Samanta, D. (2021, August). An AI Approach to Pose-based Sports Activity Classification. In 2021 8th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN) (pp. 156-161). IEEE.
- Chen, L., & Fisher, R. B. (2024). Miso: Monitoring inactivity of single older adults at home using rgb-d technology. *ACM Transactions on Computing for Healthcare*, 5(3), 1-19.
- Chen, M., & Tan, G. (2024, July). FANpose: 2D human pose estimation with fully attentional networks under vision transformer baselines. In Third International Symposium on Computer Applications and Information Systems (ISCAIS 2024) (Vol. 13210, pp. 879-884). SPIE.
- Davoudi Kashkoli, M., Javied, A., Barrera-Animas, A. Y., & Davila Delgado, J. M. (2024). A synthetic data approach for object detection in super low resolution images. Proceedings of the 2024 International Conference on Innovation in Artificial Intelligence (ICIAI '24), 86-91.
- Dill, S., Rösch, A., Rohr, M., Güney, G., De Witte, L., Schwartz, E., & Hoog Antink, C. (2023, September). Accuracy Evaluation of 3D Pose Estimation with MediaPipe Pose for Physical Exercises. In Current Directions in Biomedical Engineering (Vol. 9, No. 1, pp. 563-566). De Gruyter.
- Fang, H. S., Li, J., Tang, H., Xu, C., Zhu, H., Xiu, Y., ... & Lu, C. (2022). Alphapose: Whole-body regional multi-person pose estimation and tracking in real-time. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 45(6), 7157-7173.
- Fang, Y., Han, Z., Hu, Z., & Wang, Z. (2021, December). Human Posture Estimation. In 2021 3rd International Conference on Machine Learning, Big Data and Business Intelligence (MLBDBI) (pp. 220-234). IEEE.
- Garg, S., Saxena, A., & Gupta, R. (2023). Yoga pose classification: a CNN and MediaPipe inspired deep learning approach for real-world application. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 14(12), 16551-16562.
- Gao, Q., Liu, J., Ju, Z., & Zhang, X. (2019). Dual-hand detection for human-robot interaction by a parallel network based on hand detection and body pose estimation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(12), 9663-9672.
- Gineshidalgo. (2024, Ekim 20). OpenPose: Real-time multi-person keypoint detection library for body, face, hands, and foot estimation. <https://github.com/CMU-Perceptual-Computing-Lab/openpose>
- Google AI. (2024, Eylül 10). MediaPipe Solutions guide. <https://ai.google.dev/edge/mediapipe/solutions/guide>
- Grover, A., Arora, D., & Grover, A. (2022, December). Human pose estimation using deep learning techniques. In Proceedings of the 4th International Conference on Information Management & Machine Intelligence (pp. 1-6).
- Hernández, Ó. G., Morell, V., Ramon, J. L., & Jara, C. A. (2021). Human pose detection for robotic-assisted and rehabilitation environments. *Applied Sciences*, 11(9), 4183.
- Hu, M., Zhang, M., & Yu, K. (2024). Design of sports training information analysis system based on a multi-target visual model under sensor-scale spatial transformation. *PeerJ Computer Science*, 10, e2030.
- Jafarzadeh, P., Virjonen, P., Nevalainen, P., Farahnakian, F., & Heikkonen, J. (2021, October). Pose estimation of hurdles athletes using openpose. In 2021 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME) (pp. 1-6). IEEE.
- Jo, B., & Kim, S. (2022). Comparative analysis of OpenPose, PoseNet, and MoveNet models for pose estimation in mobile devices. *Traitement du Signal*, 39(1), 119.
- Karacı, A., Akyol, K., & Turut, M. U. (2021). Real-Time Turkish Sign Language Recognition Using Cascade Voting Approach with Handcrafted Features. *Applied Computer Systems*, 26(1), 12-21.
- Kim, J. W., Choi, J. Y., Ha, E. J., & Choi, J. H. (2023). Human pose estimation using mediapipe pose and optimization method based on a humanoid model. *Applied sciences*, 13(4), 2700.
- Lee, H., Oh, B., & Kim, S. C. (2024). Recognition of Forward Head Posture Through 3D Human Pose Estimation With a Graph Convolutional Network: Development and Feasibility Study. *JMIR Formative Research*, 8(1), e55476.

- Li, R., Yan, A., Yang, S., He, D., Zeng, X., & Liu, H. (2024). Human Pose Estimation Based on Efficient and Lightweight High-Resolution Network (EL-HRNet). *Sensors*, 24(2).
- Li, N., Wang, Y., Liu, F., & Huang, W. (2024, August). Real-time multitarget fall detection based on OpenPose. In *Seventh International Conference on Advanced Electronic Materials, Computers, and Software Engineering (AEMCSE 2024)* (Vol. 13229, pp. 751-755). SPIE.
- Lin, H., Chen, H., & Lin, J. (2024). Deep neural network uncertainty estimation for early oral cancer diagnosis. *Journal of Oral Pathology & Medicine*, 53(5), 294-302.
- Lyttonhao. (2024, Ekim 15). Detectron2. <https://ai.meta.com/tools/detectron2/>
- Mishra, A. K., Sahoo, D., Shubhankar, I., & Samal, I. YogaSiddhi: AI-Powered Pose Analysis using MoveNet for Yoga Refinement. *International Journal of Computer Applications*, 975, 8887.
- Parashar, D., Mishra, O., Sharma, K., & Kukker, A. (2023). Improved Yoga Pose Detection Using MediaPipe and MoveNet in a Deep Learning Model. *Revue d'Intelligence Artificielle*, 37(5).
- Parle, A., Shinde, R., Chougule, R., & Agrawal, S. (2024, April). YogaWise: Enhancing Yoga with Intelligent Real Time Tracking using TensorFlow MoveNet. In *2024 International Conference on Cognitive Robotics and Intelligent Systems (ICC-ROBINS)* (pp. 498-505). IEEE.
- Singh, A. K., Kumbhare, V. A., & Arthi, K. (2021, June). Real-time human pose detection and recognition using mediapipe. In *International conference on soft computing and signal processing* (pp. 145-154). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Sun, K., Xiao, B., Liu, D., & Wang, J. (2019). Deep high-resolution representation learning for human pose estimation. In *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 5693-5703).
- Song, H., Li, Y., Fu, C., Xue, F., Zhao, Q., Zheng, X., ... & Liu, T. (2024). Using complex networks and multiple artificial intelligence algorithms for table tennis match action recognition and technical-tactical analysis. *Chaos, Solitons & Fractals*, 178, 114343.
- TensorFlow. (2024, Ekim 1). MoveNet: Ultra fast and accurate pose detection model. <https://www.tensorflow.org/hub/tutorials/movenet?hl=tr>
- Üstek, İ., Desai, J., Torrecillas, I. L., Abadou, S., Wang, J., Fever, Q., ... & Tsourdos, A. (2023, August). Two-Stage Violence Detection Using ViTPose and Classification Models at Smart Airports. In *2023 IEEE Smart World Congress (SWC)* (pp. 797-802). IEEE.
- Wang, J., Sun, K., Cheng, T., Jiang, B., Deng, C., Zhao, Y., ... & Xiao, B. (2020). Deep high-resolution representation learning for visual recognition. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 43(10), 3349-3364.
- Wang, Y., Wang, R., Shi, H., & Liu, D. (2024). MS-HRNet: multi-scale high-resolution network for human pose estimation. *The Journal of Supercomputing*, 1-23.
- Wu, M. Y., Ting, P. W., Tang, Y. H., Chou, E. T., & Fu, L. C. (2020). Hand pose estimation in object-interaction based on deep learning for virtual reality applications. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 70, 102802.
- Wu, Q., Xu, G., Zhang, S., Li, Y., & Wei, F. (2020, July). Human 3D pose estimation in a lying position by RGB-D images for medical diagnosis and rehabilitation. In *2020 42nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC)* (pp. 5802-5805). IEEE.
- Xu, Y., Zhang, J., Zhang, Q., & Tao, D. (2022). Vitpose: Simple vision transformer baselines for human pose estimation. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 35, 38571-38584.
- Xu, Y., Zhang, J., Zhang, Q., & Tao, D. (2023). Vitpose++: Vision transformer for generic body pose estimation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*.
- Yu, N., Ma, T., Zhang, J., Zhang, Y., Bao, Q., Wei, X., & Yang, X. (2024, October). Adaptive Vision Transformer for Event-Based Human Pose Estimation. In *Proceedings of the 32nd ACM International Conference on Multimedia* (pp. 2833-2841).

- Zhang, F., Juneau, P., McGuirk, C., Tu, A., Cheung, K., Baddour, N., & Lemaire, E. (2021, June). Comparison of OpenPose and HyperPose artificial intelligence models for analysis of hand-held smartphone videos. In 2021 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA) (pp. 1-6). IEEE.
- Zhang, M., Zhou, Y., Xu, X., Ren, Z., Zhang, Y., Liu, S., & Luo, W. (2023). Multi-view emotional expressions dataset using 2D pose estimation. *Scientific Data*, 10(1), 649.
- Zhou, Y., Wang, X., Xu, X., Zhao, L., & Song, J. (2022, July). X-hrnet: Towards lightweight human pose estimation with spatially unidimensional self-attention. In 2022 IEEE international conference on multimedia and expo (ICME) (pp. 01-06). IEEE.
- Zhu, H., Jie, C., & Jiang, S. (2020). Multi-Person Full Body Pose Estimation. arXiv preprint arXiv:2008.10060.

Granül Aerojelin Hafif Harman Tuğlada Kullanımı: Termal Özellik ve Basınç Dayanımı Üzerine

Use of Granular Aerogel in Lightweight Blend Brick: On Thermal Properties and Compressive Strength

Arzu Çağlar^{1*}

^{1*} Kirsehir Ahi Evran University, Department of Architecture, Bagbasi Campus, Kirsehir, Türkiye

ÖZET

Harman tuğla, günümüzde pek tercih edilmese de şimdilerde kullanılan fabrikasyon tuğlaların atası olarak tanımlanabilmektedir. Teknolojinin gelişmesi harman tuğlanın özelliklerini ve formunun değişmesine yol açmıştır. Mimari uygulamalarda sıklıkla karşımıza çıkan harman tuğla kullanımı eskiye nazaran az da olsa devam etmektedir. Günümüzde, restorasyon projeleri başta olmak üzere birçok alanda etkinliğini sürdürmektedir. Bu çalışmada, harman tuğla bünyesine nanomalzeme olan granül aerojel ikame edilerek ısı yalıtımı iyileştirilmiş, birim ağırlığı düşük ve TS standartlarına uygun basınç dayanımına sahip harman tuğla üretimi amaçlanmıştır. Çalışmada, hacimsel olarak, %0, %2,5, %5, %7,5 ve %10 oranında granül aerojel killi toprak ile yer değiştirilmiş ve katkılı tuğla numuneleri üretilmiştir. Hafif tuğla üretimi için kullanılan asidik pomza %50 oranında sabit tutulmuştur. Hafif harman tuğla numuneleri 900 °C ve 1000 °C'de pişirilmiştir. Çalışma sonucunda, ısı yalıtım özellikleri iyileştirilmiş ve istenilen standartlara uygun basınç dayanımına sahip harman tuğla numuneleri üretilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Aerojel, pomza, harman tuğla, mimarlık

ABSTRACT

Blended bricks can be defined as the ancestor of the fabricated bricks used today, although they are not preferred much today. The development of technology has led to changes in the properties and form of blended bricks. The use of blended bricks, which we frequently encounter in architectural applications, continues, albeit less than in the past. Today, it continues its activities in many areas, especially restoration projects. In this study, it was aimed to produce blended bricks with improved thermal insulation, low unit weight and compressive strength accordance to TS standards by substituting granular aerogel, which is a nanomaterial, into the blended brick body. In the study, granulated aerogel is replaced with clay soil with 0%, 2.5%, 5%, 7.5% and 10% by volume and additived brick samples are produced. Acidic pumice used for lightweight brick production was kept constant at 50%. Lightweight blended brick samples are fired at 900 °C and 1000 °C. As a result of the study, blended brick samples with improved thermal insulation properties and compressive strength in accordance to the required standards were produced.

Keywords: Aerogel, pumice, blended brick, architecture

1. INTRODUCTION

Human beings have been building structures to meet their shelter needs since the day they existed (Gül, 2018; Kale et al., 2021; Aldakshe et al., 2020). They used different materials while building these structures. One of these materials is the blended brick, known as the ancestor of the brick (Al-Hasani et al., 2023b; Rahman et al., 2021). The transformation of blended brick from adobe into building material through heat treatment dates back to the times of protohistoric societies (2500-1750 BC) (Çağlar et al., 2018). Brick, one of the oldest known materials in history, is a building material that has continued to develop over time and has survived to the present day (Al-Hasani et al., 2023a). Generally, It is a large-scale building material used in the construction of exterior and interior walls of buildings (Shakir et al., 2013).

Brick is a building material which is obtained by mixing clay or clay soil with water and firing it in special ovens (Karaman, 2006). The abundance of suitable soil and the cheap and easy production of bricks are the most important reasons for choosing bricks (Çimen vd., 2020; Marotta, 2010).

Features such as durability, high strength and low cost are the most prominent features of bricks. Therefore, bricks are a material widely used in the construction industry for several centuries (Buratti et al., 2022). The modern brick industry is developing more challenging products to meet user demands, especially in terms of thermal insulation (Zhang et al., 2018). One of these products is aerogel (Joo et al., 2021). Aerogels have attracted tremendous interest from scientists since the discovery of silica aerogels in 1931 (Kistler, 1931; Leventis and Koebel, 2011). Cause of this interest is several unique properties, such as ultra-low density, low thermal conductivity and the power-law relationship between compressive modulus and bulk density.

Aerogels are chosen as alternative material for architectural designs (Riffat and Qiu, 2013; Ganobjak et al., 2020), construction industry (Shanmugam et al., 2020; Gu et al., 2024), automotive industries (Kim and Hong, 2024; Fikry et al., 2023), aerospace industry (Bheekhun et al., 2013; Jin et al., 2023), catalyst support (Guilminot et al., 2007; Rotter et al., 2004), thermal insulation (Zhang et al., 2024a; Varamesh et al., Wu et al., 2024), sound insulation (Song et al., 2024; Le et al., 2024), nanoparticle filtration from air (Kim et al., 2016; Zhai et al., 2016), and airborne nanoparticle filtration (Kim et al., 2016). et al., 2017) and drug delivery (García-González et al., 2021; Marin et al., 2014).

Aerogels are actively used in the construction field as well as all areas. Concrete (Han et al., 2024; Shohan et al., 2024), cement-based material production (Koriakovtseva et al., 2024; She et al., 2024), brick (Werney et al., 2017; Ganobjak et al., 2023), plaster (Wakili et al., 2015; Melita et al., 2024) and thermal insulation material production (Li et al., 2024; Zhang et al., 2024b) are the areas where aerogel is frequently used. In the literature research, it was seen that aerogel was never used in the production of blended bricks.

Based on this situation, this study targets to make improvements on blended bricks (Çağlar and Çağlar, 2019), which is the first building material with a history of at least 10,000 years. In line with this target, it was aimed to produce blended bricks with improved thermal insulation, low unit weight and compressive strength accordance to TS standards by substituting granular aerogel, which is a nanomaterial, into the blended brick body.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1 Material

2.1.1 Granular aerogel

Granular aerogels used in the study were purchased from Aerogel Türkiye company. Used granular aerogel prevents mechanical vibrations and provides noise insulation. It has more than 90% air permeability. It provides thermal insulation in all weather conditions. It has no harmful effects on human health and the environment. The image of the granular aerogel used is given in Figure 1 and its technical specifications are given in Table 1.

Table 1. Technical properties of granular aerogel (Aerogel Türkiye, 2024)

Features	Value
Working temperature range	Between -200 and +650 °C
Density	1,115 g/cm ³
Thermal conductivity coefficient	0,012-0,016 W/mK
Porosity	%90-95
Color	Light cream
Vapor permeability	5-5,5μ
Fire class	A1
Compressive strength	40kPa

Table 1 continued...	
Ecological Impact	4,32 kg CO ₂ for kg
Specific heat	1000 j/kg/K
Surface contact angle	>165 degrees
Waterproofness	superhydrophobic
Dielectric constant	K<2
Sound Absorption	-20 db (1/100) (500 Hz)



Figure 1. Granular aerogel

2.1.2 Pumice

Pumice is a frequently preferred material in the production of lightweight bricks (Tezel et al., 2020). 1 mm sieve acidic pumice material was used in the production of brick samples. The pumice used was taken from within the borders of Nevşehir province. The chemical analysis of acidic pumice is given in Table 2. It is seen in the table that the SiO₂ ratio is 75.37%.

Table 2. Chemical analysis of acidic pumice

Component	Ratio (%)
SiO ₂	73,37
Fe ₂ O ₃	1,85
Al ₂ O ₃	10,76
MgO	0,04
Na ₂ O	3,31
CaO	0,99
K ₂ O	4,86
TiO ₂	0,02
MnO	0,03
SO ₃	0,04
L.O.I	4,73

2.1.3 Clay soil

The clay soil that used for the production of granulated aerogel-added brick samples was taken in the borders of Ankara province. The chemical analysis of the clay soil is given in Table 3 and its image is given in Figure 2. According to the table, there is 40.18% Silicium in clay soil. Apart from Silicium, the elements Fe, Al, Mg and O are found.



Figure 2. Clay soil

Table 3. Chemical analysis of clay soil

Element	Value (%)
Si	40,18
Fe	5,46
Al	10,03
Mg	1,98
Nb	6,26
O	20,01
Ca	14,65
K	1,53

2.1.4 Mixing Water

Ankara province drinking water was used as mixing water in the production of granulated aerogel added brick samples. The mixed water is clear, clean and drinkable quality.

2.2 Material

2.2.1 Production of samples

In the experimental study, the clay soil used as the main material was taken from the clay soil pile located within the borders of Çankaya district of Ankara province. Pumice was provided from the borders of Nevşehir province.

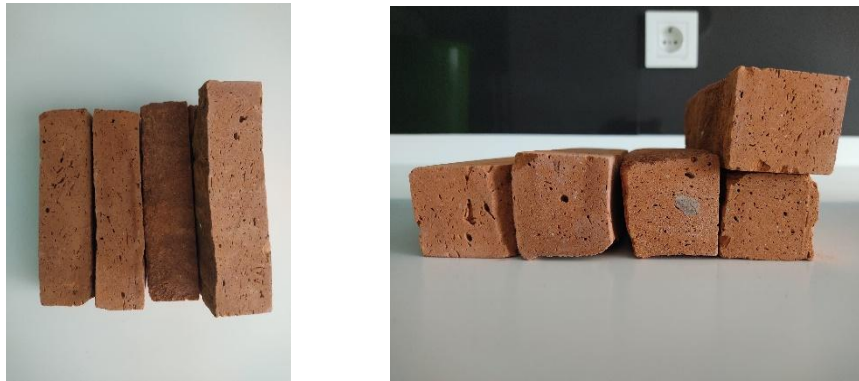
Clay soil taken by quartering method was ground in laboratory type roller crusher. Then, 1 mm sieve material was obtained. The recipe prepared for the mixture is given in Table 4. Mixing water was added to the prepared samples at a rate of 20% of the total material weight for each mixture.

Table 4. Mixture recipe

Samples	Granular Aerogel (%)	Pumice (%)	Clay Soil (%)	Mixed Water (%)
REF	0	50	50	20
AT1	2,5	50	47,5	20
AT2	5	50	45	20
AT3	7,5	50	42,5	20
AT4	10	50	40	20

Then, they were weighed a precision balance and taken in the determined proportions. Taken the materials were put into the mixer and mixed in dry form. After the dry mixture was made, water was added. After mixing again, the dough was left to rest. The prepared dough is rested for 24 hours so that it does not lose its moisture. Then, it is mixed with a mixer until it reaches a plastic consistency. This mixing process continued until there were no air bubbles left (5 minutes). After the kneading process was completed, the mixture prepared in plastic consistency was poured into steel molds of 4x4x16 cm dimensions.

The test samples were removed from the molds after being kept under normal weather conditions for 24 hours. The extracted samples were left to dry in a semi-open area for 7 days. After 7 days, the blended bricks were fired in a timed electric curing oven at 900 °C and 1000 °C for 8 hours. After the samples cooled, they were brought to room temperature (+ 21°C) as seen in Figure 3. Thermal conductivity coefficient determination and compressive strength tests were applied to the fired samples.

**Figure 3.** Granular aerogel added brick samples

2.2.2 Production of samples

Thermal conductivity coefficient determination test;

The most important criterion of thermal insulation properties is the thermal conductivity coefficient. In the experiment, each sample was tested under three different heat and humidity conditions. Each test consisted of at least 10 thermal measurements. The heat conduction coefficient was calculated by taking the arithmetic average of the measurement results (Sütçü et al., 2015; Çağlar, 2018).

Compressive strength test;

Compressive strength test was carried out according to TS EN 772-1, 2012 “Masonry Units - Test Methods - Part 1: Determination of Compressive Strength” standard. The compressive strengths of the granular aerogel added samples were determined by a computer-controlled compressive press. The samples were dried in the oven at +105 °C until they reached constant weight. The compressive strength value of the dried samples was calculated by dividing to the surface area (4x4 cm) of the breaking load.

3. RESEARCH RESULTS AND EVALUATION

3.1 Thermal conductivity coefficient determination test results

The graph showing the heat conduction coefficient of all produced samples is given in Figure 4. In the graph, at 900 °C, while the highest heat transfer coefficient belongs to the REF sample with 1.076 w/mK, the lowest heat transfer coefficient was obtained from the AT4 sample with 0.87 w/mK. At 1000 °C, while the highest heat transfer coefficient was obtained from the REF sample with 1.062 W/mK, the lowest heat transfer coefficient was obtained from the AT4 sample with 0.71 W/mK. At all temperatures, the lowest thermal conductivity coefficient was obtained from the AT4 sample. When the change curve was examined, it was seen that the heat conduction coefficient decreased with the increase in the firing temperature. This situation can be understood from the fact that all samples at 1000 °C are located under the change curve. In short, it was observed that the heat conduction coefficient of the brick samples decreased with the increase in the amount of aerogel. The significant amount of air spaces in the aerogel pores insulates the heat. This situation is resulted with lower thermal conductivity of the samples. Gao et al., (2014), Westgate et al., (2018), Rostami et al., (2021) and Çağlar, (2023) reported in their studies that aerogel reduces the heat transfer coefficient of the brick. They obtained similar results to the article in their studies.

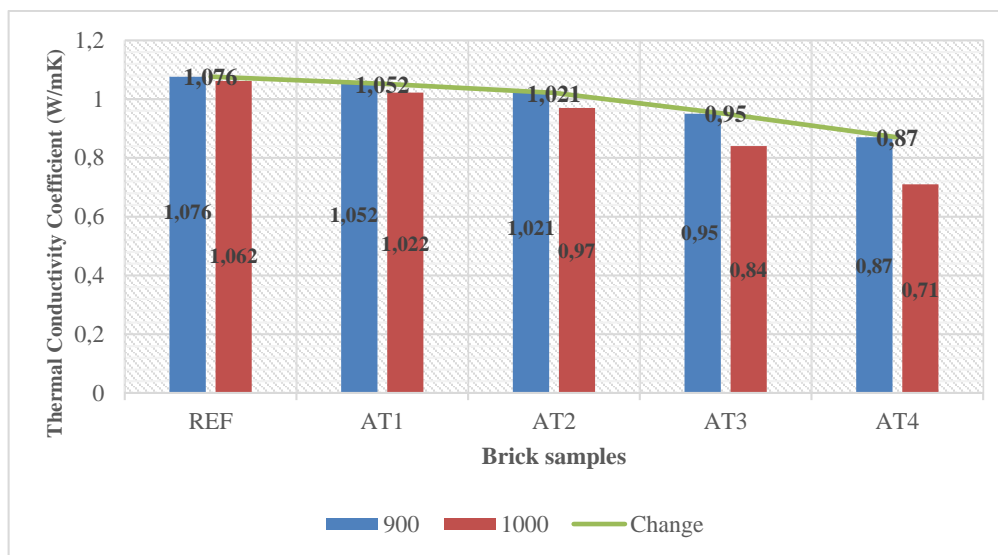


Figure 4. Heat transfer coefficient determination graph

In Figure 5, the decrease rates in the thermal conductivity coefficient of the samples with granular aerogel additives are given. At 900 °C, the lowest reduction rate was obtained from the AT1 sample and the highest reduction rate was obtained from the AT4 sample. The reduction rates are 2.23%, 5.11%, 11.71% and 19.14%, respectively. At 1000 °C, the lowest reduction rate of 3.76% was obtained from the AT1 sample, and the highest reduction rate of 33.14% was obtained from the AT4 sample. The reduction rates are 8.66% and 22.22%, respectively. In short, at both temperatures, the highest reduction rate was obtained from the AT4 sample.

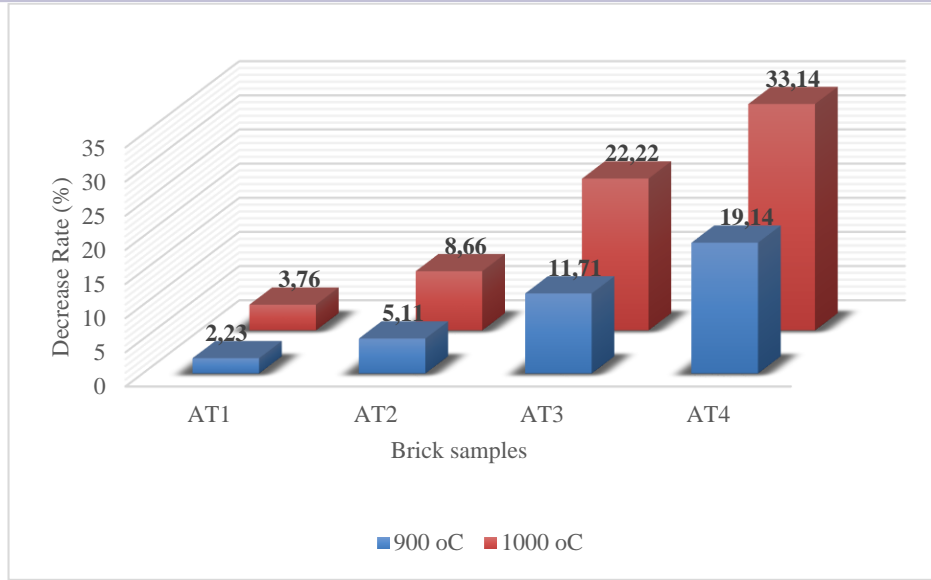


Figure 5. Thermal conductivity coefficient reduction rates

3.2 Compressive strength test results

The compressive strength graph of the samples produced within the scope of the study is given in Figure 6. According to the graph, at 900 °C, the highest compressive strength was obtained from the REF sample with 5.4 MPa, while the lowest compressive strength was obtained from the AT4 sample with 3.1 MPa. At 1000 °C, the highest compressive strength was obtained from the REF sample with 5.9 MPa, while the lowest compressive strength was obtained from the AT4 sample with 3.8 MPa. At both temperatures, the highest compressive strength belongs to the reference sample. At both temperatures, a decrease in compressive strength occurred with the increase in the aerogel amount. The reason for this decrease is that aerogel has a highly porous and brittle structure, and it turns the brick body into a brittle structure.

When granulated aerogel blended bricks are classified according to their compressive strength;

- ✚ At 900 °C, AT1 and AT2 samples are in the medium strength brick class (min. 4 MPa), while AT3 and AT4 samples are in the low strength brick class (min. 2.5 MPa).
- ✚ At 1000 °C, AT1, AT2 and AT3 samples are in the medium strength brick class, and AT4 sample is in the low strength brick class.

Westgete et al., (2018), Adhikary et al., (2020) and Çağlar (2023) reported in their studies that aerogel negatively affects the compressive strength of the brick. These studies support the article.

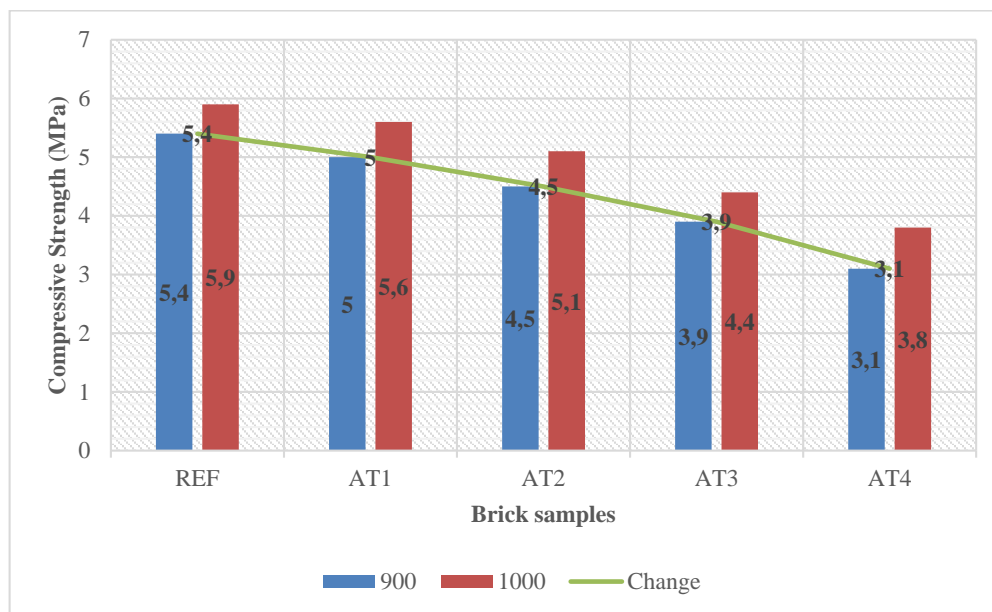


Figure 6. Compressive strength graph

In Figure 7, the compressive strength reduction rates of the samples with granular aerogel additives are given. At 900 °C, the lowest reduction rate was obtained from the AT1 sample, and the highest reduction rate was obtained from the AT4 sample. The reduction rates are; 7.4%, 16.66%, 27.77% and 42.59%, respectively. At 1000 °C, the lowest reduction rate of 5.08% was obtained from the AT1 sample, and the highest reduction rate of 35.59% was obtained from the AT4 sample. The reduction rates are; 13.55% and 25.42%, respectively. In short, at both temperatures, the highest reduction rate was obtained from the AT4 sample which is the highest granular aerogel additive ratio. At both temperatures, although the compressive strengths decrease AT1 and AT2 samples are in the medium strength brick class.

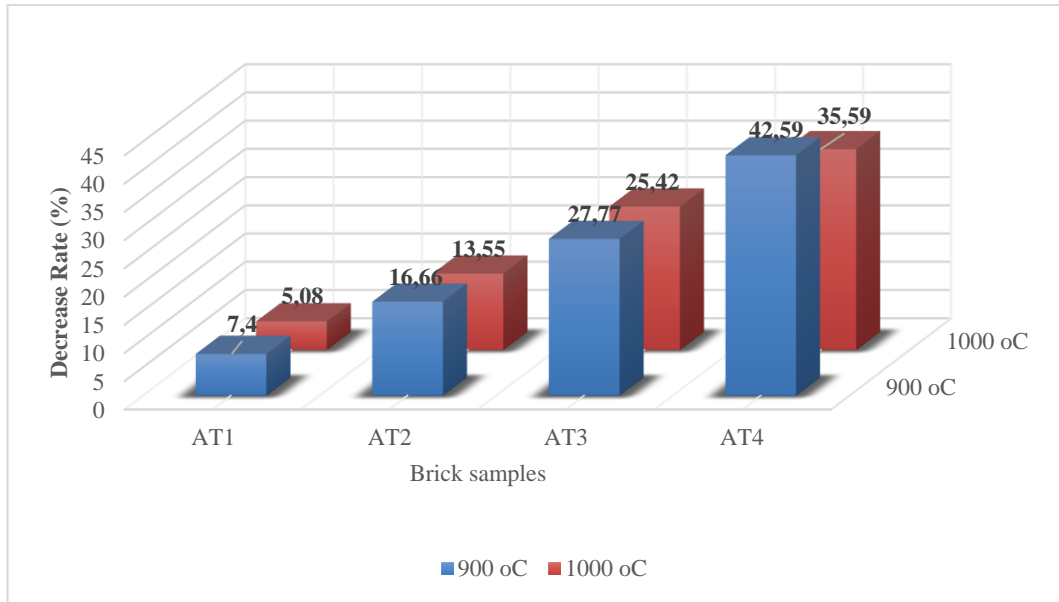


Figure 7. Compressive strength reduction rate

4. CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS

In this study, the usability of granulated aerogel in the production of lightweight blended bricks was investigated and obtained results and made recommendations are given below.

- ✦ A decrease in the heat conduction coefficient is occurred with the increase of the amount of granular aerogel.
- ✦ At both temperatures, the lowest thermal conductivity coefficient is obtained from AT4 samples.
- ✦ Among all samples, the lowest heat conduction coefficient belongs to the AT4 sample fired at 1000 °C.
- ✦ Temperature increase was an important factor in the decrease of the heat transfer coefficient.
- ✦ As the amount of granular aerogel increased, the compressive strength decreased.
- ✦ Among the additive samples, the sample with the highest compressive strength is AT1, and the sample with the lowest compressive strength is AT4.
- ✦ At both temperatures, compressive strength decreased as the amount of granular aerogel increased.
- ✦ At both temperatures, AT1 and AT2 samples are in the medium strength brick class.
- ✦ AT3 and AT4 samples, which are in the low strength class, can be easily used in decoration and landscaping applications.
- ✦ In future studies, the effects of aerogel on different properties of blended bricks should also be investigated.
- ✦ Different additives can be substituted to increase the compressive strength of the blended brick.
- ✦ In the construction sector, opportunities should be provided for the more frequent use of nanotechnological materials.

KAYNAKLAR

Aerogel Türkiye, (2024). <https://aerogelturkiye.com/aerogel-granulleri/>.

Aldakshe, A., Çağlar, H., Çağlar, A., & Avan, Ç. (2020). The investigation of use as aggregate in lightweight concrete production of boron wastes. *Civil Engineering Journal*, 6(7), 1328-35. DOI:10.28991/cej-2020-03091551

Al-Hasani, H. J. M., Çağlar, H., & Çağlar, A. (2023). Effect of Blast Furnace Slag on Environmentally Friendly Fly Ash Based Geopolymer Bricks. *Euroasia Journal of Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences*, 10(29), 151-163. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8418240>.

- Al-hasani, H. J. M., Çağlar, H., & Çağlar, A. (2023a). Improvement Of Heat Conductivity Coefficient Of Fly Ash-Based Geopolymer Brick By Substitution Of Blast Furnace Slag. *Journal of Sustainable Engineering Applications and Technological Developments*, 6(1), 23-33. <https://doi.org/10.51764/smutgd.1247965>.
- Adhikary, S.K., Rudžionis, Z. & Vaičiukynienė, D. (2020). Development of flowable ultra - lightweight concrete using expanded glass aggregate, silica aerogel, and prefabricated plastic bubbles. *Journal of Building Engineering*, 31, 101399: 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101399>
- Baetens, R., Jelle, B. P., & Gustavsen, A. (2011). Aerogel insulation for building applications: A state-of-the-art review. *Energy and buildings*, 43(4), 761-769. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.012>.
- Bheekhun, N., Abu Talib, A. R., & Hassan, M. R. (2013). Aerogels in aerospace: an overview. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013(1), 406065. <https://doi.org/10.1155/2013/406065>.
- Buratti, C., Greco, P. F., Susta, S., & Merli, F. (2022). Clay-Aerogel Mixtures for Bricks Fabrication: Experimental Characterization and Thermal Performance Simulation. Available at SSRN 4953552.
- Çağlar, H., Çağlar, A., Korkmaz, S. Z., Demirel, B., & Bayraktar, O. Y. (2018). Comparison of Physical, Mechanical and Structural Characterization Properties of Hand-Made Blend Brick and Factory-Produced Brick Used in the Construction of Traditional Kastamonu Houses. *Firat University Journal of Engineering Sciences*, 30(2), 39-48.
- Çağlar, H., & Çağlar, A. (2019). Research of Physical and Mechanical Properties of Blended Bricks with Fly Ash Based, Blast Furnace Slag Addition. *International Journal of Research-Granthaalayah*, 7(1), 126-136. DOI:10.29121/granthaalayah.v7.i1.2019.1041.
- Çimen, S., Çağlar, H., Çağlar, A., & Can, Ö. (2020). Effect of boron wastes on the engineering properties of perlite based brick. *Turkish Journal of Nature and Science*, 9(2), 50-56. <https://doi.org/10.46810/tdfd.731005>.
- Fikry, M., Herranz, J., Leisibach, S., Khavlyuk, P., Eychmüller, A., & Schmidt, T. J. (2023). PEMFC-Performance of Unsupported Pt-Ni Aerogel Cathode Catalyst Layers under Automotive-Relevant Operative Conditions. *Journal of The Electrochemical Society*, 170(11), 114524. DOI 10.1149/1945-7111/ad0e45
- Ganobjak, M., Brunner, S., & Wernery, J. (2020). Aerogel materials for heritage buildings: Materials, properties and case studies. *Journal of Cultural Heritage*, 42, 81-98. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.09.007>
- Ganobjak, M., Malfait, W. J., Just, J., Käppeli, M., Mancebo, F., Brunner, S., & Wernery, J. (2023). Get the light & keep the warmth-A highly insulating, translucent aerogel glass brick for building envelopes. *Journal of Building Engineering*, 64, 105600. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105600>
- García-González, C. A., Sosnik, A., Kalmár, J., De Marco, I., Erkey, C., Concheiro, A., & Alvarez-Lorenzo, C. (2021). Aerogels in drug delivery: From design to application. *Journal of Controlled Release*, 332, 40-63. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2021.02.012>
- Gao, T., Jelle, B. P., Gustavsen, A., & Jacobsen, S. (2014). Aerogel-incorporated concrete: An experimental study. *Construction and Building Materials*, 52, 130-136. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.100>
- Gu, X., & Ling, Y. (2024). Research progress of aerogel materials in the field of construction. *Alexandria Engineering Journal*, 91, 620-631. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.02.039>.
- Guilminot, E., Fischer, F., Chatenet, M., Rigacci, A., Berthon-Fabry, S., Achard, P., & Chainet, E. (2007). Use of cellulose-based carbon aerogels as catalyst support for PEM fuel cell electrodes: Electrochemical characterization. *Journal of Power Sources*, 166(1), 104-111. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.12.084>.
- Gül, M. (2018). Investigation of the use of waste plastics and pet as a lightweight concrete aggregate, Master's Thesis, Firat University Institute of Science and Technology, Elazığ.
- Han, F., Lv, Y., Liang, T., Kong, X., Mei, H., & Wang, S. (2024). Improvement of aerogel-incorporated concrete by incorporating polyvinyl alcohol fiber: Mechanical strength and thermal insulation. *Construction and Building Materials*, 449, 138422. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138422>
- Jin, R., Zhou, Z., Liu, J., Shi, B., Zhou, N., Wang, X., Jia, X., Guo, D. & Xu, B. (2023). Aerogels for thermal protection and their application in aerospace. *Gels*, 9(8), 606. <https://doi.org/10.3390/gels9080606>.
- Joo, P., Yao, Y., Teo, N., & Jana, S. C. (2021). Modular aerogel brick fabrication via 3D-printed molds. *Additive Manufacturing*, 46, 102059. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102059>.
- Kale, M. O., Çağlar, H., Çağlar, A., Apay, A. C., & Çimen, S. (2021). Improving of lightweight concrete properties

produced with Pumice Aggregate of Nevşehir Region with fly Ash Substitution. *Academic Platform-Journal of Engineering and Science*, 9(2), 302-308. <https://doi.org/10.21541/apjes.732592>.

- Karaman, S. (2006). Color formation in building bricks. *KS University Journal of Science and Engineering*, 9(1), 125-130.
- Kim, C., & Hong, H. J. (2024). Recovery and Isolation Strategies of Platinum, Palladium, and Rhodium from Spent Automotive Catalyst Leachate Using a Polyethylene-Imine-Grafted Cellulose Nanofibril Aerogel. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 63(10), 4547-4556.
- Kim, S. J., Chase, G., & Jana, S. C. (2016). The role of mesopores in achieving high efficiency airborne nanoparticle filtration using aerogel monoliths. *Separation and Purification Technology*, 166, 48-54. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.04.017>.
- Kistler, S.S. (1931). Coherent expanded aerogels and jellies, *Nature* 127 (1931) 741, <https://doi.org/10.1038/127741a0>.
- Koriakovtseva, T. A., Dontsova, A. E., & Nemova, D. V. (2024). Mechanical and Thermal Properties of an Energy-Efficient Cement Composite Incorporating Silica Aerogel. *Buildings*, 14(4), 1034. <https://doi.org/10.3390/buildings14041034>.
- Le, C. T., Truong, T. Q., Nguyen, D. P. T., Bui, N. T. K., Goh, X. Y., Huynh, H. K. P., Nguyen, A.T., Phan, A.N., Ngo, T.M. & Nguyen, S. T. (2024). Advanced aerogels from waste tires and coal ash for thermal and acoustic insulation applications-insights into the effect of synthesis conditions and precursors contents on aerogel characteristics. *Journal of Porous Materials*, 31(1), 335-350.
- Leventis, N., Koebel, M.M. *Aerogels Handbook*. Netherlands, Springer, New York, 2011, pp. 3–15.
- Li, Z., Yang, W., Zhang, G., Ren, W., & Shi, Z. (2024). Impact of thermal conductivity of aerogel-enhanced insulation materials on building energy efficiency in environments with different temperatures and humidity levels. *Thermal Science and Engineering Progress*, 50, 102540. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102540>.
- Marin, M. A., Mallepally, R. R., & McHugh, M. A. (2014). Silk fibroin aerogels for drug delivery applications. *The Journal of Supercritical Fluids*, 91, 84-89. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2014.04.014>.
- Marotta T., Coffey JC., Brown CL., LaPlante C. *Basic Construction Materials*. 8th ed. Pearson Prentice Hall; 2010. Pp.336.
- Meliță, L., Calotă, R., & Amăreanu, M. (2024). Silica Aerogel-Incorporated Cement and Lime Plasters for Building Insulation: An Experimental Study. *Buildings*, 14(8), 2300. <https://doi.org/10.3390/buildings14082300>.
- Rahman, ME., Ong, PJ., Nabinejad, O., Islam, S., Khandoker NAN., Pakrashi, V. and Shorowordi, KM. (2018). Utilization of blended waste materials in bricks, *Technologies*, 6 (20), 1-12. <https://doi.org/10.3390/technologies6010020>.
- Riffat, S. B., & Qiu, G. (2013). A review of state-of-the-art aerogel applications in buildings. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 8(1), 1-6. <https://doi.org/10.1093/ijlct/cts001>.
- Rotter, H., Landau, M. V., Carrera, M., Goldfarb, D., & Herskowitz, M. (2004). High surface area chromia aerogel efficient catalyst and catalyst support for ethylacetate combustion. *Applied Catalysis B: Environmental*, 47(2), 111-126. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2003.08.006>.
- Rostami, J., Khandel, O., Sedighardekani, R., Sahneh, A. R., & Ghahari, S. (2021). Enhanced workability, durability, and thermal properties of cement-based composites with aerogel and paraffin coated recycled aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126518. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126518>.
- Shakir, A. A., Naganathan, S., & Mustapha, K. N. B. (2013). Development of bricks from waste material: A review paper. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 7(8), 812-818.
- Shanmugam, G., Gunasekaran, E., Karuppusamy, R. S., Ramesh, R., & Vellaichamy, P. (2020, November). Utilization of aerogel in building construction—A Review. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 955, No. 1, p. 012032). IOP Publishing.
- She, W., Wu, Z., Yang, J., Pan, H., Du, F., Du, Z., & Miao, C. (2024). Cement-based biomimetic metamaterials. *Journal of Building Engineering*, 110050. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110050>.
- Shohan, A. A. A., Zaid, O., Arbili, M. M., Alsulamy, S. H., & Ibrahim, W. M. (2024). Development of novel ultra-high-performance lightweight concrete modified with dehydrated cement powder and aerogel. *Journal of*

- Song, Z., Su, L., Yuan, M., Shang, S., & Cui, S. (2024). Self-cleaning, energy-saving aerogel composites possessed sandwich structure: Improving indoor comfort with excellent thermal insulation and acoustic performance. *Energy and Buildings*, 310, 114098. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114098>.
- Tezel, H., Çağlar, H., Çağlar, A., Can, Ö., & Çimen, S. (2020). Effects of boric acid additive to pumice aggregate lightweight concrete properties. *International Journal of Scientific and Technological Research*, 6(9), 1-10.
- Varamesh, A., Zhu, Y., Hu, G., Wang, H., Rezaia, H., Li, Y., ... & Hu, J. (2024). Fully biobased thermal insulating aerogels with superior fire-retardant and mechanical properties. *Chemical Engineering Journal*, 495, 153587. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.153587>.
- Wakili, K. G., Stahl, T., Heiduk, E., Schuss, M., Vonbank, R., Pont, U., ... & Mahdavi, A. (2015). High performance aerogel containing plaster for historic buildings with structured façades. *Energy Procedia*, 78, 949-954. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.027>.
- Wernery, J., Ben-Ishai, A., Binder, B., & Brunner, S. (2017). Aerobrick—An aerogel-filled insulating brick. *Energy Procedia*, 134, 490-498. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.607>.
- Westgate, P., Paine, K., & Ball, R. J. (2018). Physical and mechanical properties of plasters incorporating aerogel granules and polypropylene monofilament fibres. *Construction and Building Materials*, 158, 472-480. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.177>.
- Wu, C., Wang, L., Yan, X., Huang, H., Pan, Y., Wang, H., Wang, W., Yuan, S., Fan, J., Jin, X., Hong, C. & Zhang, X. (2024). Environmental-friendly and fast production of ultra-strong phenolic aerogel composite with superior thermal insulation and ablative-resistance. *Composites Science and Technology*, 256, 110776. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2024.110776>.
- Zhai, C., & Jana, S. C. (2017). Tuning porous networks in polyimide aerogels for airborne nanoparticle filtration. *ACS applied materials & interfaces*, 9(35), 30074-30082. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b09345>.
- Zhang, Z., Wong, Y. C., Arulrajah, A., & Horpibulsuk, S. (2018). A review of studies on bricks using alternative materials and approaches. *Construction and Building Materials*, 188, 1101-1118. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.152>.
- Zhang, X., Yu, J., Zhao, C., & Si, Y. (2024a). Elastic SiC Aerogel for Thermal Insulation: A Systematic Review. *Small*, 2311464. <https://doi.org/10.1002/sml.202311464>.
- Zhang, X., Huang, D., He, S., Kong, Z., Yang, J., Yang, X., & Chen, Z. (2024b). A Novel Thermal Insulation Material with Excellent Mechanical Properties: Carbon Fiber-Modified Aerogel/Cement-Based Composite Material. *Journal of Building Engineering*, 109957. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.109957>.