

BAKAD
2012
BATI KARADENİZ
AKADEMİSYENLER
DERNEĞİ

UMÜFED

ULUSLARARASI
BATI KARADENİZ
MÜHENDİSLİK
VE FEN BİLİMLERİ
DERGİSİ

INTERNATIONAL WEST BLACK SEA
ENGINEERING AND SCIENCE
JOURNAL

EDİTÖR KURULU

SAHİBİ

Batı Karadeniz Akademisyenler Derneği Adına

Prof. Dr. Mahmut BOZAN

EDİTÖR

Doç. Dr. Eyüp Burak CEYHAN

ALAN EDİTÖRLERİ

Doç. Dr. Bilal TÛTÛNCÛ

Dr. Öğr. Üyesi Fatih İLKBAHAR

Dr. Öğr. Üyesi Ramazan SOLMAZ

YAYIN KURULU

Prof. Dr. Davut KARAASLAN

Prof. Dr. Hamdi TEMEL

Prof. Dr. Giray TOPAL

Prof. Dr. Deniz AYDEMİR

Doç. Dr. Eyüp Burak CEYHAN

Doç. Dr. Bilal TÛTÛNCÛ

Doç. Dr. Medeni AYKUT

Doç. Dr. Dahaman ISHAK

Doç. Dr. Şahin PALTA

Doç. Dr. Salih PAŞA

Doç. Dr. Suhaidi SHAFİE

Doç. Dr. Ahmet ÖZTEL

Doç. Dr. Ersin ALAYBEYOĞLU

Doç. Dr. Kamil ÇELİK

Dr. Öğr. Üyesi Fatih İLKBAHAR

Dr. Azizul AZİZAN

Dr. Haslina JAAFAR

Dr. Mohd Nazim MOHTAR

Dr. Mohd Amrallah MUSTAFA

Dr. Fakhrul HAZMAN YUSOFF

Öğr. Gör. M. Semih SARAÖĞLU

Öğr. Gör. Taylan TUĞRUL

İLETİŞİM

Doç. Dr. Eyüp Burak CEYHAN

Bartın Üniversitesi Kutlubeyyazıcılar Kampüsü

Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü Oda:307

MERKEZ/BARTIN

E-posta: (eyupburak@gmail.com)

TEKNİK DESTEK

Doç. Dr. Eyüp Burak CEYHAN

E-posta: eyupburak@gmail.com

DİZİNLER VE PLATFORMLAR

[DERGİPARK](#)

[ResearchBib](#)

[DRJI](#)

[Index Copernicus](#)

[ASOS Index](#)

E-ISSN: 2687-2927

Yeni dizinlere başvurular yapılmış olup gelecek sayılarda eklenmiş olması planlanmaktadır.

İÇİNDEKİLER

YAPAY ZEKA DESTEKLİ ÇUKURLARI TESPİT EDEN VE HARİTA ÜZERİNDE İŞARETLEYEN SİSTEM TASARIMI

Araştırma Makalesi

Sayfa: 33-52 / Yazarlar: Ezgi KARAKAZAN, Eyüp Burak CEYHAN

THE ROLE OF CARBON IN LEAD-ACID BATTERIES: APPLICATIONS, CHALLENGES, AND FUTURE OPPORTUNITIES

Derleme Makale

Sayfa: 53-79 / Yazarlar: Sümeyye ARSLAN, Zehra Gülten YALÇIN, Mustafa DAĞ, Muhammed Bora AKIN

İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI PERVANELERİNİN AKIŞ VE YAPISAL ANALİZ ÇALIŞMASI

Araştırma Makalesi

Sayfa: 80-92 / Yazarlar: Tayip TÜRK, Metin UZUN

APPLICATIONS OF HUMAN PLACENTAL CHORION-INDUCED PLURIPOTENT CELLS FOR TISSUE ENGINEERING

Derleme Makale

Sayfa: 93-104 / Yazarlar: Sude Naz ÇATALTEPE, Nigar Sahra KARABUL, Yağmur KIRBAYIR, Hatice BASHİR, Pelin SARAÇOĞLU, Murat IHLAMUR

PORTLAND ÇİMENTOSUNA PERLİT VE POMZA İKAMESİNİN ÇİMENTONUN ÖZELLİKLERİNİN GELİŞİMİNE KATKILARI

Araştırma Makalesi

Sayfa: 105 - 117 / Yazarlar: İbrahim Pınarcı

İKİ FARKLI SİMÜLASYON PROGRAMI KULLANILARAK OPTİMUM GÜNEŞ PANELİ EĞİM AÇISININ BELİRLENMESİ: AZERBAYCAN ÖRNEĞİ

Araştırma Makalesi

Sayfa: 118 - 136 / Yazarlar: Samir İSLAMOV, Özlem ONAY

UMÜFED

ULUSLARARASI BATI KARADENİZ MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

Değerli Okurlarımız,

Uluslararası Batı Karadeniz Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi'nin altıncı cilt ikinci sayısını yayınlamanın mutluluğunu yaşıyoruz.

Gönderilen makaleler arasından altı makale bu sayımızdaki hakemler tarafından yayınlanmaya değer bulunmuştur.

Ezgi KARAKAZAN ve Eyüp Burak CEYHAN tarafından hazırlanan ilk çalışmada Kinect sensörü kullanılarak yol yüzeylerinde bulunan çukurların tespiti ve harita üzerinde gösterimi amaçlanmaktadır. Başlangıçta YOLOv5 modeli ile çukur tespiti yapılmış, ancak doğruluk oranının %70 çıkmasından dolayı daha gelişmiş bir model olan YOLOv8'e geçiş yapılmıştır. YOLOv8 kullanılarak %75 başarı elde edilmiş olup daha yüksek doğruluk ve hızlı işlem kapasitesi sayesinde çukurların tespiti iyileştirilmiştir. Geliştirilen sistem sayesinde tespit edilen çukurların GPS koordinatları, Kinect sensöründen elde edilen derinlik verileri ile birleştirilerek harita üzerinde işaretlenmektedir. .NET MAUI ile yapılan uygulama, kullanıcılara bu tespitleri anlık olarak gösterecek şekilde geliştirilmiştir. Tespit edilen her çukur, harita üzerinde belirgin bir şekilde işaretlenmektedir. Böylelikle sürücülerin çukurun bulunduğu konumdan geçerken uyarılması sağlanacaktır. Ayrıca bu uygulama sayesinde hem yol bakım çalışmalarında kullanılacak etkili bir çukur tespit ve izleme çözümü sunulmakta hem de otonom sürüş sırasında araçlara yol güzergahında bulunan çukurların konumu bildirilerek olası kazaların ve arızaların önüne geçilebilecektir.

Sümeyye ARSLAN, Zehra Gülten YALÇIN, Mustafa DAĞ ve Muhammed Bora AKIN tarafından hazırlanan ikinci makalede, kurşun-asit pillerde karbonun rolü ele alınarak uygulamalar, zorluklar ve gelecek fırsatları anlatılmıştır.

Tayip TÜRK ve Metin UZUN tarafından hazırlanan üçüncü makalede, pervaneli uçaklarda kullanılan pervane palleri, havacılık endüstrisinde önemli bir rol oynamakta olup, bu bileşenlerin performansını ve dayanıklılığını değerlendirmek adına detaylı analizlere tabi

tutulmuştur. Bu analizler, akış ve yapısal özellikleri içermekte olup, Fluent yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve kapsamlı bir rapor ile belgelenmiştir. Akış analizi, pervanedeki hız ve basınç kontürlerini içermekte, ayrıca streamline ve hız vektörleri sonuçlarını detaylı bir şekilde ortaya koymaktadır. Bu veriler, pervanenin aerodinamik performansını anlamak adına kritik öneme sahiptir. Fluent içerisinde yapılan analizlerde ise basınç kuvvetleri, yapısal analizin bir parçası olarak ele alınmıştır. Bu, pervane üzerindeki kuvvetlerin ve etkileşimlerin anlaşılmasına katkı sağlamaktadır. Yapısal analiz kapsamında pervane üzerindeki toplam deformasyon, gerilim ve gerinim analizleri detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Bu analizler, malzeme dayanıklılığını, genel yapısal bütünlüğü ve potansiyel zayıf noktaları belirleme açısından büyük öneme sahiptir. Sonuç olarak, bu kapsamlı analizler, pervaneli uçaklarda kullanılan pervane pallerinin performansını optimize etmek, dayanıklılıklarını artırmak ve güvenilirliklerini sağlamak adına mühendislik çözümlerine yönlendirilmiş bir yaklaşım sunmaktadır. Bu çalışma, havacılık endüstrisindeki teknolojik gelişmelere katkıda bulunan önemli bir mühendislik çalışmasıdır.

Sude Naz ÇATALTEPE, Nigar Saha KARABUL, Yağmur KIRBAYIR, Hatice BASHİR, Pelin SARAÇOĞLU ve Murat IHLAMUR tarafından hazırlanan dördüncü makalede, doku mühendisliği için insan plasental koryonundan geliştirilen pluripotent hücrelerin uygulamaları ele alınmıştır.

İbrahim PINARCI tarafından hazırlanan beşinci makalede, Portland çimentosu, perlit ve pomzanın fiziksel ve kimyasal özellikleri belirlenmiş ardından referans çimento ile her birinden % 5 ve % 10' ar oranlarında perlit ve pomza ikameli çimentoların su ihtiyacı, priz süresi, hacim genleşme ve basınç dayanımı değerleri tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar çerçevesinde, malzeme özellikleri ve ikame durumuna bağlı olarak su ihtiyacı, hacim genleşme değerleri, priz süreleri ve basınç dayanımlarında farklılıklar olduğu görülmüştür. Çalışma sonucunda basınç dayanımı bakımından oldukça verimli ve kabul edilebilir değerler elde edilmiştir.

Samir İSLAMOV ve Özlem ONAY tarafından hazırlanan altıncı makalede, güneş enerjisi yatırımları açısından henüz yeni gelişmekte olan Azerbaycan için yenilenebilir enerjiye olan teşvikin artırılması ve kullanımının yaygınlaştırılması amacı ile, Azerbaycan'ın 14 farklı siyasi bölgesi için yıllık değişim süreçlerinde optimum panel eğim açısı ve farklı eğim açılarında PV paneller üzerine gelen radyasyon miktarları ve elde edilen ışınım miktarları belirlenmiş ve elektrik enerjisine dönüştürülerek PV panellerin kurulumu için hesaplamalar yapılmıştır. Çalışmada PVGIS ve PVsyst'de yapılan hesaplamalar sonucunda Nahçıvan ilindeki güneş enerji potansiyelinin en yüksek olduğu belirlenmiştir.

Dergimize çalışmalarını gönderen değerli yazarlarımıza, hazırlanmasında emeği geçen alan editörlerine ve kıymetli vakitlerini ayırarak makaleleri değerlendiren hakemlerimize teşekkür ediyoruz. Sonraki sayılarda siz değerli okurlarımızın önerileriyle ve gönderecekleri makalelerle desteklerini esirgemeyeceklerinden eminiz. Bu vesileyle gelecek sayımızın Haziran 2025 tarihinde yayınlanması planlandığını hatırlatıyor, gelecek sayıya da çalışmalarınızı bekliyoruz. Uluslararası Batı Karadeniz Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi'nin bu sayısının da ilim dünyasına hayırlı olmasını diliyorum, saygılarımla sunuyorum.

31.12.2024

EDİTÖR

Doç. Dr. Eyüp Burak CEYHAN

*Bartın Üniversitesi Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Fakültesi
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü*

YAPAY ZEKA DESTEKLİ ÇUKURLARI TESPİT EDEN VE HARİTA ÜZERİNDE İŞARETLEYEN SİSTEM TASARIMI

Ezgi KARAKAZAN^{1,a,*}, Eyüp Burak CEYHAN^{2,b}

¹Bartın Üniversitesi MMTF Bilgisayar Mühendisliği Bölümü,

²Bartın Üniversitesi MMTF Bilgisayar Mühendisliği Bölümü

^aezgi_kazan58@hotmail.com, ORCID: 0009-0001-5144-4168

^beyupburak@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7088-875X

ÖZET

Bu çalışmada, Kinect sensörü kullanılarak yol yüzeylerinde bulunan çukurların tespiti ve harita üzerinde gösterimi amaçlanmaktadır. Başlangıçta YOLOv5 modeli ile çukur tespiti yapılmış, ancak doğruluk oranının %70 çıkmasından dolayı daha gelişmiş bir model olan YOLOv8'e geçiş yapılmıştır. YOLOv8 kullanılarak %75 başarı elde edilmiş olup daha yüksek doğruluk ve hızlı işlem kapasitesi sayesinde çukurların tespiti iyileştirilmiştir. Geliştirilen sistem sayesinde tespit edilen çukurların GPS koordinatları, Kinect sensöründen elde edilen derinlik verileri ile birleştirilerek harita üzerinde işaretlenmektedir. .NET MAUI ile yapılan uygulama, kullanıcılara bu tespitleri anlık olarak gösterecek şekilde geliştirilmiştir. Tespit edilen her çukur, harita üzerinde belirgin bir şekilde işaretlenmektedir. Böylelikle sürücülerin çukurun bulunduğu konumdan geçerken uyarılması sağlanacaktır. Ayrıca bu uygulama sayesinde hem yol bakım çalışmalarında kullanılacak etkili bir çukur tespit ve izleme çözümü sunulmakta hem de otonom sürüş sırasında araçlara yol güzergahında bulunan çukurların konumu bildirilerek olası kazaların ve arızaların önüne geçilebilecektir.

ANAHTAR KELİMELER: Görüntü İşleme, Yolov8, GPS, Kinect, Yol, Çukur, Konumlandırma.

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

Geliş (Received):08.09.2024

Atıf (Citation): KARAKAZAN, E., CEYHAN, E.B., "Yapay Zeka Destekli Çukurları Tespit Eden Ve Harita Üzerinde İşaretleyen Sistem Tasarımı", UMÜFED Uluslararası Batı Karadeniz Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 6(2), ss. 33-52, 2024.

Kabul (Accepted): 31.12.2024

Yayın (Published): 31.12.2024

ARTIFICIAL INTELLIGENCE-SUPPORTED SYSTEM DESIGN THAT DETECTS POTHOLE AND MARKS THEM ON THE MAP

ABSTRACT

This study aims to detect potholes on road surfaces and display them on a map using a Kinect sensor. Initially, pothole detection was conducted with the YOLOv5 model, but due to an accuracy rate of only 70%, a more advanced model, YOLOv8, was adopted. With YOLOv8, a 75% success rate was achieved, improving pothole detection accuracy and processing speed. Through the developed system, the GPS coordinates of detected potholes are combined with depth data obtained from the Kinect sensor and marked on a map. The application, developed with .NET MAUI, allows users to view these detections in real time. Each detected pothole is prominently marked on the map, warning drivers as they approach its location. This application offers an effective pothole detection and monitoring solution that can assist in road maintenance operations and provide autonomous vehicles with information on pothole locations, preventing potential accidents and damage.

KEYWORDS: Image Processing, Yolov8, GPS, Kinect, Road, Pothole, Localization.

1. GİRİŞ

Yollar, insanlar için ulaşımın temelini oluşturur ve farklı yerler arasında bağlantı sağlar. Yolların boyutu, işlevlerine bağlı olarak değişir. Örneğin, otoyollar, yoğun trafik için tasarlanmış çok şeritli büyük yollardır. Ancak, şehir içindeki yollar daha küçük olup bir veya iki şeritten oluşur. Yollar, insanların günlük yaşamında hayati bir öneme sahiptir, bu nedenle işlevsel ve güvenli olmalarını sağlamak için periyodik bakım yapılmalıdır. Bir ülkedeki birçok yol, yolların sürekli olarak değerlendirilmesini zorlaştırır; bu nedenle, çukurların oluşumu tahmin edilemez. Yol yüzeyi bozulması, yolların kusurlarının ana sebebidir. Yol yüzeyi bozulması üç sınıfa ayrılabilir [1]: Bunlardan ilki yüzey deformasyonu (kayma, dalgalanma ve tekerlek izleri), ikincisi çatlaklar (yorgunluk, kenar bozulması ve çatlama) ve üçüncüsü yüzey dağılımasıdır (aşınma ve soyulma). Bu tür bozulmaların ana nedeni, çevresel koşulların ve trafik kaynaklı yol yüzeyi streslerinin bir kombinasyonu ile ilişkilendirilebilir. Çukurlar, dünya çapında bir sorundur ve her yıl hükümetlere ve vatandaşlara milyarlarca dolara mal olmaktadır [2,3]. Yıllık olarak 1,25 milyon kişi trafik kazaları nedeniyle hayatını kaybetmektedir ve bunların %34'ü yol çukurları ile ilişkilidir [4].

Görüntü işleme, bir veya birden çok görüntü verilerinden bilgisayar yazılımları kullanarak bir veya daha çok ana işlemciyle zaman sıralamasına göre çeşitli tekniklerle görüntülerin analiz edilmesi işlemidir [5]. Sensörden veriyi okuması görüntü işleme tekniği ile gerçekleşmektedir. Derin öğrenme, insan beyninin çalışma şekline göre genel hatlarıyla modellenen algoritmalar olan sinir ağlarının katmanları tarafından desteklenir. Büyük miktarlarda veri ile eğitim, sinir ağındaki nöronları konfigüre etmektir. Eğitildikten sonra yeni verileri işleyen derin öğrenme modelidir [6]. Derin öğrenme özellikle sınıflandırma, tanıma ve tespit için kullanılmaktadır. Son zamanlarda derin öğrenme algoritmaları pek çok alanda kullanılmakta ve günlük yaşamımızda pek çok teknolojik yapı içerisinde kullanılmaktadır. Yüksek başarımların elde edilmesi bu konuya eğilimi artırmıştır. Yapılan pek çok sınıflandırma, tanıma çalışmaları mevcuttur [7]. Verilerin eğitilip yeni veriler üzerinden tespit edilmesi derin öğrenme algoritmalarıyla gerçekleşmektedir.

Çalışmada kullanılan YOLOv5 (You Only Look Once) modeli, nesne tespiti yapmakta ve bir derin öğrenme modelidir. Bu model, bir görüntüdeki nesnelere hızlı ve etkili bir şekilde tanımlayabilir ve bunların yerlerini belirleyebilir. YOLOv5 (v6.0/6.1) Ultralytics tarafından geliştirilen güçlü bir nesne algılama algoritmasıdır [8]. Hız ve doğruluk açısından üstün performans sergileyen bu model, gerçek zamanlı uygulamalarda yaygın olarak kullanılmakta ve tercih edilmektedir. Gözetim sistemleri, otonom araçlar ve dronlarla yapılan izleme gibi çeşitli alanlarda kullanımı yaygındır. YOLOv5, n, s, m, l, x gibi 4 farklı model sunmaktadır [9]; bu sayede, kullanıcının ihtiyaçlarına göre daha hızlı veya daha doğru sonuçlar almak mümkün olmaktadır. Modelin PyTorch tabanlı olması, onu mevcut iş akışlarına kolayca entegre edilebilir hale getirmektedir. Eğitim süreci boyunca model, her döngüde verilerden öğrenmekte ve doğruluğunu arttırmaktadır. Eğitilen model, gerçek zamanlı görüntülerde veya kaydedilmiş videolarda nesnelere tespit edebilme yeteneğine sahiptir. Burada veri kümesi hazırlığı için COCO ve Pascal VOC gibi veri kümeleri kullanılmakta, resimler ve etiketler içermektedir. Model konfigürasyonu yaml dosyaları kullanılarak modelin yapısı ve hiperparametreleri tanımlanmaktadır. Eğitim için Python uzantılı eğitim dosyası bulunmaktadır. Eğitim sırasında hiperparametreler, öğrenme oranı (learning rate) ve devir(epoch) sayısı gibi ayarlar yapılmaktadır. Modelin doğruluğu, doğrulama ve test veri kümeleri üzerinde değerlendirilmektedir. Eğitilmiş model, yeni görüntüler üzerinde nesne tespiti yapmak için kullanılmaktadır. Model tespit edilen nesnelere sınıf etiketlerini, sınırlayıcı kutu (bounding box) koordinatlarını ve çukur olma olasılıklarını yüzde şeklinde döndürmektedir. Tahmin

sonuçları sunulmakta ve görüntü üzerinde tespit edilen nesnelere görselleştirilmektedir. Precision ve Recall modelin doğruluğu ve duyarlılığı ölçütleriyle değerlendirilmektedir. mAP, farklı eşik değerleri için modelin genel performansını ölçen bir metriktir. Elde edilen mAP değerleriyle doğruluk karşılaştırılması yapılmaktadır. Karışıklık matrisi (Confusion Matrix) modelin sınıflandırılması için kullanılır. Maksimum olmayan baskılama (Non-Maximum Suppression (NMS)) algoritması, bilgisayarla görme ve nesne tespiti gibi alanlarda sıkça kullanılan bir yöntemdir. NMS, özellikle aynı nesnenin birden fazla kez tespit edildiği durumlarda, en doğru tespiti seçmek ve gereksiz olanları elemek için kullanılır. Bu sayede, tespit edilen nesnelere daha güvenilir ve doğru sonuçlar vermesi sağlanır [10].

Diğer bir algoritma olan YOLOv8, önceki sürümlere göre daha optimize edilmiş bir mimari kullanır. Bu optimizasyonlar, modelin daha hafif ve daha hızlı çalışmasını sağlar ancak doğruluğundan ödün vermez. Model, görüntüdeki nesnelere daha doğru bir şekilde algılayabilmek için bağlam bilgisine daha fazla önem vermektedir. Modelin özellikle kalabalık veya karmaşık sahnelerde daha iyi performans göstermesini sağlar. Nesne algılama başlığında iyileştirmeler yaparak, algılanan nesnelere sınıflandırılmasında ve konumlandırılmasında daha yüksek doğruluk elde edilmektedir. YOLOv8, güvenlik kameralarında gerçek zamanlı olarak nesne ve insan algılama için kullanılabilir. Hızlı tepki süresi, bu tür uygulamalar için idealdir. Otonom sürüş sistemlerinde, yol üzerindeki araçlar, yayalar ve diğer nesnelere hızlı bir şekilde algılanmaktadır. YOLOv8, bu tür sistemlerin temel bir parçası olabilir. Fabrikalarda ve üretim hatlarında, nesnelere otomatik olarak algılanması ve sınıflandırılması için YOLOv8 kullanılabilir. Üretim süreçlerinin otomasyonunu ve verimliliğini arttırmaktadır. Gerçek zamanlı uygulamalar için son derece hızlıdır. Tek geçişte nesne algılama yapabilmesi, bu algoritmayı birçok senaryoda ideal kılmaktadır. YOLOv8 hem hız hem de doğruluk açısından diğer birçok nesne algılama algoritmasından daha iyi performans gösteren bir nesne algılama algoritmasıdır [11]. Bu algoritma, karmaşık ve yoğun sahnelerde bile doğru nesne algılama sağlamaktadır. Farklı uygulamalara kolayca uyarlanabilir. Modelin mimarisi, çeşitli veri ve görevler üzerinde etkili olmasını sağlamaktadır. Geliştiriciler ve araştırmacılar için kullanım kolaylığı sağlayan bir yapıya sahiptir. YOLOv8, derin öğrenme ve bilgisayarla görme alanındaki en son gelişmeler üzerine inşa edilmiştir ve hız ve doğruluk açısından benzersiz bir performans sunar [12]. Hem hız hem de doğruluk açısından önemli avantajlar sunar ve geniş bir uygulama yelpazesi için uygundur. YOLO'nun gelişiminde önemli bir adım olan bu model, nesne algılama ve ilgili görevlerde yeni bir standart belirlemektedir.

YOLOv8, COCO gibi geniş ve zorlu veri kümelerinde, daha yüksek mAP 0,5:0,95 değerlerine ulaşarak birçok modelin üzerinde bir performans sergilemiştir. Otonom araçlar ve trafik izleme çalışmalarında, IoU eşiği 0,5 olan mAP (mean Average Precision) genellikle 0,7 ile 0,75 aralığında gözlemlenir. Bu doğruluk seviyesi, yaya ve araç takibi gibi nesne algılama tabanlı görevlerde ortaya çıkar ve otonom sürüş bağlamında nesne algılama ve sahne anlama görevlerinin değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmakta olup, model geliştirme ve doğrulama için kritik öneme sahiptir [13, 14]. COCO gibi karmaşık veri kümelerinde bu ölçüt genellikle 0,4 civarındadır.

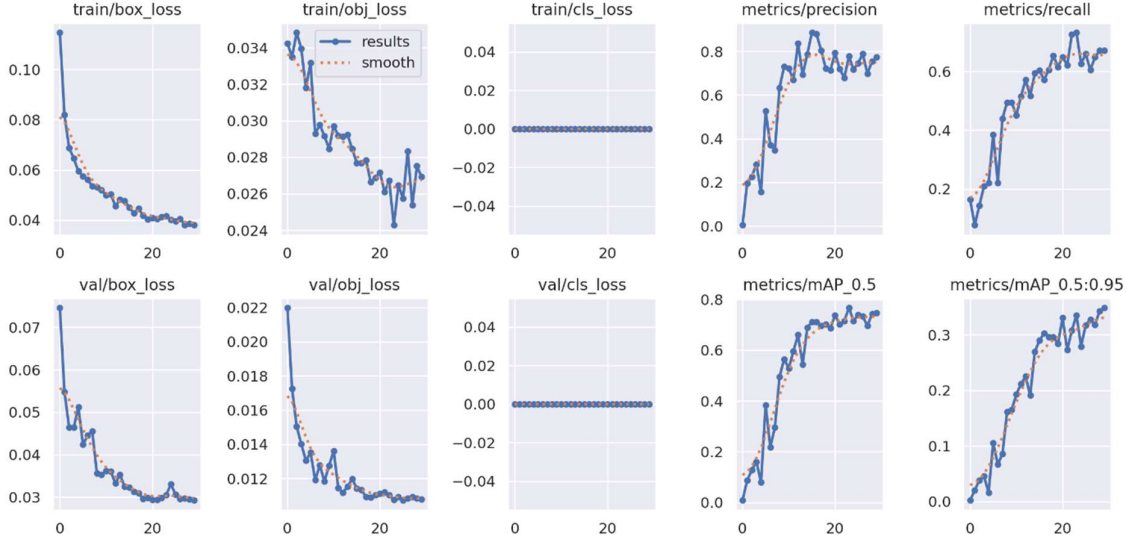
Görüntü işleme için Kinect v2 sensöründen renk ve derinlik verileri elde edilebilir. Derinlik verileri, her pikselin sensörden olan mesafesini göstermekte ve bu mesafeyi kullanarak yüzeydeki düzensizlikler tespit edilebilmektedir. Bir çukur tespiti için, belirli bir alandaki derinlik değerlerindeki ani değişimler aranmaktadır. Kenar algılama teknikleri kullanılarak, yüzeydeki keskin değişiklikler tespit edilebilmektedir. Belirli bir eşik değeri belirlenerek, bu eşik üzerinde olan alanlar çukur olarak sınıflandırılmaktadır. Bu işlem, derinlik verilerindeki büyük farklılıkları tespit ederek yapılabilmektedir. Daha karmaşık bir tespit sistemi oluşturulmak istenirse, YOLO veya başka bir derin öğrenme modeliyle yüzeydeki çukur ve düzensizlikleri tanıyacak bir model eğitebilmektedir. Çukur tespit edilen alanlar renkli olarak işaretlenip 3D bir model üzerinde gösterilmektedir. Bu model, kullanıcının yüzeydeki anormallikleri kolayca görmesini sağlamaktadır. Derinlik sensörü sayesinde yol yüzeylerinden gelen üç boyutlu derinlik bilgileri yüksek doğrulukla elde edilmektedir. Çukur tespiti, yüzeydeki yükseklik farklarının algılanmasını gerektirdiği için Kinect'in bu özelliği, yol üzerindeki bozulmaları belirlemek için idealdir. Kinect kızılötesi sensörleri kullanır ve yaklaşık derinlik ölçüm doğruluğuna sahiptir [15]. YOLO gibi nesne algılama algoritmalarıyla işlenen derinlikli ve renkli görüntüler, yüzeydeki bozukluklar ve çukurların hassas bir şekilde tanımlanmasını sağlamaktadır. YOLOv8 gibi gelişmiş modeller kullanılarak daha hızlı ve isabetli tespitler yapılabilmektedir. Ayrıca, Kinect sensöründen gelen bu veriler GPS verileriyle birleştirilerek, tespit edilen çukurların harita üzerinde gerçek zamanlı olarak gösterilmesi sağlanabilmektedir. Bu tür bir sistem hem yollardaki sorunların tespiti hem de izlenmesi açısından kullanışlıdır. Kinect v2 sensörü USB girişli aparatıyla birleştirilmektedir. SDK Browser v2.0 programı indirerek bilgisayarın Kinect v2'yi görmesi sağlanmaktadır. Kinect Configuration Verifier menüsünden Kinect v2'nin bağlanıp bağlanmadığı görülmektedir.

Arduino ile GPS modülü kullanımı, çalışmalarda konum verilerini gerçek zamanlı olarak elde etmek için yaygın bir yöntemdir. GPS (Global Positioning System) modülleri, dünya üzerindeki konum, hız ve zaman bilgilerini uydu sinyalleri aracılığıyla sağlar. Arduino ile bir GPS modülü entegre edildiğinde, bu veriler kullanılarak çeşitli uygulamalar geliştirilebilir. Örneğin, harita üzerinde izleme, rotalama ve konum tabanlı tetikleme sistemleri [16] gibi sistemlerde kullanılmaktadır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışma kapsamında Kaggle'da bulunan Pothole Detection [17] veri seti kullanılmıştır. Bu veri setinde çukur bulunan 665 adet resim bulunmaktadır. Veri setindeki resimlerde bulunan çukur verileri sınırlayıcı kutular olarak ayarlanarak eğitim (train) ve test dosyaları oluşturulmuştur. Böylelikle 665 resim bulunan veri seti bir xml dosyası olarak kaydedilmektedir. Dosyalar oluşturulduktan sonra sonuçların görselleştirilmesi için Google Colab'da *yolo_training* dosya dizini Drive'da bulunması için değiştirilmektedir. Git clone ile github'daki YOLOv5 github deposunu klonlamaktadır. *Requirements.txt* dosyası içinde gerekli bulunan numpy, pandas, matplotlib, opencv-python, jupyter, labelImg kütüphaneleri pip install ile indirilmektedir. Python betiği olan *train.py* çalıştırılmakta ve belirli parametreler sağlanmaktadır. Veri için *data.yaml* dosyası eğitim ve doğrulama veri yolları gibi özellikleri içeren bir yapılandırma dosyasını tanımlamaktadır. Ağırlıklar (Weights) kısmı için önceden eğitilmiş ağırlıkları tespit etmektedir. Aynı anda eğitilmesi gereken veri sayısı (batch size) 8 olarak belirlenmiş, eğitim sırasında her adımda 8 görüntü işlenmiştir. 640*640 piksel olması için img 640 olarak boyutlandırılmıştır. Model, eğitim sırasında veri kümesi üzerinde 30 devir (epoch) olacak şekilde ayarlanmış ve her bir veri kümesi örneği 30 kez işlenmiştir. Bunun nedeni modelin eğitim sürecinde yeterli bir öğrenme kapasitesine ulaşmasını sağlarken aynı zamanda aşırı öğrenme riskini en aza indirmek için yapılmaktadır. Aşırı öğrenme, modelin eğitim kümesindeki örüntüler yerine gözlemleri öğrenmesi durumunda ortaya çıkmaktadır. Bu durumda oluşturulan model eğitim aşamasında kullanılan veri kümesini öğrenir, ancak yeni gelen gözlemler için başarılı bir tahmin yapamaz. Genelde aşırı öğrenme modelleri eğitim aşamasını küçük hata oranı ile tamamlarken, test aşamasında büyük bir hata oranı ile tahmin etmektedir [18]. Veri seti boyutu ve modelin karmaşıklığı dikkate alınarak, devir sayısının doğruluk ve işlem süresi açısından optimum denge sağladığı gözlemlenmektedir. Eğitimin

sonunda, algoritmanın performansını gösteren bir *results.png* dosyası oluşturulmuştur. Şekil 1’de YOLOv5 kullanılarak eğitilen modelin performans grafiği sunulmuştur.

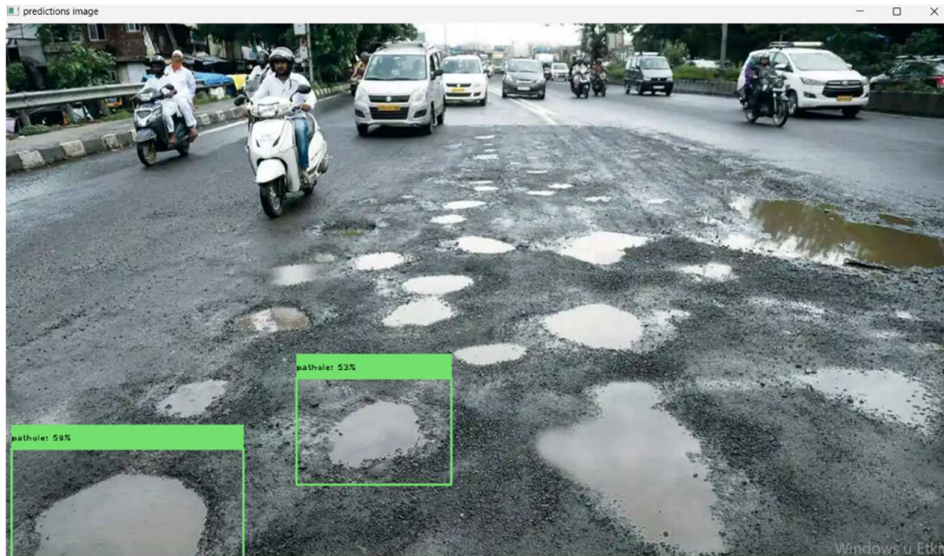


Şekil 1. YOLOv5 kullanılarak eğitilen modelin performans grafiği

Jupyter Notebook’a tekrar dönüldüğünde cv2, numpy, os, yaml, SafeLoader kütüphaneleri içe aktarıldıktan sonra *data.yaml* dosyasını açmak için open metodu kullanılmaktadır. OpenCV’nin derin sinir ağı (DNN) modülü kullanılarak bir YOLO modeli yüklenmekte ve yapılandırılmaktadır. YOLO modeli ONNX formatında yüklenmektedir. cv2.dnn.readNetFromONNX OpenCV’nin kendi DNN arka kısmında (backend) kullanılmaktadır. Çalışmada, DNN_BACKEND_OPENCV Modeli CPU üzerinde çalıştırılan DNN_TARGET_CPU ile görüntüyü yüklemekte ve orijinalini bozmadan kopyasını oluşturmaktadır. YOLO modeline uygun bir formatta girdi oluşturmaktadır. YOLO modeli, bu girdi ile nesne tespiti yapmakta ve sonuçlar döndürülmektedir. YOLO modelinden elde edilen tahminler çok boyutlu bir dizi olarak dönmektedir. İlk tahmin seti preds[0] olarak alınmakta ve tespit (detections) değişkenine atanmaktadır. Bu listeler, sırasıyla sınırlayıcı kutuların koordinatlarını, güven puanlarını ve sınıf kimliklerini saklamak için kullanılmaktadır. Giriş görüntüsünün genişlik (image_w) ve yüksekliği (image_h) hesaplanmaktadır. YOLO modeli 640x640 piksel girdi beklemekte, bu yüzden çıktılar bu etkenlerle orijinal görüntü boyutlarına ölçeklenmektedir. Bu tahmin edilen nesne için YOLO modelinin verdiği güven puanıdır. Bu sadece güven puanı 0,4’den büyük olan tahminlerin dikkate alınmasını sağlamaktadır. Bu satırlar, en yüksek sınıf skorun ve bu skoru alan sınıfın kimliğini belirlemektedir. Sadece sınıf

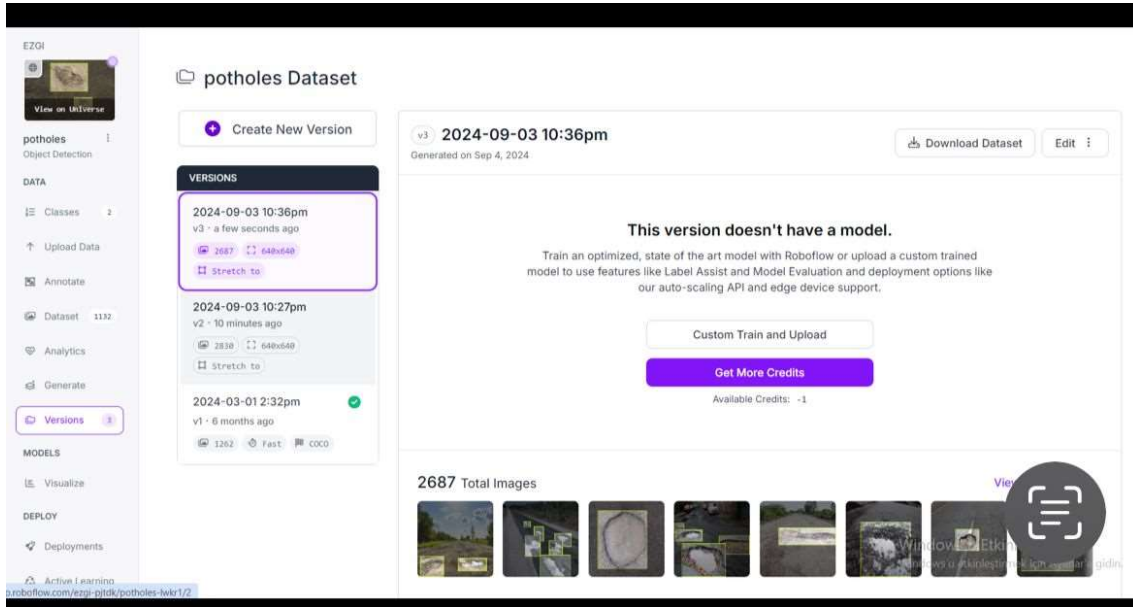
skoru 0,25'den daha büyük olan tahminler değerlendirilmektedir. Bu tahmin edilen nesnenin merkez koordinatlarını (c_x , c_y), genişliğini (w) ve yüksekliğini (h) çıkarmaktadır. Nesne tespiti sürecinde sınırlayıcı kutuların koordinatlarını ve güven puanlarını belirlemektedir. Tespit edilen nesnelerin genişlik ve yükseklik değerleri görüntü boyutlarına göre ölçeklendirilir. Maksimum olmayan baskılama (NMS) algoritması ile kesişen kutular arasında en güvenilir olanı seçmektedir. Bu işlemde, minimum güven puanı ve kesişme eşik değerleri sırasıyla 0,25 ve 0,45 olarak belirlenmiştir. Kalan sınırlayıcı kutuların koordinatları, güven puanları (yüzde formatında) ve sınıf kimlikleri alınır. Sınıf kimlikleri, etiketler (labels) listesi sayesinde sınıf adlarına dönüştürülmektedir. Önce orijinal görüntüyü, ardından YOLO ile yapılan tahminlerin işlenmiş olduğu görüntüyü ekranda ayrı pencerelerde gösterir. Kullanıcı bir tuşa bastığında, her iki pencere de kapatılmaktadır. Bu, nesne tespiti yapılan görüntüyü görsel olarak incelemek için kullanılmaktadır.

Yolo tahminleri (predictions) tamamlandıktan sonra artık fotoğraf üzerinden nesne tespiti yapılabilmektedir. Başka bir Jupyter sayfasında *yolo_predictions* tanımladıktan sonra *YOLO_Pred* adlı bir sınıfın bir örneği oluşturulmaktadır. Bu örnek, YOLO modelini *best.onnx* dosyasını ve *data.yaml* dosyasını kullanarak nesne tespiti yapacak şekilde oluşturulmaktadır. OpenCV kullanarak çukur resmini ekranda gösterir. YOLO modelini kullanarak bir görüntü üzerinde nesne tespiti yapar ve tespit edilen nesnelere içeren görüntüyü ekranda göstermektedir. Şekil 2'de YOLOv5 performansı çıktısı gösterilmektedir.



Şekil 2. YOLOv5 performansı çıktısı

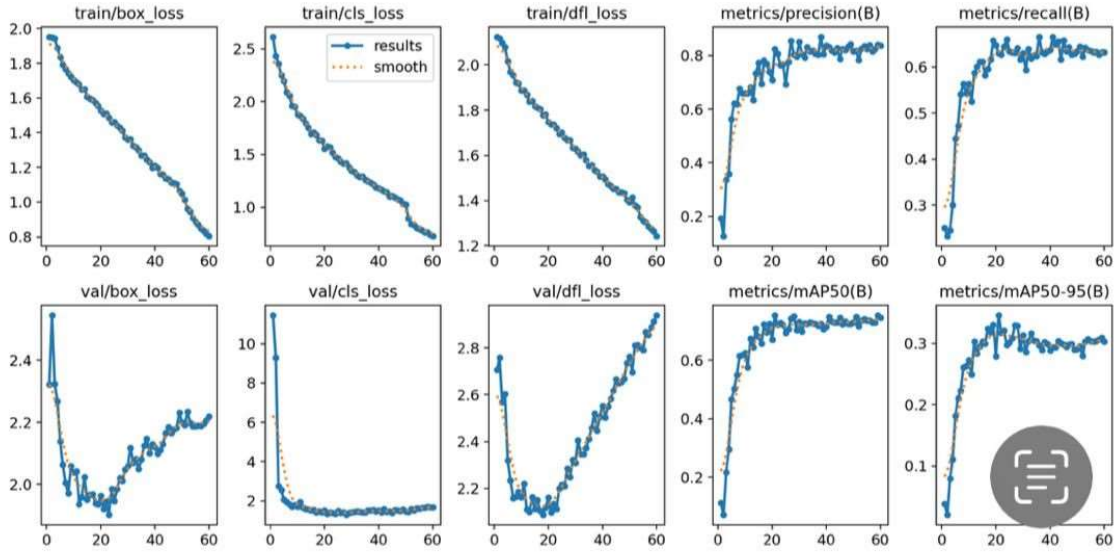
YOLOv8 ile yapılan nesne tespitinde ise, öncelikle bir veri seti oluşturulması ve bu veri setinin eğitim ve test olarak ayarlanması için farklı bir program kullanılmıştır. RoboFlow'dan görüntüleri etiketlemek için RoboFlow'un sunduğu anotasyon aracı kullanılmaktadır. Yüklenen her görüntü için sınırlayıcı kutular çizilmektedir. Şekil 3'de RoboFlow veri seti oluşturma gösterilmektedir. Tüm görüntülerini etiketledikten sonra, RoboFlow verileri eğitim ve test olarak ayırma fırsatı verir. Sağ üstteki "Oluşturma" (Generate) butonuna tıklanır. Eğitim, onaylama ve test veri setlerinin yüzdelerinin belirlenmesini sağlar. Standart olarak %70 eğitim, %20 validasyon, %10 test önerilir. Bu oranlar ihtiyaca göre ayarlanabilir. Böylelikle RoboFlow, eğitim ve test dosyaları oluşturulmuş bir kod verir.



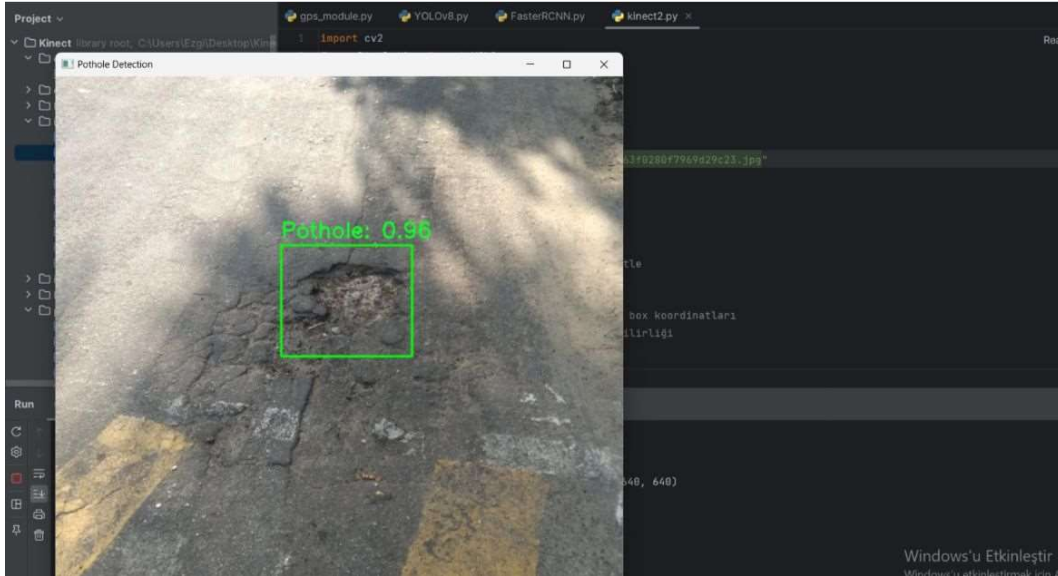
Şekil 3. RoboFlow veri seti oluşturma

Bu kod Google Colab'da YOLOv8 ile çukur tespiti yaparken kullanılmaktadır. Google Colab içerisinde *best.pt* dosyası için şu adımlar izlenir: *yolov8training* adlı jpynb dosya uzantılı dosya için öncelikle işletim sistemini (os), glob, Image, display gibi kütüphaneleri tanımlamak gerekmektedir. Pip indirme (install) ile YOLOv8 için Ultralytics indirilmektedir. Ultralytics tanımlandıktan sonra RoboFlow içerisinde oluşan kod burada indirilmektedir. YOLO V8'in "orta" (medium) boyutlu modeli kullanılarak çukur tespiti için bir nesne tespiti modeli eğitilir. Model, */content/potholes/data.yaml* dosyasında tanımlı olan veri seti üzerinde 120 devir boyunca eğitilmekte ve bu sırada görüntüler 640x640 piksel boyutunda işlenmektedir. Eğitim tamamlandıktan sonra, modelin performansı değerlendirilerek çukur tespitinde

kullanılabilmektedir. Daha sonrasında oluşan results.png dosyasına ulaşılabilir. Şekil 4’de YOLOv8 eğitim performans grafiği gösterilmektedir. Şekil 5’de YOLOv8 ile eğitildikten sonraki performans çıktısı gösterilmektedir. Önemli kısım ise *runs* dosyasının içerisinde oluşan *best.pt* dosyasıdır ve bu dosya YOLO modeli olarak çalışmada kullanılmaktadır.



Şekil 4. YOLOv8 eğitim performansı grafiği



Şekil 5. YOLOv8 performans çıktısı

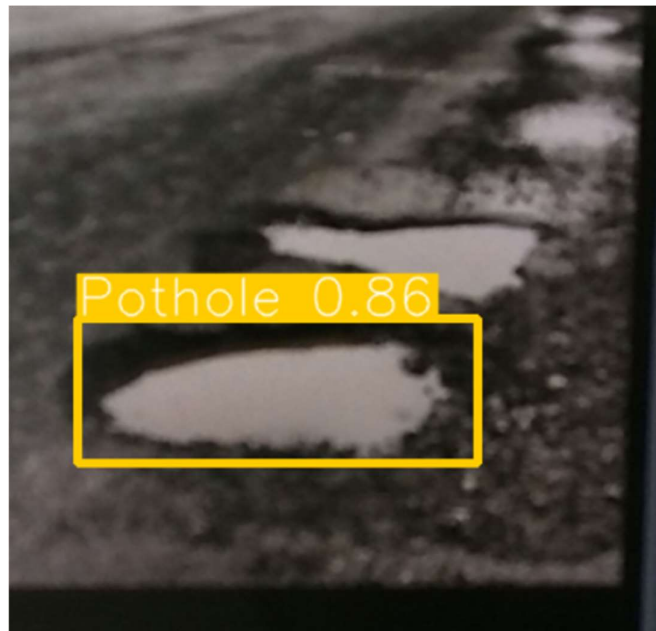
Çalışmada üç farklı algoritma kullanılarak incelenmiştir. Sonuçlara göre hız ve doğruluk unsurları karşılaştırılarak en uygun algoritma tespit edilmiştir.

PyKinectRuntime ile Kinect sensörüyle etkileşim sağlanır ve renk ile derinlik kareleri alınmaktadır. folium kütüphanesi, çukur konumlarını gösteren haritalar oluşturmak için kullanılmaktadır. *read_gps_data* ve *plot_location*, GPS verilerini işlemek için kullanılan özel fonksiyonlardır. Kinect sensörü hem renk hem de derinlik karelerini yakalamak için başlatılmaktadır. Daha sonra PyTorch Hub kullanarak özel bir YOLOv5 modeli yüklenmiştir. Bu modelin amacı, özellikle çukurları tespit etmektedir. *pothole_data* listesi, tespit edilen çukurların GPS koordinatlarını ve görüntü yollarını saklamak için kullanılmaktadır.

Tespit edilen çukurların görüntülerini kaydetmek için *pothole_images* adlı bir dizin oluşturulmaktadır. GPS verisi, ayrı bir kısımda sürekli olarak okunmaktadır. Bu sayede programın ana döngüsü GPS verisi alımı nedeniyle engellenmez. Çalışmada, Kinect sensöründen gelen yeni bir renk ve derinlik karesi olup olmadığı sürekli kontrol edilmektedir. Eğer yeni bir kare varsa renk çerçevesi alınmakta ve YOLOv5 modelinde işlenmektedir. Model, çukurları tespit ettiğinde çukurun konumu, derinlik bilgisi ve güvenilirlik değeri hesaplanmaktadır. Çukurun görüntüsü kaydedilmekte ve GPS koordinatları ile *pothole_data* listesine eklenmektedir. Program ayrıca bu kareleri ekranda görüntülemekte ve kullanıcı 'q' tuşuna bastığında döngüyü durdurmaktadır. Program sona erdiğinde Kinect serbest bırakılmakta ve OpenCV kütüphanesi kapatılmaktadır. Eğer *pothole_data* listesinde veri varsa, bu veri ile bir harita oluşturulmaktadır. folium.Map ile tespit edilen ilk çukurun merkez olarak alındığı bir harita oluşturulmaktadır. Her çukurun bulunduğu konuma sembol olarak bir işaretleyici eklenmekte ve üzerine tıklanınca çukurun görüntüsü gösterilmektedir. Harita *pothole_map.html* dosyasına kaydedilmektedir. Bilgisayar ile Arduino arasında seri bağlantı kurulmaktadır. GPS verileri kullanılarak harita üzerinde bir işaretleyici (marker) yerleştirilmektedir. ser.readline() ile Arduino'dan gelen bir satırlık veri okunur ve bu veri önce UTF-8 formatında kod çözücü (decode) fonksiyonuyla temizlenmektedir. Eğer satır "Enlem:" ile başlıyorsa, bu satırda enlem (latitude) değeri bulunur ve lat değişkenine atanmaktadır. Eğer satır "Boylam:" ile başlıyorsa, bu satırda boylam (longitude) değeri bulunur ve lng değişkenine atanmaktadır. Boylam değeri bulunduğunda, lat ve lng ikilisi geri döndürülmektedir. Verilen enlem (lat) ve boylam (lng) değerlerine göre bir harita oluşturulmaktadır. folium.Map fonksiyonu, haritayı verilen koordinatlarda merkezlemekte ve bir işaretleyici eklemektedir. Harita, *gps_location.html* adlı bir HTML dosyası olarak kaydedilmektedir. Bu dosya, tarayıcıda

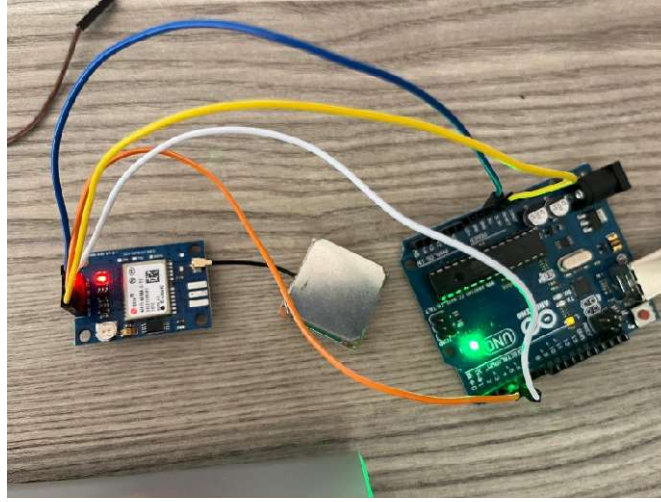
açıldığında GPS konumunu göstermektedir. Program çalıştırıldığında sürekli okunan bir GPS verisi haritaya yerleştiren bir döngü başlatılmaktadır. GPS verisi her okunduğunda enlem ve boylam konsola yazdırılmakta ve ardından bu konumun haritası güncellenmektedir.

Tespit edilen çukurun üzerine dikdörtgen bir şekil çizilmekte ve derinlik bilgisi gösterilmektedir. Çukurun bulunduğu bölgenin görüntüsü kaydedilmektedir. Eğer GPS verisi mevcutsa, bu koordinatlar *pothole_data* listesine kaydedilmektedir. Ana döngü sona erdiğinde, tespit edilen çukur verileri kullanılarak bir harita oluşturulmaktadır. Harita, tespit edilen ilk çukurun koordinatları merkez alınarak başlatılmaktadır. Tüm çukur konumları, haritada işaretleyiciler olarak gösterilmekte ve bu işaretleyicilere tıklanarak çukur görüntüleri görülebilmektedir. Harita, "*pothole_map.html*" dosyası olarak kaydedilmekte ve eğer bu işlem başarılı olursa, "Harita başarıyla kaydedildi." mesajı yazdırılmaktadır. Eğer herhangi bir sorun oluşursa, hata mesajı görüntülenmektedir. Kinect sensöründen gelen görüntüler kullanılarak çukur tespiti yapılmakta ve GPS verisiyle birlikte bu tespitleri harita üzerinde göstermektedir. Şekil 6'da program çalıştırıldığında Kinect sensöründen aldığı veri üzerinden yapılan çukur tespiti gösterilmektedir. Sonuç olarak, tespit edilen çukurların haritada görselleştirildiği bir HTML dosyası oluşturulmaktadır. YOLOv8 ile oluşturulan kod ile program hem hızlı hem de doğruluk açısından YOLOv5'den daha yüksektir. Bu yüzden geliştirilen sistemde tercih sebebi olmuştur.



Şekil 6. Kinect sensöründen alınan görüntüden çukur tespiti

Arduino Uno, u-blox 8M GPS modülü ve jumper kabloları kullanılarak oluşturulan devrede, GPS modülü ile Arduino arasındaki seri iletişim, dijital pinler üzerinden sağlanmaktadır. GPS modülünün TX pini Arduino'nun pin 4'üne, RX pini ise pin 3'e bağlanmaktadır. Şekil 7'de oluşturulan GPS modülü devresi gösterilmektedir. SoftwareSerial kütüphanesi kullanılarak yazılımsal bir seri port oluşturulmasıyla gerçekleştirilmektedir.

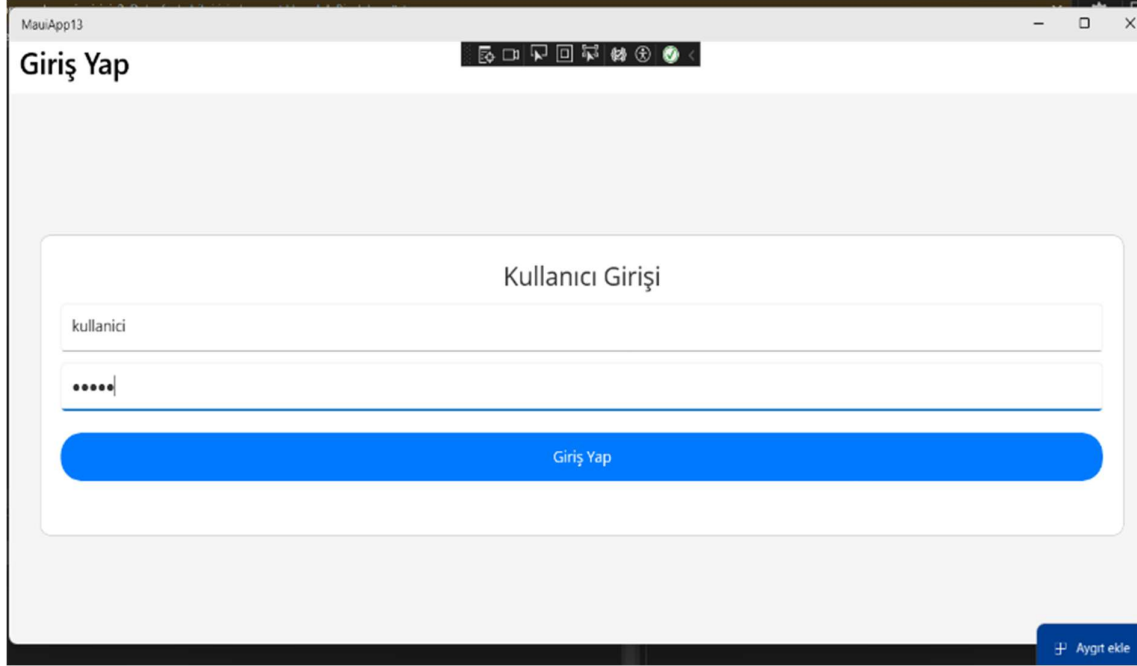


Şekil 7. GPS modülü devresi

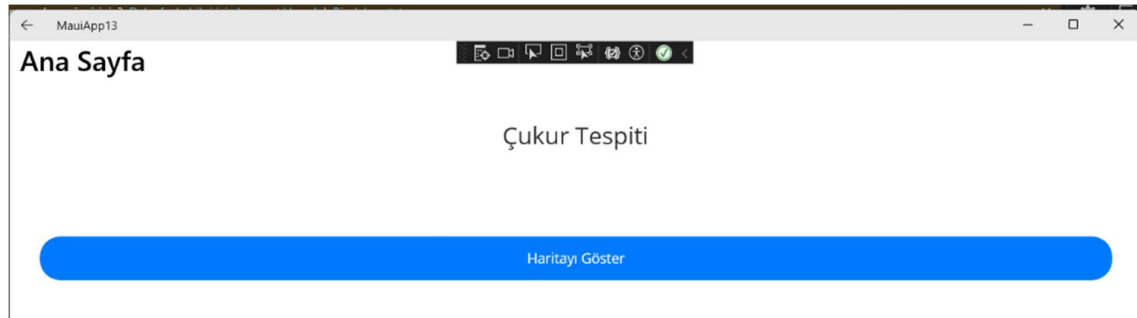
Kod içerisinde ilk olarak SoftwareSerial ve Adafruit_GPS kütüphaneleri kullanılarak GPS modülü tanımlanmaktadır. Setup fonksiyonunda, Arduino ve GPS modülü arasında 9600 baud hızında iletişim başlatılmakta, GPS'in her saniyede 1 Hz veriyi günceller ve haberleşme hızınının 9600 baud(bit/s) olması sağlanmaktadır. Ana döngüde ise GPS modülünden gelen veri sürekli olarak okunmakta ve yeni bir NMEA cümlesi alındığında bu cümleler ayrı ayrı enlem ve boylamın koordinatlarını vermektedir. Elde edilen bu veri ile, Arduino'nun seri monitöründe gerçek zamanlı konum bilgileri görüntülenmektedir. Bu sayede, Arduino ile GPS modülü arasındaki seri haberleşme başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiş olmakta ve koordinat bilgileri çalışmalarda kullanılabilir hale getirilmektedir. GPS kodu Arduino IDE'de çalıştırıldıktan sonra GPS modül dosyası Pycharm üzerinden çalışabilir hale gelmektedir.

Sonuçlardan yola çıkarak kod içerisinde sadece YOLOv8 kullanımı ile uygulamada haritada gösterilmesi için .NET MAUI programı kullanılmaktadır. Bu kısımda bir uygulama ile kullanıcı giriş ve şifre girilerek 'Giriş Yap' sayfası oluşturulmaktadır. Şekil 8'de kullanıcı ve şifrenin girilerek giriş yapılan kullanıcı girişi sayfası gösterilmektedir. Şekil 9'da giriş yapıldıktan sonra çıkan anasayfa görünmektedir. Haritayı göster butonuna basıldığında

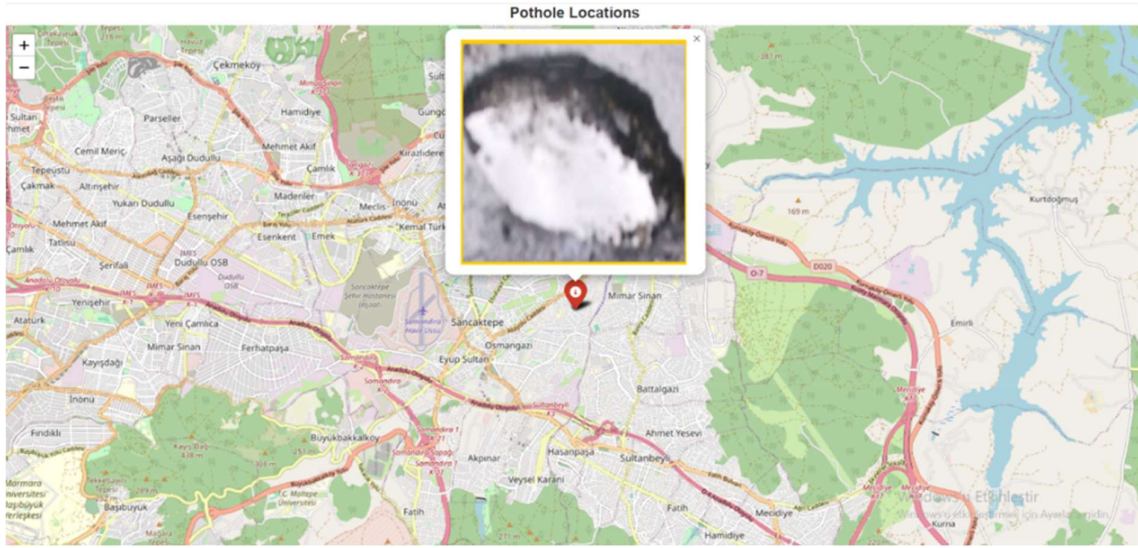
pothole_map.html dosyası devreye girmektedir. Şekil 10'da haritayı göster butonuna basıldığında ekrana gelen *pothole_map.html* sayfası gösterilmektedir.



Şekil 8. Uygulamada kullanıcı girişi sayfası



Şekil 9. Uygulamanın anasayfası

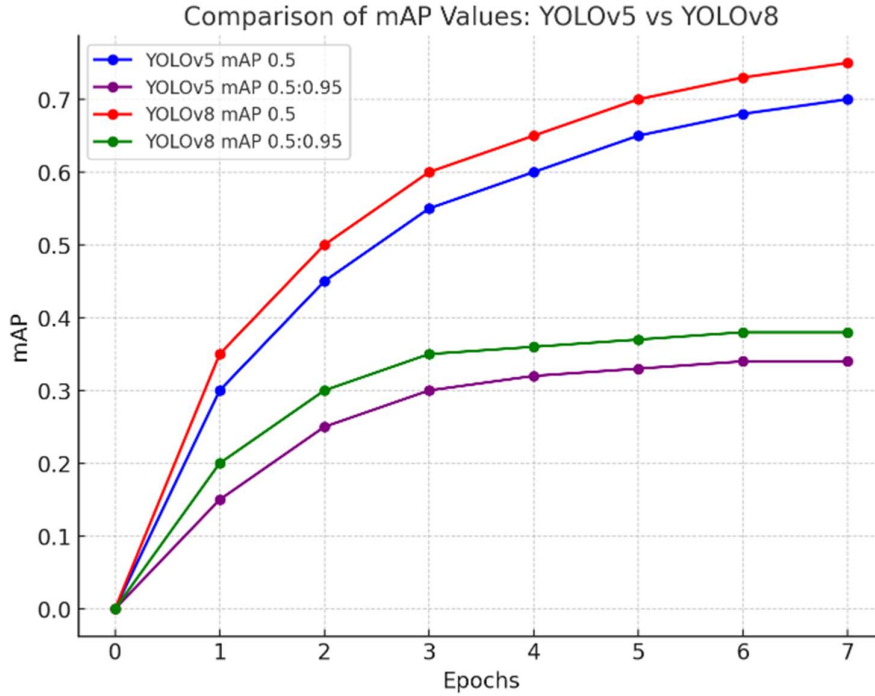


Şekil 10. Haritayı göster sayfası (pothole_map.html)

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

YOLO modelinin V5 ve V8 sürümleri hem doğruluk hem hız açısından önemli gelişmeler göstermektedir. YOLOv5, hız ve doğruluk arasında dikkat edici bir uyum sağlamaktadır. Özellikle düşük bellek tüketimi ve hızlı işlem süresi sayesinde gerçek zamanlı uygulamalarda etkili bir performans sergilemiştir. YOLOv5'in çeşitli versiyonları (Küçük, Orta, Büyük) farklı hız ve doğruluk sunarken kullanıcının gereksinimlerine göre özelleştirilen çözümler sunmaktadır. YOLOv8, daha gelişmiş bir mimariye ve daha iyi öğrenme stratejisine sahip olup hem hız hem de doğruluk açısından önemli avantajlar sunmaktadır. YOLOv8'in yüksek çözünürlük desteği, daha karmaşık nesne tanıma görevlerinde yüksek doğruluk oranlarını sağlarken, optimize edilmiş hesaplama stratejileri sayesinde işlem hızını da artırmaktadır. Bu sürüm, büyük veri seti ile eğitim yapabilme kapasitesine sahip olup bu sayede daha geniş ve kapsamlı bir yetenek sunmaktadır. İki algoritma arasında karşılaştırmalar yapılabilmektedir. YOLOv8, YOLOv5'e göre daha güncel bir model olduğundan, genel olarak daha hızlı öğrenme, daha düşük kayıplar ve daha yüksek performans metrikleri göstermektedir. Eğitim eğrilerinin eğilimi, YOLOv8'in daha yüksek doğruluk ve tutarlılıkta daha iyi öğrenme gösterdiği görülmektedir. YOLOv5 ise hala güçlü bir model olmasına rağmen, bazı kayıp metriklerinde daha yavaş iyileşme ve kesinlik/duyarlılık metriklerinde daha fazla dalgalanma göstermektedir. YOLOv5'in özellikle daha karmaşık veri setlerinde YOLOv8 kadar hızlı uyum

sağlamayacağı düşünülmektedir. Şekil 11’de, çalışmada kullanılan YOLOv5 ve YOLOv8 algoritmalarının yapılan çukur tespitlerinden elde edilen mAP değerlerini karşılaştıran grafik gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre YOLOv8, her iki mAP metriğinde de YOLOv5’den daha iyi performans gösterildiği görülmektedir. mAP 0,5 için YOLOv8, özellikle sonlara doğru daha yüksek bir performans sunarak 0,75’i geçerken, YOLOv5 yaklaşık 0,7’de kalmaktadır. mAP 0,5:0,95 için ise YOLOv8 yine daha iyi sonuçlar vermekte ve yaklaşık 0,38’e ulaşılmaktadır. YOLOv5 ise yaklaşık 0,34’de kalmaktadır.



Şekil 11. YOLOv5 ve YOLOv8 mAP değerlerinin karşılaştırılması

Yapılan literatür taramasında daha önce bu veriseti ile sınıflandırma yapan bir çalışma tespit edilememiştir. Bu sebeple kullanılan iki algoritma sonucu hazırlanan karşılaştırma tablosu Şekil 12’de sunulmuştur. YOLOv8, %75 doğruluk YOLOv5’e %70 kıyasla daha iyi bir doğruluk sağlamaktadır. Duyarlılık (Precision) açısından YOLOv5 0,68 değerini gösterirken, YOLOv8 0,72 değeriyle yanlış pozitif tespitleri daha fazla azaltmıştır. Hassasiyet (Recall) metriğinde YOLOv8, 0,70 ile YOLOv5’in 0,65 değerine göre daha fazla doğruluk tespit gerçekleştirmiştir. F1 Score’da YOLOv8, 0,71 ile dengeli bir performans sunarken YOLOv5’in skoru 0,67’de kalmıştır. Ayrıca, mAP (0,5) ve mAP (0,5:0,95) değerlerinde YOLOv8, sırasıyla 0,75 ve 0,38 sonuçlarıyla YOLOv5’in (0,7 ve 0,34) üzerine

çıkmıştır. İşlem süresi açısından bakıldığında, YOLOv8'in 0,9 saniyelik süresi, YOLOv5'in 1,2 saniyelik süresine göre daha hızlıdır. Genel olarak, YOLOv5 hızlı ve bellek dostu bir model olmasına rağmen doğruluğu sınırlıdır. Buna karşın YOLOv8, daha yüksek hız, doğruluk ve optimizasyon sergilerken daha üstün bir performans göstermektedir.

Model/Yöntem	Doğruluk (Accuracy)	Precision (Duyarlılık)	Recall (Hassasiyet)	F1 Score	mAP (0.5)	mAP (0.5:0.95)	İşlem Süresi (s)	Yorum
YOLOv5	%70	0.68	0.65	0.67	0.7	0.34	1.2	Hızlı ve bellek dostu ancak doğruluk sınırlı
YOLOv8	%75	0.72	0.70	0.71	0.75	0.38	0.9	Yüksek doğruluk, daha hızlı ve optimize

Şekil 12. Algoritmalar karşılaştırılması ve yorumu

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

YOLOv8, hem mAP 0,5 hem de mAP 0,5:0,95 metriklerinde YOLOv5'ten daha iyi bir doğruluk sunmaktadır. YOLOv8'in geliştirilmiş mimarisi veya optimizasyonları sayesinde daha başarılı bir tespit performansı sergilediği görülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre YOLOv8, her iki mAP metriğinde de YOLOv5'den daha iyi performans göstermektedir. mAP 0,5 için YOLOv8, özellikle sonlara doğru daha yüksek bir performans sergileyerek 0,75'i geçerken, YOLOv5 yaklaşık 0,7'de kalmaktadır. mAP 0,5:0,95 için ise YOLOv8 yine daha iyi sonuçlar vermekte ve yaklaşık 0,38'e ulaşmaktadır. YOLOv5 ise yaklaşık 0,34'de kalmaktadır. Bu grafikte görüldüğü gibi YOLOv8'in 0,38 mAP 0,5:0,95 seviyesine ulaşması, endüstri standardına yakın bir performans sunduğu gösterilmektedir.

Bu karşılaştırma, YOLOv8'in nesne tespiti performansını doğruluğunu ölçmek için kullanılan farklı IoU eşiklerinde daha iyi doğruluk sağladığını göstermektedir. Bu sebeple YOLOv8 daha yüksek doğruluk göstermesinden dolayı geliştirilen çukur tespiti programına YOLOv8 entegre edilmiştir. YOLOv5 algoritmasının da doğruluk ve hız gibi unsurları

değerlendirilmiştir. Pycharm ortamında oluşturulan YOLOv5 ve YOLOv8 algoritmaları kullanılarak çukur tespitleri yapılabilmektedir. Sonuç olarak, YOLOv8'in gelişmiş teknolojisi, yüksek doğruluk ve hız dengesi sağlamakla birlikte, YOLOv5'in etkili ve sağlam performansı, belirli uygulamalar için hala tercih edilen bir seçenek olabilmektedir. YOLOv8'in avantajları, özellikle yüksek doğruluk gerektiren ve büyük veri setine ihtiyaç duyan uygulamalarda öne çıkmaktadır. YOLOv5 için önerilen durum daha fazla verinin kullanımı ile ancak belirli bir doğruluğa erişilebilmektedir. Fakat daha geliştirilmiş bir model olan YOLOv8'i kullanmak hem doğruluk hem hız açısından çukur tespitinde tercih edilmiştir.

Çukur tespiti sadece 2 boyutlu görüntü verisiyle değil derinlik de ölçülerek 3 boyutlu olarak belirlenmektedir. Çukurun sadece varlığı değil, aynı zamanda derinliği de hesaplanarak çukurun tehlike derecesi de belirlenebilmektedir. Bu özellik, çukurların daha hassas bir şekilde analiz edilmesine ve sınıflandırılmasına olanak tanımaktadır, özellikle yol güvenliği açısından büyük önem taşınmaktadır. Çukur tespiti sırasında, tespit edilen çukurların GPS koordinatları otomatik olarak kaydedilmekte ve bu veriler bir harita üzerinde görselleştirilmektedir. Tespit edilen çukurların coğrafi konumlarının hızlı bir şekilde belirlenmesine ve raporlanmasına yardımcı olmakta, özellikle şehir yönetimleri ve yol bakım ekipleri için oldukça değerlidir.

Çalışmanın modüler yapısı, farklı nesne tespiti modelleri arasında kolayca geçiş yapma imkânı sağlamaktadır. Ayrıca, programın kolayca yeni modellere veya farklı veri kaynaklarına uygun olması, gelecekteki genişletmeler, iyileştirme ve geliştirme için güçlü bir temel sunmaktadır. Genellikle çukur tespiti zorlu bir bilgisayarla görü problemi ve genellikle özel çözümler gerektirmektedir. Bu çalışma mevcut teknolojilerin bu özel problemde nasıl kullanılabileceğini göstermektedir. YOLOv5 ve YOLOv8 gibi farklı algoritmalar arasında geçiş yaparak, bu modellerin çukur tespitindeki doğruluk performanslarını değerlendirme imkânı sunmaktadır. Bu çalışma nesne tespiti ve derinlik ölçümünü bir araya getiren, farklı modelleri aynı anda karşılaştıran, gerçek zamanlı GPS entegrasyonu ile desteklenen ve modüler yapısıyla esnek bir şekilde genişletilebilen bir çözüm sunmaktadır. Özellikle yol güvenliği ve bakımında kullanılabilecek yenilikçi bir araç olarak öne çıkmaktadır. Bu özellikler, programın hem araştırma hem de endüstriyel uygulamalar için yüksek özgün bir değer taşımasını sağlamaktadır. İl özel idareleri, ilçe belediyeleri ilk önce uygulamadan tespit edilen çukurlar hakkında plan oluşturur, bu konuda nasıl önlem alacağı tartışılır ve hasarı gidermek için yol çalışması yapmaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, TÜBİTAK 2209-B (Proje Numarası: 1139B412300872) kapsamında desteklenmiştir. Projedeki desteklerinden dolayı Özlem Hakdağlı'ya teşekkür ederim.

KAYNAKÇA

- [1] Teng, T.P., "Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Project," U.S Department of Transportation Federal Highway Administration, 2014.
- [2] Heggie, "Commercial Management and Financing of Roads," World Bank, Washington, 1998.
- [3] Legreid A.M., "Potholes and Strategies on the Road to Campus Internationalization," International Research and Review: Journal of Phi Beta Delta Honor Society for International Scholars, vol. 6, no. 1, 2016.
- [4] Rita Justo-Silva A.F., "Pavement maintenance considering traffic accident costs," International Journal of Pavement Research and Technology, 2019.
- [5] Ümit Demir, Bora Uğurlu, "El Yazısından Kişilik Analizinde El Yazısı Tanımlamaya Yönelik Bir Karar Destek Modeli Önerisi", UMÜFED Uluslararası Batı Karadeniz Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 3(2), ss, 47-71, 2021.
- [6] Derin Öğrenme Nedir? : <https://www.oracle.com/tr/artificial-intelligence/machine-learning/what-is-deep-learning/> [Ziyaret Tarihi: 19.10.2024]
- [7] Ferdi Doğan, İbrahim Türkoğlu, "Derin Öğrenme Algoritmalarının Yaprak Sınıflandırma Başarımlarının Karşılaştırılması", Sakarya University Journal Of Computer and Information Science Vol. 1, Id. Saucis-1-2018, April 2018.
- [8] Ultralytics Yolov5 Mimarlık: https://docs.ultralytics.com/tr/yolov5/tutorials/architecture_description/ [Ziyaret tarihi:03.09.2024]
- [9] Yolov5 İle Nesne Tespiti: <https://medium.com/@akdenizz7/yolov5-ile-nesne-tespiti-8aa370febfc0> [Ziyaret tarihi:03.09.2024]
- [10] A Deep Dive Into Non-Maximum Suppression(NMS): <https://builtin.com/machine-learning/non-maximum-suppression> [Ziyaret tarihi:04.09.2024]
- [11] Yolov8'in Gücünü Keşfedin: Yeni Nesil Nesne Tespiti Algoritması: <https://medium.com/@meryemmsakinn/yolov8in-g%C3%BCc%C3%BCn%C3%BC-ke%C5%9Ffedin-yeni-nesil-nesne-tespit-algoritmas%C4%B1-d98efcda3e8d> [Ziyaret tarihi:08.09.2024]
- [12] Ultralytics Yolo Dökümanlar: <https://docs.ultralytics.com/tr> [Ziyaret tarihi:08.09.2024]

- [13] Autonomous: Vehicles And Urban Traffic Management For Sustainability: Impacts Of Transition Of Control And Dedicated Lanes : <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/19/8323> [Ziyaret Tarihi: 16.09.2024]
- [14] Image Analysis In Autonomous Vehicles: A Review Of The Latest AI Solutions And Their Comparison: <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/18/8150> [Ziyaret Tarihi: 16.09.2024]
- [15] Yol Yüzeyi Kusur Tespiti - Görüntü Tabanlıdan Görüntü Tabansıza : Bir Araştırma: <https://arxiv.org/html/2402.04297v1> [Ziyaret tarihi:11.09.2024]
- [16] Arduino Gps Modülü Kullanımı: <https://devreyakan.com/arduino-gps-modulu-kullanimi/>[Ziyaret tarihi:12.09.2024]
- [17] Pothole Detection: <https://www.kaggle.com/datasets/andrewmvd/pothole-detection> [Ziyaret tarihi:14.09.2024]
- [18] Sylvain Arlot. Alain Celisse. "A survey of cross-validation procedures for model selection." Statist. Surv. 4 40 - 79, 2010.



THE ROLE OF CARBON IN LEAD-ACID BATTERIES: APPLICATIONS, CHALLENGES, AND FUTURE OPPORTUNITIES

Sümeyye ARSLAN^{1,a} Zehra Gülten YALÇIN^{1,b}, Mustafa DAĞ^{1,c}, Muhammed Bora AKIN^{1,d,*}

¹ Çankırı Karatekin University Department of Chemical Engineering

^a sumeyye.draan@gmail.com, ORCID: 0009-0007-5933-8574

^b zaltin@karatekin.edu.tr, ORCID: 0000-0001-5460-289X

^c mudag@karatekin.edu.tr, ORCID: 000-0001-9540-3475

^d mboraakin@yahoo.com, ORCID: 0000-0003-3841-1633

ABSTRACT

The incorporation of various forms of elemental carbon into lead-acid batteries has the potential to significantly enhance battery performance. Carbon materials are commonly used as additives to the negative active material, particularly to improve cycle life and charge acceptance under high-rate partial state-of-charge (HRPSoC) conditions, which are prevalent in hybrid and electric vehicles. Carbon nanostructures and composite materials may also offer similar benefits. However, the impact of carbon on the positive active material is generally more limited compared to its influence on the negative side. Additionally, carbon can serve as a mesh current collector for both negative and positive plates. This advanced technology boosts energy storage efficiency by increasing the battery's specific energy and optimizing active mass utilization. Such batteries, featuring a more robust active mass structure, promise extended cycle life. Recently, another important application of carbon in secondary batteries is its use in supercapacitor electrodes, which can either replace the negative plate or be connected in parallel with the lead plate. These innovative approaches enhance overall battery efficiency by improving specific power and HRPSoC performance. Furthermore, integrating carbon-based technologies into the production of lead-acid batteries can significantly enhance their performance, giving them a competitive advantage over other battery systems. These

***Sorumlu Yazar (Corresponding Author)**

Atf (Citation): Arslan, S., Yalçın, Z.G., Dağ, M., Akın, M.B., "The Role of Carbon in Lead-Acid Batteries: Applications, Challenges, and Future Opportunities", UMÜFED Uluslararası Batı Karadeniz Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 6(2): 53-79, 2024.

Geliş (Received): 23/09/2024

Kabul (Accepted): 30/12/2024

Yayın (Published): 31/12/2024

advancements also hold substantial potential for delivering more environmentally friendly and cost-effective energy storage solutions.

Keywords: Lead-acid batteries, Carbon, High-rate partial state of charge, HRPSoC, Cycle life.

KURŞUN-ASİT PİLLERDE KARBONUN ROLÜ: UYGULAMALAR, ZORLUKLAR VE GELECEK FIRSATLAR

ÖZET

Kurşun-asit pillere çeşitli biçimlerdeki elementel karbonun eklenmesi, pil performansını önemli ölçüde artırma potansiyeline sahiptir. Karbon malzemeler, özellikle çevrim ömrünü ve yüksek oranlı kısmi şarj durumu (HRPSoC) koşullarında şarj kabulünü iyileştirmek amacıyla negatif aktif malzemeye katkı maddesi olarak yaygın bir şekilde kullanılır. Bu koşullar, hibrit ve elektrikli araçlarda yaygındır. Karbon nano yapılar ve kompozit malzemeler de benzer faydalar sağlayabilir. Ancak, karbonun pozitif aktif malzeme üzerindeki etkisi, negatif tarafa göre genellikle daha sınırlıdır. Buna ek olarak, karbon, hem negatif hem de pozitif plakalar için bir ağ akım toplayıcısı olarak işlev görebilir. Bu ileri teknoloji, pilin özgül enerjisini artırarak ve aktif kütle kullanımını optimize ederek enerji depolama verimliliğini artırır. Bu tür piller, daha dayanıklı bir aktif kütle yapısına sahip olup, uzatılmış bir çevrim ömrü vaat eder. Son dönemde, karbonun ikincil pillerdeki bir diğer önemli uygulaması, süperkapasitör elektrotlarında kullanılmasıdır. Bu elektrotlar, negatif plakayı değiştirebilir veya kurşun plakayla paralel bağlanabilir. Bu yenilikçi yaklaşımlar, özgül gücü ve HRPSoC performansını iyileştirerek pilin genel verimliliğini artırır. Ayrıca, kurşun-asit pillerin üretimine karbon bazlı teknolojilerin entegre edilmesi, performanslarını önemli ölçüde artırarak diğer pil sistemlerine göre rekabetçi bir avantaj sağlar. Bu gelişmeler, daha çevre dostu ve maliyet açısından etkili enerji depolama çözümleri sunma potansiyeline de sahiptir.

Anahtar kelimeler: Kurşun-asit piller, Karbon, Yüksek oranlı kısmi şarj durumu, HRPSoC, Çevrim ömrü.

1. INTRODUCTION

Various forms of carbon have found extensive applications in different electrochemical power sources. The unique properties and diverse allotropes of carbon play a crucial role in enhancing multiple aspects of lead-acid batteries. In recent years, the use of carbon-based materials in battery technologies has significantly increased. Research indicates that incorporating activated carbon into the negative plates of lead-acid batteries can significantly extend their lifespan [1]. Additionally, carbon materials offer alternative solutions to enhance the performance of energy storage systems. The use of carbon rod collectors in recycling zinc-carbon batteries, particularly in creating sustainable cathodes for rechargeable zinc-ion batteries, further emphasizes the critical importance of carbon in battery technology [2]. Furthermore, the recovery of spent lead paste through environmentally friendly leaching processes using oxalate solutions provides an effective method for sustainably reclaiming lead, a crucial component in lead-acid battery production [3,4]. These advancements highlight the growing significance of carbon in energy storage systems.

Lead-Acid Batteries

A lead-acid battery is a secondary cell where metallic lead at the negative electrode and lead (IV) oxide at the positive electrode are transformed into lead (II) sulfate during the discharge process. Both reactions take place in the presence of sulfuric acid (H₂SO₄) as the electrolyte [5]. The discharge reaction is represented by Equation (1) [6].



The advantage of lead-acid batteries lies in their ability to operate for extended periods under variable charging conditions and their low self-discharge rate. However, their drawbacks include high weight due to low specific energy and a limited number of charge/discharge cycles [7]. In 1860, Planté developed a secondary cell with high power and capacity, using a design similar to that used by Offershaus and Hare for voltaic cells. In this design, two long and wide lead plates were rolled together, separated by a thick cloth, and immersed in a glass jar filled with water acidified with one-tenth sulfuric acid. The initial performance of a nine-cell secondary battery with a total surface area of ten square meters was presented at the March 26, 1860, meeting of the Academy of Sciences. The work *Recherches sur l'Électricité* includes hand-drawn illustrations of various electrical devices as some of the earliest battery designs [8].

Each illustration depicts a different electrical cell or battery design, reflecting early explorations of electrical energy storage and transmission. Figure 1a shows a secondary cell, referred to as *Couple secondaire à lames de plomb en spirale*, featuring spiral-wound lead plates used for electrochemical energy storage. Figure 1b illustrates a secondary battery with a large surface area, labeled *Batterie secondaire de grande surface*. Figures 1c and Figure 1d depict a secondary cell with parallel lead plates, labeled *Secondary cell with parallel lead plates*, where letters a, b, c, and a', b', c' represent the parallel lead plates. Figure 1e presents a design with lead plates separated by rubber strips, intended to insulate the lead plates from each other [9].

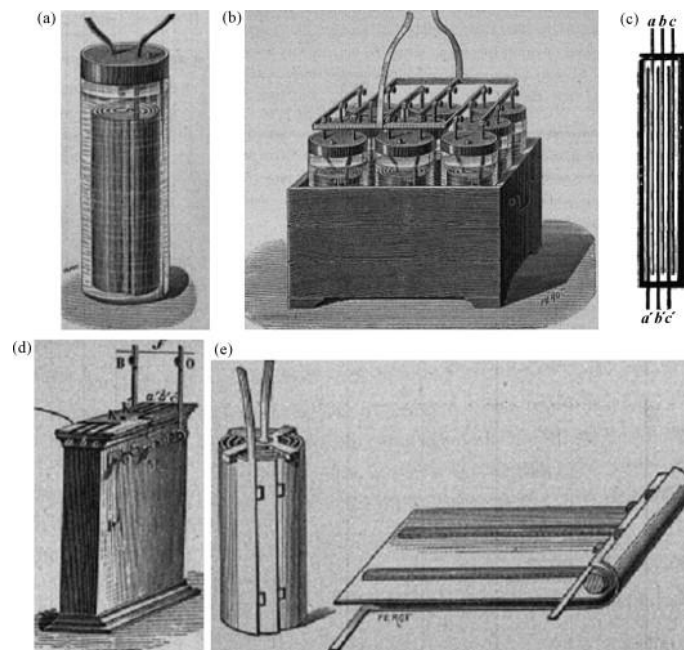


Figure 1. Illustrations from *Recherches sur l'Électricité*. (a) A secondary cell with spiral-wound lead plates. (b) A secondary battery with a large surface area. (c and d) A secondary cell with parallel lead plates (a, b, c, a', b', c'). (e) Lead plates separated by rubber strips [9].

Today, batteries are made from polypropylene or polyethylene plastics. The plates consist of a lead alloy grid with an active mass (positive or negative) applied to it. It is well known that during battery operation, electrochemical reactions occur, involving the oxidation of lead in the paste. Figure 2 provides a representative image of modern batteries [10].

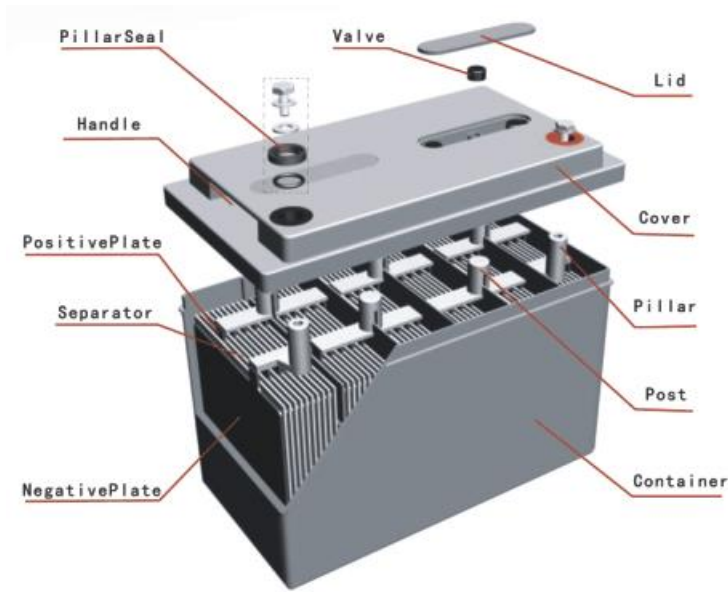


Figure 2. Representative image of a modern battery [10].

2. IMPACT OF CARBON ON LEAD-ACID BATTERIES

The performance of lead-acid batteries is directly dependent on the properties of the negative and positive active materials, as well as the current collector. These active materials are the sites where electrochemical reactions occur, determining the mechanisms of energy storage and release in the battery. The current collector, typically made of lead or lead alloys, serves as a conductive framework that facilitates the flow of electrons between the active materials and the external circuit, ensuring efficient energy transfer. During charging, the negative active material (NAM) is reduced to lead (Pb), and during discharging, it is converted into lead sulfate (PbSO₄). This transformation forms the basis of the battery's energy storage and release processes. The positive active material (PAM) is typically found in the form of lead dioxide (PbO₂). This material plays a critical role in the oxidation reactions involved in the battery's energy storage and release. Table 1 provides a comparative overview of the roles, materials, and functions of the current collector, PAM, and NAM in lead-acid batteries. It highlights the distinct contributions of each component to the battery's overall functionality, including their specific roles in energy storage, material composition, and involvement in electrochemical reactions. To enhance the performance of lead-acid batteries and overcome their limitations, carbon additives targeting both negative and positive active materials, as well as current collectors, have become a major focus of research and development efforts. Carbon

materials offer an innovative solution to extend the cycle life of batteries while improving energy storage efficiency.

Table 1. Comparison of Roles and Properties of Current Collector, PAM, and NAM in Lead-Acid Batteries

Aspect	Current Collector	PAM	NAM
Function	Conducts electrons to/from active materials	Stores/releases energy via oxidation	Stores/releases energy via reduction
Material	Lead grid or lead alloy	Lead dioxide (PbO ₂)	Sponge lead (Pb)
Role in Reaction	Passive conductor	Active participant in redox reactions	Active participant in redox reactions

2.1. The Role of Carbon Materials in Optimizing NAM

Lead-acid batteries are among the most widely used rechargeable energy storage systems, where the NAM primarily consists of sponge Pb. This material plays a critical role in electrochemical reactions, enabling energy storage and release [7]. The porous structure of NAM provides a distinct advantage by facilitating the diffusion and distribution of sulfuric acid electrolyte, increasing the active surface area available for redox reactions [11]. The efficiency of charge and discharge processes is directly influenced by the surface area and porosity of the negative electrode [12]. However, over time, the porous lead structure tends to degrade, resulting in reduced cycle life and diminished capacity [13].

The inclusion of carbon materials in the negative electrodes of lead-acid batteries has been extensively studied as a means of addressing these limitations. Research demonstrates that carbon additives significantly enhance the performance, cycle life, and efficiency of lead-acid and lead-carbon batteries [14-16]. This improvement is primarily attributed to the unique properties of carbon, such as its high electrical conductivity and chemical stability.

Carbon materials, including multi-walled carbon nanotubes (MWCNT), have been shown to improve the conductivity of the negative electrode, thereby enhancing discharge performance [17]. Additionally, carbon helps slow the growth of PbSO₄ crystals, mitigating the issue of sulfation—a common cause of reduced battery efficiency. For example, the integration of lead nanoparticles into nanoporous carbon regulates the formation of PbSO₄ crystals, improving electrical conductivity, enhancing battery performance, and suppressing hydrogen gas evolution during operation [16]. Similarly, lead oxide coated with N-doped graphene oxide

composites effectively reduces PbSO_4 crystal aggregation, accelerates redox processes, and stabilizes the electrode structure over extended use, thus prolonging the battery's cycle life [18, 19].

Various types of carbon materials, including graphite, carbon black, carbon nanotubes (CNTs), and activated carbon, have been utilized in lead-acid batteries to optimize the properties of NAM [20-23]. Each of these materials offers specific benefits:

The positive impact of carbon additives on lead-acid battery performance extends beyond laboratory studies to commercial applications. These additives enhance the rheological and electrical properties of electrodes, underscoring their importance in optimizing battery functionality. Additionally, the versatility of carbon materials has been explored in other battery technologies, such as zinc slurry air-flow batteries, highlighting their potential for diverse energy storage systems [24].

Incorporating carbon materials into batteries also aligns with global sustainability goals. Biomass-derived carbon materials, such as biochar, have shown promising properties for battery electrode applications, offering high specific capacity, excellent cycling performance, and high initial discharge efficiency [25-27]. These materials contribute to environmental sustainability by utilizing renewable resources and reducing the environmental footprint of energy storage systems [25,27].

Life cycle assessments (LCAs) further demonstrate the environmental advantages of carbon additives, providing insights into their impact on greenhouse gas emissions and energy consumption when compared to traditional battery technologies like lithium-ion and lead-acid batteries [28,29]. However, the performance of carbon materials depends on factors such as the type of carbon used, its quantity, and its interaction with NAM. Therefore, optimizing the type and amount of carbon for specific applications is critical for maximizing the benefits of these materials in lead-acid batteries.

2.2. The Role of Carbon Materials in Optimizing PAM

In lead-acid batteries, the PAM, typically PbO_2 , plays a pivotal role in determining the battery's overall performance and longevity [7]. Its efficiency directly impacts the energy storage and power delivery capabilities of the battery. Maintaining high charge efficiency is crucial to prevent deposit formation on the electrodes and reduce Pb^{2+} concentration in the electrolyte, both of which limit the cycle life of the battery [30,31]. Phosphate ions have been

shown to reversibly adsorb onto PbO_2 during charging, altering the crystal growth of PbO_2 on the lead grid and making it more resistant to reduction into lead sulfate [32]. This resistance minimizes chemical degradation and passivation, which are common issues in PAM, highlighting the potential of further material innovations to address these challenges.

Carbon materials are emerging as critical enhancers of PAM performance due to their high conductivity, lightweight nature, and chemical stability. Incorporating carbon increases the electrical conductivity of PAM, accelerating electron transfer and optimizing the efficiency of charge and discharge cycles. For example, activated carbon derived from coconut shells has been shown to significantly enhance the electrical conductivity of PAM, speeding up charge transfer processes [33]. Moreover, carbon improves the mechanical durability of the PbO_2 structure, preventing cracking and shedding of active material, which are key factors in extending battery lifespan during long-term use [20].

Another critical benefit of carbon is its ability to slow the corrosion process in PAM. This reduction in corrosion helps maintain the structural integrity of the electrode, minimizing internal resistance and capacity loss, especially in batteries with long cycle lives [34]. Carbon materials also enhance thermal management in lead-acid batteries. By dissipating heat more efficiently, carbon prevents overheating of PAM under high-temperature conditions, improving thermal stability and ensuring safer battery operation. Research has demonstrated that carbon materials improve heat distribution and prevent the overheating of active materials, thereby supporting safe and efficient battery use under extreme conditions [35-37].

Various types of carbon materials, including graphite, carbon black, CNTs, and graphene, have been integrated into PAM, each with distinct advantages [38-44].

Research continues to focus on optimizing carbon additives to enhance the performance, lifespan, and efficiency of lead-acid batteries.

2.3. The Role of Carbon Materials in Optimizing Current Collectors

Recent studies have supported the potential benefits of carbon-based materials in enhancing the performance of lead-acid batteries. For example, Banerjee et al. (2017) demonstrated that incorporating single-walled carbon nanotubes (SWCNT) into battery electrodes significantly improved battery service life and operational efficiency by suppressing sulfation processes [34]. Similarly, Li et al. (2022) reported that integrating nanometer-sized lead sulfate carbon composites into the anode material enhanced cycle life and electrochemical

activity, suggesting that carbon materials can also function as effective current collectors [44]. Additionally, other studies have explored the potential of carbon-based materials to maintain structural integrity and efficiency, particularly under harsh operating conditions, highlighting the value of innovative materials in battery technologies [45,46]. These findings underscore the transformative role of carbon materials in optimizing lead-acid battery technology and the need for continued innovation in energy storage solutions.

2.4. Applications of Carbon Materials on Lead-Acid Batteries and Benefits

Carbon materials play a vital role in enhancing the performance of lead-acid batteries due to their excellent electrical conductivity, lightweight structure, high surface area, and chemical stability. Different structural forms of carbon, such as graphite, carbon black, CNTs, and graphene, each bring unique properties that can significantly improve battery efficiency and durability. For example, graphite facilitates efficient electron transport due to its layered structure, while carbon black provides high surface area and conductivity, making it an effective conductive agent [47,48]. CNTs and graphene, with their exceptional mechanical properties and electronic conductivity, are particularly effective in improving electrode performance across various battery types, including lead-acid batteries [49,50]. The integration of these carbon materials enhances electrode conductivity and increases the overall energy density and cycle life of batteries, demonstrating their critical role in advancing energy storage technologies [49,50].

Graphite, with its unique hexagonal layered structure, is instrumental in improving the performance of lead-acid batteries. Its high electrical conductivity facilitates rapid electron transfer during charge and discharge cycles, which is crucial for effective energy storage [51]. Additionally, graphite's chemical stability in both acidic and basic environments makes it suitable for use in lead-acid batteries, preserving its structural integrity and reducing the risk of corrosion and degradation over time [52]. Graphite's abundance and low production cost further enhance its commercial appeal [53]. However, its mechanical durability may not always meet the demands of specific applications, necessitating further research to address its limitations [51,53].

Carbon black is an amorphous form of carbon that is increasingly utilized in energy storage applications due to its high surface area and conductivity. Its high surface area enhances electrochemical reactions within the battery, increasing capacity and improving battery

performance [39]. Carbon black's conductivity enables faster charge and discharge cycles and enhances overall energy storage efficiency [20]. Despite its advantages, carbon black faces challenges such as agglomeration, which can disrupt electrode homogeneity, and higher production costs compared to graphite, limiting its widespread adoption [20,53]. Ongoing research aims to address these limitations and maximize the potential of carbon black in lead-acid batteries by optimizing its distribution and reducing costs [44].

CNTs are a significant innovation in energy storage, offering exceptional mechanical durability, high conductivity, and large surface area. Their integration into lead-acid batteries enhances battery performance by improving structural integrity, extending battery lifespan, and increasing the efficiency of charge and discharge cycles [54,55]. CNTs also promote efficient electrochemical reactions by providing a larger active surface area, which increases the overall capacity of the battery [20,49]. However, their widespread adoption is limited by high production costs and the technical challenges of achieving homogeneous distribution within electrode structures [55]. Addressing these issues could unlock the full potential of CNTs for commercial applications [54,55].

Graphene, a two-dimensional material composed of a single layer of carbon atoms, is a transformative material in energy storage due to its exceptional electrical conductivity, lightweight nature, and large surface area. It improves charge and discharge rates by reducing internal resistance and enhancing energy transfer efficiency [56,57]. Graphene also contributes to the portability and energy density of lead-acid batteries, making it particularly advantageous for portable devices and electric vehicles [56,59]. Its durability and chemical stability ensure consistent performance under varying environmental conditions, contributing to the long-term reliability of energy storage systems [56,57]. However, the high production costs and technical challenges of integrating graphene into battery structures limit its large-scale adoption [57-61].

Carbon materials are increasingly used in lead-acid batteries due to their remarkable properties, offering significant advantages in improving battery performance. Among these properties, high electrical conductivity is a primary benefit, enabling faster charge and discharge cycles. This is especially critical for applications requiring rapid energy delivery, as it reduces internal resistance and enhances the battery's overall efficiency [62]. For instance, the integration of CNTs into battery structures creates a conductive network that improves charge transfer, thereby boosting electrochemical performance [63]. Similarly, graphene's

exceptional conductivity facilitates efficient electron transport, further optimizing battery performance [62].

Beyond conductivity, the lightweight nature of carbon materials provides another advantage, particularly in reducing the total weight of lead-acid batteries. This characteristic is especially beneficial for portable applications where energy density is a key requirement [62,64]. Materials such as graphene and CNTs, with their large surface area, enable more efficient electrochemical reactions, potentially increasing the battery's capacity and overall performance [62,65].

In addition to the advancements brought by carbon materials such as graphite, carbon black, carbon nanotubes, and graphene in lead-acid batteries, RVC has emerged as a next-generation material with significant potential to optimize battery performance. Its high surface area and porous structure make it an attractive candidate for enhancing energy storage systems.

RVC is a lightweight, porous material that is increasingly used as a current collector in lead-acid batteries. Its unique open-cell foam structure provides a large surface area, enabling better contact with the electrolyte and enhancing charge transfer and electrochemical reaction rates [66]. This large surface area, combined with RVC's high porosity, facilitates effective penetration of the electrolyte, which optimizes battery performance and increases energy storage capacity [66].

Additionally, RVC exhibits excellent electrical conductivity, which accelerates charge and discharge cycles, thereby improving the overall efficiency of batteries. Its ability to reduce internal resistance makes RVC particularly beneficial for applications requiring rapid energy delivery [66]. Furthermore, RVC's mechanical durability helps maintain the structural integrity of batteries over extended cycles, contributing to improved lifespan and reliability. Its chemical stability offers resistance to corrosion and degradation, further extending battery life and enhancing the robustness of energy storage systems [66].

Despite its many advantages, the adoption of RVC faces challenges. The high production costs and integration difficulties with existing battery designs remain significant barriers to its widespread commercial use [64, 66]. These challenges emphasize the importance of ongoing research aimed at optimizing production processes, reducing costs, and improving integration methods [65].

Efforts to address these limitations focus on developing scalable manufacturing techniques and exploring innovative applications of RVC in energy storage systems. By overcoming these barriers, RVC could become a transformative material in lead-acid battery technology, providing enhanced performance and longevity for various applications.

2.5. The Role of RVC in Lead-Acid Batteries

Traditionally, lead and its alloys have been used as current collectors in lead-acid batteries. While effective, these materials exhibit significant drawbacks, such as high weight, susceptibility to corrosion, and limited cycle life. Corrosion of the current collectors during charge and discharge cycles can result in capacity loss and reduced battery lifespan [67]. This degradation is further exacerbated by local cell reactions at the interface between the active material and the current collector, weakening structural integrity and electrode adhesion [52].

Recent advancements in materials science have driven the exploration of alternative current collector materials to address these limitations. Copper foam substrates, for instance, have been investigated for their potential to improve battery performance by providing a more stable interface and reducing battery weight. Lead-foam grids created through electrodeposition on such substrates have shown promise in enhancing electrochemical performance [68]. Additionally, advanced materials like graphene and CNTs, known for their lightweight properties, high conductivity, and corrosion resistance, have opened new avenues for current collector design. While primarily studied in lithium-ion batteries, these materials hold potential for future research in lead-acid batteries, offering the possibility of higher energy densities and extended cycle lives [37,62].

Reticulated Vitreous Carbon (RVC) is emerging as a transformative material for current collectors in lead-acid batteries. It offers several key advantages that can significantly enhance battery performance. RVC's low density reduces the overall weight of the batteries, making it particularly advantageous for portable applications such as automotive batteries and electronic devices, where lighter weight translates to improved efficiency and usability [69].

One of RVC's standout features is its high electrical conductivity, which facilitates efficient electron flow between electrodes. This capability accelerates charge and discharge cycles, improving the operational efficiency of batteries—a critical feature for applications demanding rapid energy delivery and recovery [70]. Moreover, RVC's mechanical durability

ensures structural integrity under harsh environmental conditions, extending battery lifespan and reliability [64].

The material's chemical stability is another significant advantage. Unlike traditional lead-based collectors that are prone to corrosion, RVC resists degradation, maintaining low internal resistance and minimizing capacity loss over time [67]. This corrosion resistance is crucial for enhancing the long-term stability of lead-acid batteries and improving their performance in various applications [70].

RVC's porous structure further enhances its utility. The increased surface area enables better interaction with the active materials and electrolyte, optimizing electrochemical reactions. This leads to greater charge transfer efficiency, increased energy storage capacity, and improved overall performance of lead-acid batteries [64].

Despite its advantages, the widespread adoption of RVC in lead-acid batteries faces several challenges. The high production costs of RVC and the complexities associated with its integration into existing battery designs limit its commercial viability [64,66]. To overcome these barriers, research is focusing on optimizing production processes, reducing costs, and improving integration methods [65]. Scalable manufacturing techniques and innovative applications are key areas of development to make RVC more accessible for energy storage systems.

Researchers have also explored the use of carbon foam materials, such as carbonized pitch-impregnated polyurethane foam, as current collectors. These materials have demonstrated improved discharge capacity due to their ability to form smaller $PbSO_4$ crystals, which allow more charge cycles. However, lower conductivity and issues like plate shedding have been noted, especially for foam collectors on the positive plate [71-74].

Other studies have investigated advanced materials, such as graphene-aligned graphite foams and composite structures, to enhance current collector performance. While promising in certain aspects, these materials also face challenges related to adhesion, durability, and cost, underscoring the need for further research [76,77].

Similarly, the application of carbon as a capacitor in lead-acid batteries offers an innovative approach to addressing these challenges, providing enhanced energy storage capabilities and improved performance metrics by leveraging the unique properties of carbon materials.

2.6. The Use of Carbon as a Capacitor in Lead-Acid Batteries

Lead-acid batteries have been a reliable and cost-effective solution for energy storage applications for decades. However, limitations in capacity, cycle life, and energy density have prompted researchers to seek innovative improvements. One promising approach is the integration of carbon materials, particularly in the form of supercapacitors, to enhance the performance of lead-acid batteries.

The incorporation of carbon materials, such as single-walled carbon nanotubes (SWCNTs), has demonstrated significant potential in improving the electrochemical properties of lead-acid batteries. Research indicates that doping lead-acid batteries with CNTs can enhance conductivity and increase the active surface area, ultimately improving capacity and extending cycle life [34]. These advancements address the traditional shortcomings of lead-acid batteries, such as their relatively low energy density and limited cycle life, through the use of advanced materials [53]. Furthermore, combining supercapacitors with lead-acid batteries has proven to be an effective strategy for optimizing energy storage systems, particularly in applications requiring rapid charge and discharge cycles [81,82].

Hybridizing lead-acid batteries with supercapacitors offers a synergistic improvement in performance. Increasing the volumetric ratio of supercapacitors in a composite energy storage system allows supercapacitors to handle high power demands, while the lead-acid battery provides energy storage. This approach not only increases energy density but also extends the overall lifespan of the energy storage system [83]. Such synergy is especially advantageous for applications like hybrid electric vehicles, where frequent cycling is required [84].

Another benefit of incorporating carbon materials into lead-acid batteries is their ability to address performance issues under varying temperature conditions. Research has shown that adding carbon-based materials can improve the low-temperature performance of lead-acid batteries, expanding their operational range and reliability across diverse environments [53]. This enhancement is particularly critical for applications such as electric vehicles and renewable energy systems, where temperature fluctuations can significantly impact battery performance.

Carbon materials are critical components in supercapacitors due to their exceptional properties, including high electrical conductivity, large surface area, and chemical stability. Supercapacitors, known for their rapid charge and discharge capabilities, significantly benefit

from the integration of carbon materials. For instance, interconnected carbon nanosheets derived from hemp have demonstrated ultra-fast charge storage capabilities, achieving high specific capacitance values under various scan rates and temperatures [85].

Materials such as activated carbon and CNTs also improve capacitance by increasing ion adsorption due to their large surface areas, which can reach up to 3000 m²/g [86]. Hierarchical porous carbon monoliths, an important feature of high-voltage aqueous supercapacitors, combine large surface areas with structural integrity, enhancing ion accessibility and charge storage efficiency [87, 88]. The chemical stability of carbon materials ensures durability in energy storage processes, making them ideal for long-term solutions [89, 90].

The various roles and benefits of carbon materials in lead-acid batteries, spanning NAM, PAM, current collectors, and capacitors, are summarized in Table 2, providing a comparative perspective on their applications and contributions to performance enhancement.

Table 2. Comparison of Carbon Materials' Roles and Benefits in Optimizing Lead-Acid Battery Components

Aspect	Optimizing NAM	Optimizing PAM	Current Collectors	As Capacitors
Role in Battery	Enhances conductivity, reduces PbSO ₄ crystal growth, improves cycle life and discharge performance	Increases conductivity, prevents active material degradation, slows corrosion, and improves thermal management	Facilitates electron flow, reduces weight, resists corrosion, and improves structural integrity	Improves charge-discharge rates, increases energy density, and extends cycle life
Carbon Materials Used	Graphite, carbon black, CNTs, graphene, activated carbon	Graphite, carbon black, CNTs, graphene, activated carbon	Reticulated Vitreous Carbon (RVC), carbon foam, graphene-aligned graphite foams	CNTs, graphene, activated carbon, hemp-derived carbon nanosheets
Key Benefits	Boosts redox reactions	Enhances electrical and thermal conductivity	Accelerates charge-discharge cycles	Rapid energy delivery
	Stabilizes electrode structure	Prevents cracking and shedding	Optimizes electrolyte interaction	Maintains performance under varying temperatures
	Mitigates sulfation effects	Improves corrosion resistance	Reduces internal resistance	Mitigates sulfation effects
Challenges	Material interaction optimization	Addressing cost and scalability	High production costs	High production costs

	Quantity calibration for specific applications	Integration with existing technologies	Integration with existing designs	Complex integration
Applications	Renewable energy systems, high-power output applications	Energy storage systems requiring durability and efficiency	Automotive batteries, portable devices, renewable energy storage	Hybrid electric vehicles, portable energy solutions, temperature-sensitive applications

Integrating carbon as a capacitor in lead-acid batteries can enhance performance in several key ways. First, carbon increases the charge and discharge rates of the batteries, making them more efficient for high-power applications. This capability is critical for energy-intensive uses, where rapid energy delivery is essential. Second, incorporating carbon capacitors improves the energy density of batteries, enabling the storage of more energy within the same volume, which is an important factor for portable energy storage solutions.

Additionally, the use of carbon capacitors extends the cycle life of lead-acid batteries. Carbon materials enhance the chemical and mechanical stability of the electrodes, maintaining performance over extended use. Moreover, carbon capacitors help mitigate adverse effects such as sulfation in lead-acid batteries, reducing internal resistance and preventing capacity loss, thereby improving the batteries' long-term performance [91].

Despite their numerous advantages, the use of carbon as a capacitor in lead-acid batteries faces challenges. The high production costs of carbon materials and the complexities associated with their integration into existing battery technologies pose significant barriers to widespread adoption. However, ongoing advancements in production methods and material design aim to address these limitations.

The application of carbon as a capacitor represents an innovative approach to enhancing lead-acid battery performance. By improving charge-discharge rates, energy density, cycle life, and overall durability, carbon capacitors offer substantial potential to transform this field. In the future, overcoming the challenges of cost and integration could enable the broader adoption of carbon capacitors, significantly enhancing the efficiency and durability of energy storage solutions.

3. CONCLUSION

The integration of carbon materials into lead-acid batteries has proven to be a transformative approach to overcoming the traditional limitations of these batteries, particularly in enhancing cycle life and charge acceptance. Additives such as carbon black, graphene, and activated carbon play a pivotal role in boosting the overall performance of lead-acid batteries. By increasing conductivity and inhibiting the excessive formation of lead sulfate crystals, these materials address critical performance bottlenecks. These enhancements are particularly vital for applications requiring frequent cycling and high power output, such as renewable energy storage systems and electric vehicles.

Ongoing research and development in optimizing the types and quantities of carbon materials used in lead-acid batteries are driving continuous improvements in efficiency, durability, and reliability. The incorporation of carbon not only extends the operational life of these batteries but also improves their suitability for high-demand applications, bridging the gap between conventional lead-acid batteries and more expensive advanced technologies.

In conclusion, carbon-enhanced lead-acid batteries present a cost-effective and practical energy storage solution, meeting the growing demands for performance and sustainability. Continued advancements in this field are poised to further reinforce the relevance of lead-acid batteries in the global energy landscape, particularly in sectors where cost-efficiency, safety, and reliability are paramount.

REFERENCES

- [1] José María Delgado-Sánchez, Isidoro Lillo-Bravo, "Influence of degradation processes in lead-acid batteries on the techno-economic analysis of photovoltaic systems," *Energies*, 13(16), ss. 4075, 2020.
- [2] Enbo Shangguan, Liming Wang, Yingchao Wang, Linpo Li, Mingxing Chen, Jing Qi, Chengke Wu, Mingyu Wang, Quanmin Li, Shuyan Gao, Jing Li, "Recycling of Zinc-Carbon Batteries into MnO/ZnO/C to Fabricate Sustainable Cathodes for Rechargeable Zinc-Ion Batteries," *ChemSusChem*, 15(15), e202200720, 2022.
- [3] Cheng Ma, Yuehong Shu, Hongyu Chen, "Leaching of spent lead paste by oxalate and sodium oxalate solution and prepared leady oxide powder in nitrogen and air for lead acid battery," *Journal of the Electrochemical Society*, 163(10), ss. A2240-A2247, 2016.

- [4] Xiaoyan Zhu, Wen Zhang, Lijuan Zhang, Qing Zuo, Jian Yang, Lihua Han, “A green recycling process of the spent lead paste from discarded lead–acid battery by a hydrometallurgical process,” *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 37(5), ss. 508-515, 2019.
- [5] Hsiu-Wen Yeh, Chia-Jung Chang, Guey-Guey Huang, Po-Yu Chen, “Electrochemical conversion of ionic liquid-lead sulfate paste into metallic lead or lead(IV) oxide: Extracting lead from water-insoluble lead salt and formation of cobalt oxide electrocatalyst via galvanic displacement,” *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 834, ss. 64-70, 2019.
- [6] F. E. Varela, E. N. Codaro, J. R. Vilche, “Reaction and system modelling for Pb and PbO₂ electrodes”, *Journal of Applied Electrochemistry*, 27(10), ss. 1232–1244, 1997.
- [7] Pavlov, D., “Lead-Acid Batteries: Science and Technology”, Elsevier, 2011.
- [8] Planté, G., “Recherches sur l’électricité”, Gauthier-Villars, Paris, France, 1883.
- [9] Peter Kurzweil, “Gaston Planté and his invention of the lead–acid battery—The genesis of the first practical rechargeable battery,” *Journal of Power Sources*, 195(14), ss. 4424-4434, 2010.
- [10] Krawczyk, D. A. (Ed.). (2019). *Buildings 2020+ Energy Sources*. Bialystok University of Technology. ISBN 978-83-65596-72-7, eISBN 978-83-65596-73-4.
- [11] Fangyi Cheng, Jun Liang, Zhaohui Tao, Jun Chen, “Functional materials for rechargeable batteries,” *Advanced Materials*, 23(15), ss. 1695-1715, 2011.
- [12] Ning Kang, Yuxiao Lin, Li Yang, Dongping Lu, Jie Xiao, Yue Qi, Mei Cai, “Cathode porosity is a missing key parameter to optimize lithium-sulfur battery energy density,” *Nature Communications*, 10(1), 2019.
- [13] Paul Rüetschi, “Aging mechanisms and service life of lead–acid batteries,” *Journal of Power Sources*, 127(1-2), ss. 33-44, 2004.
- [14] Jiaming Xie, Yitao Hu, Xiaoli Wu, Asad Ali, Peikang Shen, “Positive effects of highly graphitized porous carbon loaded with PbO on cycle performance of negative plates of lead-acid batteries,” *Applied Sciences*, 11(18), ss. 8469, 2021.
- [15] Meng Zhang, Hengshuai Song, Yujia Ma, Shaohua Yang, Fazhi Xie, “Preparation of NH₄Cl-modified carbon materials via high-temperature calcination and their application in the negative electrode of lead-carbon batteries,” *Molecules*, 28(14), ss. 5618, 2023.

- [16] Sadhasivam Thangarasu, Gowthami Palanisamy, Sung-Hoon Roh, Hyun-Young Jung, “Nanoconfinement and interfacial effect of Pb nanoparticles into nanoporous carbon as a longer-lifespan negative electrode material for hybrid lead–carbon battery,” *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(23), ss. 8868-8879, 2020.
- [17] Muthiah Saravanan, Palanisamy Sennu, Murugesan Ganesan, Sethuraman Ambalavanan, “Multi-walled carbon nanotubes percolation network enhanced the performance of negative electrode for lead-acid battery,” *Journal of The Electrochemical Society*, 160(1), ss. A70-A76, 2012.
- [18] Huan Yang, Kai Qi, Lanqian Gong, Wanli Liu, Shahid Zaman, Xingpeng Guo, Yubing Qiu, Bao Yu Xia, “Lead oxide enveloped in N-doped graphene oxide composites for enhanced high-rate partial-state-of-charge performance of lead-acid battery,” *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(9), ss. 11408-11413, 2018.
- [19] Fernandez, M. M., Mulimbayan, F. M., & Mena, M. G. (2015). “Electrochemical investigation of carbon as additive to the negative electrode of lead-acid battery”. *MATEC Web of Conferences*, 27, 02011.
- [20] Jakub Lach, Kamil Wróbel, Justyna Wróbel, Piotr Podsadni, Andrzej Czerwiński, “Applications of carbon in lead-acid batteries: a review,” *Journal of Solid State Electrochemistry*, 23(3), ss. 693-705, 2019.
- [21] Gyeonghee Nam, Jong Hoon Park, Sangmin Kim, Donghwan Shin, Narae Park, Yongwoo Kim, Jong Min Kim, Jong Sun Kang, Jong Hwan Lee, Jong Min Cho, “Metal-free ketjenblack incorporated nitrogen-doped carbon sheets derived from gelatin as oxygen reduction catalysts,” *Nano Letters*, 14(4), ss. 1870-1876, 2014
- [22] Sreedhar Doraswamy, Narendran Dama, Suryanarayana Murthy Kurivella, Jagadish Mandava, Vasudeva Rao Veeredhi, “EIS and Electrical Investigations on (1D) Multiwall Carbon Nanotubes as NAM Additive for Automotive Lead-Acid Battery,” *Current Applied Science and Technology*, 23(3), 2022.
- [23] Mariana Silva Morán, Natanael Batista David, Rubens Nunes de Faria Junior, Jossano Saldanha Marcuzzo, Andrés Cuña, “Addition of activated carbon fiber in the negative plate of lead-acid battery: Effect on the electrochemical and electrical performance,” *MRS Advances*, 9, 136–141, 2024.

- [24] Nayoung H. Choi, David de Olmo, David Milian, Nadia El Kissi, Pierre Fischer, Klaus Pinkwart, Jürgen Tübke, “Use of carbon additives towards rechargeable zinc slurry air flow batteries,” *Energies*, 13(17), 4482, 2020.
- [25] Haoyu Liu, Zhen Xu, Zhenyu Guo, Jingyu Feng, Haoran Li, Tong Qiu, Magdalena Titirici, “A life cycle assessment of hard carbon anodes for sodium-ion batteries,” *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 379(2209), 2021.
- [26] Qing Zhou, Wei Yang, Li Wang, Chun Wei, Hao Lu ve Wen Yang, “Recent advances on biomass carbon materials for high-performance electrode,” *Preprints*, 2023.
- [27] Jun-Tao Li, Jiao-Hong Wu, Tao Zhang ve Ling Huang, “Preparation of Biochar from Different Biomasses and Their Application in the Li-S Battery,” *Acta Physico-Chimica Sinica*, 33(5), ss. 968-975, 2017.
- [28] Kirti Richa, Callie W. Babbitt, Nenad G. Nenadic ve Gabrielle Gaustad, “Environmental trade-offs across cascading lithium-ion battery life cycles,” *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(1), ss. 66-81, 2015.
- [29] Xin Sun, Xiaoli Luo, Zhan Zhang, Fanran Meng ve Jianxin Yang, “Life cycle assessment of lithium nickel cobalt manganese oxide (NCM) batteries for electric passenger vehicles,” *Journal of Cleaner Production*, 273, 123006, 2020.
- [30] John Collins, Gareth Kear, Xiaohong Li, C.T. John Low, Derek Pletcher, Ravichandra Tangirala, Duncan Stratton-Campbell, Frank C. Walsh ve Caiping Zhang, “A novel flow battery: a lead acid battery based on an electrolyte with soluble lead(II) Part VIII. The cycling of a 10 cm × 10 cm flow cell,” *Journal of Power Sources*, 195(6), ss. 1731-1738, 2010.
- [31] David O. Scanlon, Aoife B. Kehoe, Graeme W. Watson, Martin O. Jones, William I. F. David, David J. Payne, Russell G. Egdell, Peter P. Edwards ve Aron Walsh, “Nature of the band gap and origin of the conductivity of PbO₂ revealed by theory and experiment,” *Physical Review Letters*, 107(24), 246402, 2011.
- [32] Kathryn R. Bullock ve Donald H. McClelland, “The effect of phosphoric acid on the positive electrode in the lead acid battery,” *Journal of the Electrochemical Society*, 124(10), ss. 1478-1482, 1977.
- [33] Erwan Adi Saputro, Sukirmiyad, Susilowati, Silvana Dwi Nurherdiana, Diana Silvia Rahma Wardhani, Kirana Aurelia Salshabila ve Nurten Sahan, “Activated carbon

- coconut shell as base of anode battery: a review,” *Technium Romanian Journal of Applied Sciences and Technology*, 16, ss. 334-340, 2023
- [34] Anjan Banerjee, Baruch Ziv, Yuliya Shilina, Elena Levi, Shalom Luski, Doron Aurbach, “Single-wall carbon nanotube doping in lead-acid batteries: a new horizon,” *ACS Applied Materials & Interfaces*, 9(4), ss. 3634-3643, 2017.
- [35] Zhen Zhang, Chunhua Yuan, Hao Wu, Yong Huang, Tian Liu, “Research progresses of cathodic hydrogen evolution in advanced lead–acid batteries,” *Science Bulletin*, 61(8), ss. 623-634, 2016
- [36] P. Thangarasu, B. Subramanian, G. Kumar, S. Rajendran, V. Ganesan, “Nanoconfinement and interfacial effect of Pb nanoparticles into nanoporous carbon as a longer-lifespan negative electrode material for hybrid lead–carbon battery,” *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(29), ss. 10962-10972, 2020.
- [37] X. Wang, Y. Zhao, Z. Li, “Establishment of thermal stability estimation model of the power battery,” *Advanced Materials Research*, 421, ss. 209-213, 2012.
- [38] Vishal Mahajan, R. S. Bharj, J. Bharj, “Role of nano-carbon additives in lead-acid batteries: A review,” *Bulletin of Materials Science*, 42(1), 2019.
- [39] David G. Enos, Summer R. Ferreira, Heather M. Barkholtz, William Baca, Scott Fenstermacher, “Understanding function and performance of carbon additives in lead-acid batteries,” *Journal of The Electrochemical Society*, 164(13), ss. A3276-A3284, 2017
- [40] Shivraj Mahadik, Subramani Surendran, Joon Young Kim, Dongkyu Lee, Jihyun Park, Tae-Hoon Kim, Ho-Young Jung, Uk Sim, “Recent progress in the development of carbon-based materials in lead–carbon batteries,” *Carbon Neutralization*, 2(4), ss. 510-524, 2023.
- [41] Meng Zhang, Hengshuai Song, Yujia Ma, Shaohua Yang, Fazhi Xie, “Preparation of NH₄Cl-modified carbon materials via high-temperature calcination and their application in the negative electrode of lead-carbon batteries,” *Molecules*, 28(14), 5618, 2023.
- [42] Xiqing Yuan, Jingping Hu, Jingyi Xu, Yucheng Hu, Wei Zhang, Jinxin Dong, Sha Liang, Huijie Hou, Xu Wu, Jiakuan Yang, “The effect of barium sulfate-doped lead oxide as a positive active material on the performance of lead acid batteries,” *RSC Advances*, 6(32), ss. 27205-27212, 2016.

- [43] Sheng Zheng, Guang Jia, Wei Xue, Bing Huang, Jian Chen, Jian Wang, "Performance of a lead-carbon negative electrode based on a Pb-C electrodeposited porous graphite/Pb conductive net skeleton," *Micro & Nano Letters*, 11(5), ss. 264-268, 2016
- [44] Jian Li, Jian Cao, Zhen Chen, Jian Yu, Jian Zhang, Bin Chen, Yong Rao, "Improving the performance of recovered lead oxide powder from waste lead paste as active material for lead-acid battery," *International Journal of Energy Research*, 46(10), ss. 14268-14282, 2022.
- [45] Shaik Basheer Nagoor, Bokka Shanmukh Varun Teja, Chinnadurai T, Saravanan S, Karthigai Pandian M, "After explosion - battery degradation analysis using DSC and SEM," *Sustainable Chemical Engineering*, 4, ss. 46-56, 2023.
- [46] Masami Taguchi, Toshihiro Sasaki, Hiroki Takahashi, "Discharge-charge property of lead-acid battery using nano-scale PbO₂ as cathode active material," *Materials Transactions*, 55(2), ss. 327-333, 2014
- [47] Lizhi Wen, Jiachen Sun, Liwei An, Xiaoyan Wang, Xin Ren, Guangchuan Liang, "Effect of conductive material morphology on spherical lithium iron phosphate," *Nanomaterials*, 8(11), 904, 2018
- [48] Qing Zhang, Yong Zhang, Peng Du, Chunyi Su, "Carbon nanomaterials used as conductive additives in lithium ion batteries," *Recent Patents on Nanotechnology*, 4(2), ss. 100-110, 2010.
- [49] N. Sugumaran, P. Everill, S. Swogger, D. Dubey, "Lead acid battery performance and cycle life increased through addition of discrete carbon nanotubes to both electrodes," *Journal of Power Sources*, 279, ss. 281-293, 2015.
- [50] Rinaldo Raccichini, Alberto Varzi, Stefano Passerini, Bruno Scrosati, "The role of graphene for electrochemical energy storage," *Nature Materials*, 14(3), ss. 271-279, 2015
- [51] Julian Kosacki, Fatih Doğan, "The effect of expanded and natural flake graphite additives on positive active mass utilization of the lead-acid battery," *Journal of the Electrochemical Society*, 168(12), 120540, 2021
- [52] Hiroshi Okano, Yuta Hano, Kaito Sugimoto, Fumiya Ohira, Takashi Inoue, Toshihiro Hosokawa, Taichi Iwai, Shigeomi Takai, Takeshi Yabutsuka, Takeshi Yao, "Lead acid battery with high resistance to over-discharge using graphite based materials as cathode current collector," *Nano Select*, 3(6), ss. 1048-1053, 2021.

- [53] Yue Wang, Peng Zhang, Yun Long Li, Lin Li, Jian Quan Liang, Yuan Gao, Hong Da Zhang, Wei Sun, “The influence of carbon material on the low-temperature performance of lead-acid battery,” *Key Engineering Materials*, 842, ss. 236-241, 2020.
- [54] Roni Shapira, Gilbert Daniel Nessim, Tomer Zimrin, Doron Aurbach, “Towards promising electrochemical technology for load leveling applications: extending cycle life of lead acid batteries by the use of carbon nano-tubes (CNTs),” *Energy & Environmental Science*, 6(2), ss. 587-594, 2013.
- [55] Roni Marom, Boris Ziv, Anirban Banerjee, Benny Cahana, Shlomo Luski, Doron Aurbach, “Enhanced performance of starter lighting ignition type lead-acid batteries with carbon nanotubes as an additive to the active mass,” *Journal of Power Sources*, 296, ss. 78-85, 2015.
- [56] Francesco Bonaccorso, Luigi Colombo, Guihua Yu, Meryl Stoller, Valentina Tozzini, Andrea C. Ferrari, Rodney S. Ruoff, Vittorio Pellegrini, “Graphene, related two-dimensional crystals, and hybrid systems for energy conversion and storage,” *Science*, 347(6217), 2015.
- [57] Yong Jia, Jian Zhang, Dongdong Kong, Cheng Zhang, Dong Han, Jian Han, Yongsheng Chen, Qinghua Yang, “Practical graphene technologies for electrochemical energy storage,” *Advanced Functional Materials*, 32(42), 2022.
- [58] P. M. Oza, N. H. Vasoya, R. P. Vansadiya, “Empowering energy storage using graphene and its derivatives,” *Current Journal of Applied Science and Technology*, 42(37), ss. 24-33, 2023.
- [59] Peng Geng, Shuang Zheng, Hao Tang, Rong Zhu, Liang Zhang, Shuai Cao, Hua Xue, Huaiguo Pang, “Transition metal sulfides based on graphene for electrochemical energy storage,” *Advanced Energy Materials*, 8(15), 2018.
- [60] Pablo Ramos Ferrer, Annsley Mace, Samantha N. Thomas, Ju-Won Jeon, “Nanostructured porous graphene and its composites for energy storage applications,” *Nano Convergence*, 4(1), 2017.
- [61] Huan Yang, Kai Qi, Lanqian Gong, Wanli Liu, Shahid Zaman, Xingpeng Guo, Yubing Qiu, Bao Yu Xia, “Lead oxide enveloped in N-doped graphene oxide composites for enhanced high-rate partial-state-of-charge performance of lead-acid battery,” *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(9), ss. 11408-11413, 2018.

- [62] Na Li, Zongping Chen, Wencai Ren, Feng Li, Hui-Ming Cheng, “Flexible graphene-based lithium ion batteries with ultrafast charge and discharge rates,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(43), ss. 17360-17365, 2012.
- [63] Amy C. Marschilok, Corey P. Schaffer, Kenneth J. Takeuchi, Esther S. Takeuchi, “Carbon nanotube–metal oxide composite electrodes for secondary lithium-based batteries,” *Journal of Composite Materials*, 47(1), ss. 41-49, 2013
- [64] Walsh, F., Arenas, L., León, C., Reade, G., Whyte, I., & Mellor, B. (2016). The continued development of reticulated vitreous carbon as a versatile electrode material: structure, properties and applications. *Electrochimica Acta*, 215, 566-591. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.08.103>
- [65] Juvencio Vázquez-Samperio, Próspero Acevedo-Peña, Ariel Guzmán-Vargas, Edilso Reguera, Ely Córdoba-Tuta, “Incorporation of heteroatoms into reticulated vitreous carbon foams derived from sucrose to improve its energy storage performance,” *International Journal of Energy Research*, 45(4), ss. 6383-6394, 2020.
- [66] Bilen Aküzüm, Deborah D. Hudson, Devon A. Eichfeld, Christopher R. Dennison, Lutfi Agartan, Yury Gogotsi, E. Caglan Kumbur, “Reticulated carbon electrodes for improved charge transport in electrochemical flow capacitors,” *Journal of the Electrochemical Society*, 165(11), ss. A2519-A2527, 2018.
- [67] Taichi Iwai, Daisuke Kitajima, Shigeomi Takai, Takeshi Yabutsuka, Takeshi Yao, “ α -PbO₂ formation on the cathode of lead acid battery due to the local cell reaction,” *Journal of the Electrochemical Society*, 163(14), ss. A3087-A3090, 2016.
- [68] Keju Ji, Chun Xu, Huihui Zhao, Zhendong Dai, “Electrodeposited lead-foam grids on copper-foam substrates as positive current collectors for lead-acid batteries,” *Journal of Power Sources*, 248, ss. 307-316, 2014.
- [69] Kiran Yadav, Rohit Bagal, Sandeep Parmar, Tushar Patro, Amit Abhyankar, “In situ coating of needle-like NiCo₂O₄ magnetic nanoparticles on lightweight reticulated vitreous carbon foam toward achieving improved electromagnetic wave absorption,” *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 60(39), ss. 14225-14238, 2021.
- [70] Andrzej Czerwiński, Sławomir Obrębowski, Zbigniew Rogulski, “New high-energy lead-acid battery with reticulated vitreous carbon as a carrier and current collector,” *Journal of Power Sources*, 196(22), ss. 10114-10119, 2011

- [71] Előd L. Gyenge, Jung H. Jung, Bikash Mahato, “Electroplated reticulated vitreous carbon current collectors for lead–acid batteries: opportunities and challenges,” *Journal of Power Sources*, 113(2), ss. 388–395, 2003.
- [72] Li-Wen Ma, Bo-Zhen Chen, Yong Chen, Yan Yuan, “Pitch-based carbon foam electrodeposited with lead as positive current collectors for lead acid batteries,” *Journal of Applied Electrochemistry*, 39(9), ss. 1609–1615, 2009.
- [73] Yong Chen, Bo-Zhong Chen, Li-Wen Ma, Yong Yuan, “Effect of carbon foams as negative current collectors on partial-state-of-charge performance of lead acid batteries,” *Electrochemistry Communications*, 10(7), ss. 1064–1066, 2008.
- [74] Yong Chen, Bo-Zhong Chen, Li-Wen Ma, Yong Yuan, “Influence of pitch-based carbon foam current collectors on the electrochemical properties of lead acid battery negative electrodes,” *Journal of Applied Electrochemistry*, 38(10), ss. 1409–1413, 2008..
- [75] Yong Chen, Bo-Zhong Chen, Xiao-Chun Shi, Hui Xu, Wei Shang, Yong Yuan, Li-Ping Xiao, “Preparation and electrochemical properties of pitch-based carbon foam as current collectors for lead acid batteries,” *Electrochimica Acta*, 53(5), ss. 2245–2249, 2008.
- [76] Young-Il Jang, Nancy J. Dudney, Terry N. Tiegs, James W. Klett, “Evaluation of the electrochemical stability of graphite foams as current collectors for lead acid batteries,” *Journal of Power Sources*, 161(2), ss. 1392–1399, 2006.
- [77] Angel Kirchev, Nina Kircheva, Marion Perrin, “Carbon honeycomb grids for advanced lead-acid batteries. Part I: Proof of concept,” *Journal of Power Sources*, 196(20), ss. 8773–8788, 2011.
- [78] Angel Kirchev, Sébastien Dumenil, Marion Alias, Romain Christin, Arnaud de Mascarel, Marion Perrin, “Carbon honeycomb grids for advanced lead-acid batteries. Part II: Operation of the negative plates,” *Journal of Power Sources*, 279, ss. 809–824, 2015.
- [79] Christie, S. Wong, Y.S. Titelman, G. Abrahamson, J. “Lead-acid battery construction”, Patent US 9543589, 2017.
- [80] Jérémy Lannelongue, Mikael Cugnet, Nicolas Guillet, Angel Kirchev, “Electrochemistry of thin-plate lead-carbon batteries employing alternative current collectors,” *Journal of Power Sources*, 352, ss. 194–207, 2017.

- [81] Cheng, H. and Wu, H. (2013). "Simulation on control strategies of hybrid energy storage". *Advanced Materials Research*, 860-863, 582-585. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.860-863.582>
- [82] Majeed Zaidan, Ghanim Hasan, Mudhar Al-Obaidi, "Comparative study between a battery and super-capacitor of an electrical energy storage system for a traditional vehicle," *Gazi University Journal of Science*, 35(4), ss. 1405-1415, 2022.
- [83] Jong-Ho Lee, Jong-Won Yoon, "Effect of electric properties according to volume ratio of supercapacitor and battery capacitor in hybrid energy storage system," *Coatings*, 13(8), 1316, 2023.
- [84] Noshin Omar, Joeri Van Mierlo, Bart Verbrugge, Pieter Van den Bossche, "Power and life enhancement of battery-electrical double layer capacitor for hybrid electric and charge-depleting plug-in vehicle applications," *Electrochimica Acta*, 55(25), ss. 7524-7531, 2010.
- [85] Noshin Omar, Joeri Van Mierlo, Bart Verbrugge, Pieter Van den Bossche, "Power and life enhancement of battery-electrical double layer capacitor for hybrid electric and charge-depleting plug-in vehicle applications," *Electrochimica Acta*, 55(25), ss. 7524-7531, 2010.
- [86] Chih-Chieh Yang, Hung-Yi Tsai, Tseung-Yuen Tseng, "Preparation of NiCo₂S₄-based electrodes for supercapacitor application," *DEStech Transactions on Computer Science and Engineering*, (CCME), 2019.
- [87] George Hasegawa, Kazuyoshi Kanamori, Tsutomu Kiyomura, Hiroki Kurata, Takeshi Abe, Koji Nakanishi, "Hierarchically porous carbon monoliths comprising ordered mesoporous nanorod assemblies for high-voltage aqueous supercapacitors," *Chemistry of Materials*, 28(11), ss. 3944-3950, 2016.
- [88] Hengxing Ji, Xin Zhao, Zhenhua Qiao, Jeil Jung, Yanwu Zhu, Yalin Lu, Li Li Zhang, Allan H. MacDonald, Rodney S. Ruoff, "Capacitance of carbon-based electrical double-layer capacitors," *Nature Communications*, 5, 3317, 2014.
- [89] Dong Liu, Kang Ni, Jian Ye, Jian Xie, Yanwu Zhu, Li Song, "Tailoring the structure of carbon nanomaterials toward high-end energy applications," *Advanced Materials*, 30(48), 1802104, 2018.

- [90] Chunhua Lu, Dong Wang, Jian Zhao, Shu Han, Wei Chen, “A continuous carbon nitride polyhedron assembly for high-performance flexible supercapacitors,” *Advanced Functional Materials*, 27(8), 2017.
- [91] Xi Luo, Jorge Varela Barreras, Clementine L. Chambon, Bin Wu, Efstratios Batzelis, “Hybridizing lead–acid batteries with supercapacitors: a methodology,” *Energies*, 14(2), 507, 2021.



İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI PERVANELERİNİN AKIŞ VE YAPISAL ANALİZ ÇALIŞMASI

Tayip TÜRK^{1,a*}, Metin UZUN^{1,b}

¹İskenderun Teknik Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi

^atayipturk.hubf20@iste.edu.tr, ORCID: 0009-0004-6758-4749

^bmetin.uzun@iste.edu.tr, ORCID: 0000-0002-0744-3491

ÖZET

Pervaneli uçaklarda kullanılan pervane palleri, havacılık endüstrisinde önemli bir rol oynamakta olup, bu bileşenlerin performansını ve dayanıklılığını değerlendirmek adına detaylı analizlere tabi tutulmuştur. Bu analizler, akış ve yapısal özellikleri içermekte olup, Fluent yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve kapsamlı bir rapor ile belgelenmiştir. Akış analizi, pervanedeki hız ve basınç kontürlerini içermekte, ayrıca streamline ve hız vektörleri sonuçlarını detaylı bir şekilde ortaya koymaktadır. Bu veriler, pervanenin aerodinamik performansını anlamak adına kritik öneme sahiptir. Fluent içerisinde yapılan analizlerde ise basınç kuvvetleri, yapısal analizin bir parçası olarak ele alınmıştır. Bu, pervane üzerindeki kuvvetlerin ve etkileşimlerin anlaşılmasına katkı sağlamaktadır. Yapısal analiz kapsamında pervane üzerindeki toplam deformasyon, gerilim ve gerinim analizleri detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Bu analizler, malzeme dayanıklılığını, genel yapısal bütünlüğü ve potansiyel zayıf noktaları belirleme açısından büyük öneme sahiptir. Sonuç olarak, bu kapsamlı analizler, pervaneli uçaklarda kullanılan pervane pallerinin performansını optimize etmek, dayanıklılıklarını artırmak ve güvenilirliklerini sağlamak adına mühendislik çözümlerine yönlendirilmiş bir yaklaşım sunmaktadır. Bu rapor, havacılık endüstrisindeki teknolojik gelişmelere katkıda bulunan önemli bir mühendislik çalışmasıdır.

Anahtar Kelimeler: Akış Analizi, Yapısal Analiz, Advence Ratio, Pervane.

***Sorumlu Yazar (Corresponding Author)**

Geliş (Received): 23.01.2024

Atıf (Citation): TÜRK, T., UZUN, M., "İnsansız Hava Araçları Pervanelerinin Akış ve Yapısal Analiz Çalışması", UMÜFED Uluslararası Batı Karadeniz Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 6(2), ss. 80-92, 2024.

Kabul (Accepted): 23.07.2024

Yayın (Published): 31.12.2024

FLOW AND STRUCTURAL ANALYSIS STUDY OF UNMANNED AERIAL VEHICLE PROPELLER

ABSTRACT

Engine blades used in propeller-driven aircraft play an important role in the aviation industry and have been subjected to detailed analysis to evaluate the performance and durability of these components. These analyzes included flow and structural properties and were performed using Fluent software and documented in a comprehensive report. Flow analysis includes velocity and pressure contours in the propeller, and also reveals the results of streamline and velocity vectors in detail. These data are critical to understanding the aerodynamic performance of the propeller. In the analyzes performed within Fluent, pressure forces were considered as a part of the structural analysis. This contributes to the understanding of the forces and interactions on the propeller. Within the scope of structural analysis, total deformation, stress and strain analyzes on the propeller are discussed in detail. These analyzes are of great importance in determining material durability, overall structural integrity and potential weak points. As a result, these comprehensive analyzes provide a directed approach to engineering solutions to optimize the performance of engine blades used in propeller-driven aircraft, increase their durability and ensure their reliability. This report is an important engineering study that contributes to technological advances in the aviation industry.

Keywords:Fluent, Structural Analysis, Advance Ratio, Propeller.

1. GİRİŞ

Günümüzde havacılık endüstrisi, sürekli olarak gelişen teknoloji ve mühendislikle birlikte daha etkili ve verimli uçak tasarımları üzerinde çalışmaktadır. Pervaneli uçaklar, özellikle hafif uçaklardan ticari jetlere kadar geniş bir yelpazede kullanılmaktadır [1-3]. Pervaneler, genellikle döner bir mili olan bir rotor etrafında dönerek hareket üretirler. Bu hareket, genellikle bir güç kaynağı tarafından sağlanır ve pervanenin yapılandırmasına ve tasarımına bağlı olarak çeşitli şekillerde kullanılabilir [4]. Pervaneler, çeşitli hava araçlarında önemli bir rol oynar. Uçaklar: Pervaneler, uçaklarda itme sağlamak için kullanılır. Jet motorları, pervane kullanmadan itiş üretirken, pervaneler genellikle pistonlu motorlu uçaklarda bulunur [5-6]. Bu pervaneler, motorun dönme hareketini dışarıya itişe dönüştürür. Helikopterler: Helikopterler, pervane rotorları aracılığıyla yükselme, alçalma, ileri gitme ve yanlamasına hareket etme yeteneğine

sahiptir. Ana rotor ve kuyruk rotoru olarak iki tip pervane bulunur. İHA'lar (İnsansız Hava Araçları): İnsansız hava araçları, pervaneler aracılığıyla uçuşlarını gerçekleştirirler. Bu pervaneler, uçağın kontrolünü ve manevra kabiliyetini sağlar. Planörler: Planörler, çoğunlukla çekici bir uçak tarafından çekilirken, bazı durumlarda pervanelerle de uçabilirler. Bu pervaneler genellikle yükselme ve yönlendirme için kullanılır. Rotor Kanatlı Uçaklar (VTOL ve STOL): Dikey kalkış ve iniş (VTOL) veya kısa kalkış ve iniş (STOL) yeteneklerine sahip hava araçları, pervane rotorlarını kullanarak dikey kalkış ve iniş yapabilirler. Bu tür uçaklar, helikoptere benzer şekilde pervanelerle kalkış ve iniş yapabilirler, ancak daha sonra sabit kanatlarıyla düz uçuşa geçerler. Sayısal ve deneysel olarak Pervanelerin birçok konuda literatür analizleri mevcuttur. Bunlar; Aerodinamik performans analizi, Yük analizi, termal analiz, Akustik analizler ve Optimizasyon çalışmalarıdır [7-9]. Pervanelerin verim analizinde, pervanenin enerji dönüşüm verimliliğini, itme veya taşıma kuvveti üretme kapasitesini belirli yakıt tüketimi altında sağlamanın oldukça önemlidir. Pervanenin aerodinamik profili, verimlilik üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Akışın pervane etrafındaki şekli, dönme etkisi, kavitasyon ve türbülans gibi faktörler pervanenin performansını belirler [10-13]. Pervanenin verimliliği, çeşitli hızlarda ve yükler altında değişebilir. Pervane verim eğrisi, farklı çalışma koşullarında pervanenin verimliliğini gösteren bir grafikdir. Bu eğri, pervanenin en iyi verimlilik seviyelerini ve kullanım aralığını belirlemeye yardımcı olur. Pervaneler için advance ratio, pervanenin performansını değerlendirmek ve optimize etmek için kullanılır [14-17]. İlerleme oranı, pervanenin ileri hızını pervanenin dönme hızına oranlayarak ifade edilir. Bu çalışmada literatüre katkı sunmak için farklı pervane çapı ve farklı ilerleme oranlarına sahip pervanelerin kullanım alanına göre aerodinamik performans analizi yapılmıştır.

$$APC=V/n*D$$

Denklem 1

Burada: V hava hızını, n pervane devir sayısını, D ise pervane çapını temsil eder.

Advance Ratio'nun değeri, pervane tasarımını ve performansını anlamak açısından önemlidir. Yüksek Advance Ratio değerleri, yüksek hızlı uçaklar için daha uygun olan pervane tasarımlarını gösterir. Düşük Advance Ratio değerleri ise düşük hızlarda daha etkili olan pervane tasarımlarını ifade eder [18-19].

Tablo 1.1. Sayısal Analizleri yapılan Farklı Pervane Özellikleri

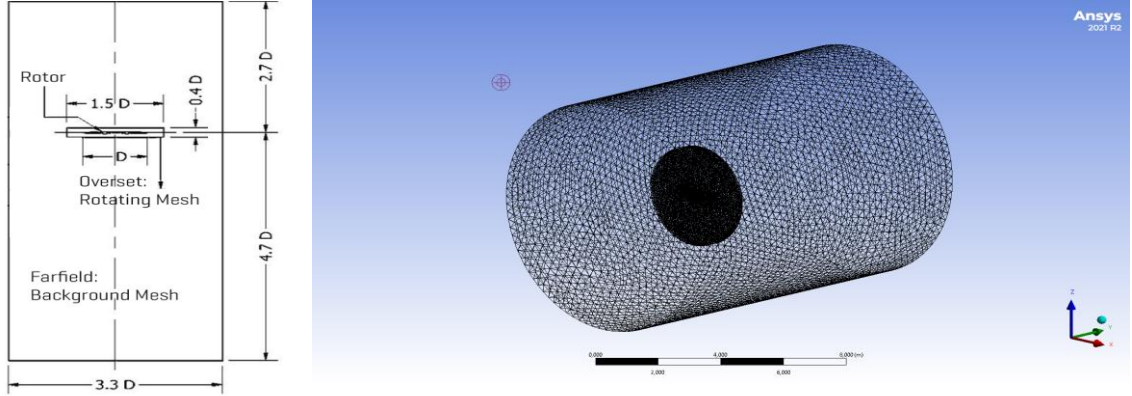
Hava Hızı	10 m/s	Hava Hızı	10 m/s
Devir Sayısı	200 dev/dk	Devir Sayısı	200 dev/dk
Pervane Çapı	0,25 m	Pervane Çapı	1,5 m
Advance Ratio	0,2	Advance Ratio	0,03
Pervane Profili	NACA 2415	Pervane Profili	NACA 2415

Advance Ratio'nun bu şekilde değişimi, pervane tasarımını ve performansını anlamak açısından önemlidir. Daha büyük çaplı pervaneler genellikle düşük hızlarda daha etkilidir, bu nedenle düşük Advance Ratio değerlerine sahiptir. Daha küçük çaplı pervaneler ise yüksek hızlarda daha etkili olabilir, bu da yüksek Advance Ratio değerlerine yol açar.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Hesaplama Akışkanlar Dinamiği (CFD) teknolojisi, günümüzde karmaşık rotor aerodinamik simülasyonlarını başarıyla gerçekleştirebilmektedir. Bu teknoloji, havanın ve diğer akışkanların etkileşimini matematiksel modeller ve sayısal çözümleme yöntemleri kullanarak simüle eder. Ancak, etkili bir analiz yapabilmek için belirli adımların dikkatlice izlenmesi gerekmektedir. İlk adım, net ve doğru bir geometri oluşturmaktır. Pervane tasarımı, bu simülasyonların temelini oluşturur ve bu nedenle doğru bir şekilde modellenmelidir. Ayrıca, gelişmiş ağ yapısıyla uygun hesaplama alanını tanımlamak da önemlidir. Hesaplama alanının doğru belirlenmesi, sonuçların güvenilirliğini etkiler. Gelişmiş ağ yapısı, hesaplama alanını statik ve dönen alanlar olmak üzere iki ana bölüme ayırmayı içermelidir. Bu noktada, overset mesh tekniği devreye girer. Pervanenin geometrisini içeren dönen alan, sınırlardan yeterli boşluklarla birlikte silindirin merkezine yerleştirilir. Bu, simülasyonun doğruluğunu artırır. Ayrıca, en uygun hesaplama yönteminin belirlenmesi kritik bir adımdır. Doğru pervane simülasyonu elde etmek üzere silindirik bir tasarım, hesaplama algoritmasının temelini oluşturur. Bu algoritma, havanın akışını ve pervanenin etkileşimini doğru bir şekilde modellemek için tasarlanmıştır. Özellikle, overset mesh tekniği kullanılarak hesaplama alanı iki ana bölüme ayrılmıştır: statik ve dönen alanlar. Pervanenin geometrisini içeren dönen alan, sınırlardan yeterli boşluklarla birlikte silindirin merkezine yerleştirilmiştir. Ayrıca, uzak alan mesafesi, pervanenin akışını doğru bir şekilde simüle etmek için gerekli olan mesafeye ayarlanmıştır. Son olarak, hesaplama alanının boyutları dikkatlice belirlenmelidir. Bu boyutlar, simülasyonun doğruluğunu ve hesaplama

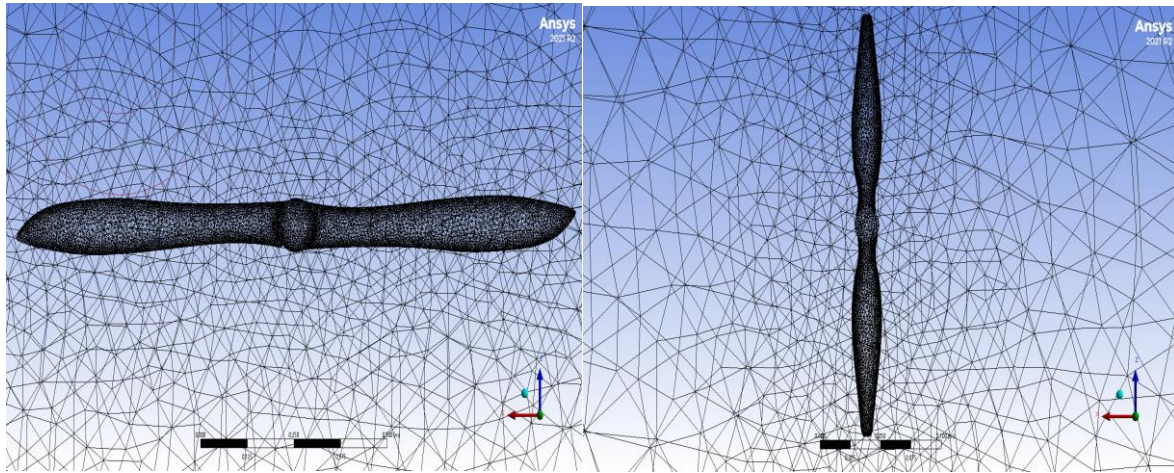
süresini optimize etme açısından önemlidir. Her bir adımın doğru bir şekilde takip edilmesi, hassas sonuçların elde edilmesini sağlar ve tasarım süreçlerini optimize etme potansiyelini artırır.



Şekil 2.1. Dış Akış Hacmi Görüntüsü ve Boyutlandırılması

Tablo 2.1. Mesh Eleman Özellikleri ve Sınır Koşulları

Ortalama Skewness	0,23564
Orthogonal Quality	0,76352
Mesh elemanı sayısı	847694



Şekil 2.2. Farklı Çaptaki Pervane Pallerini Mesh Görüntüleri

3.HESAPLAMA YÖNTEMİ VE SINIR KOŞULLARI

Akışkanlar dinamiği çalışmalarında, önceki araştırmalar benzer analiz koşulları altında en doğru sonuçların $k-\omega$, $k-\epsilon$ ve Spalart-Allmaras türbülans modellerinden elde edildiğini göstermiştir. K-omega modeli viskoz alt katmandaki akışı başarıyla simüle ederken, k-epsilon

modeli duvardan uzak akışları etkili bir şekilde modelleyebilir. Bu çalışmada, eğrilik düzeltmeli türbülans modeli olarak k- ω SST modeli kullanılmıştır [20-22]. Bu model, k-omega ve k-epsilon modellerini birleştiren, iki denklemlilik bir girdap-viskozite hibrit modelidir. Analizde incelenen pervanenin (200 dev/dk- 600 dev/dk- 1000 dev/dk) hızla döndüğü belirlenmiştir. Bu durumda akışın sıkıştırılmaz olduğu varsayılabilir. Analizin fiziksel parametreleri, hız girişi için uzak alan koşulları, basınç çıkışı için belirlenmiş tanımlamalar ve taşan dönen ağ bölgesi için çerçeve hareketi olarak dönme hızı tanımlamalarını içermektedir. Deniz seviyesi koşullarında, hava yoğunluğu, dinamik viskozite ve sıcaklık özellikleri de tanımlanmıştır.

Tablo 3.1. Sınır Koşulları

Türbülans Modeli	k- ω SST
Inlet Velocity	10 m/s
Outlet Pressure	0 Pa
Thermal	300 K
Operating Conditions	101325 Pa
Dönen Akış Hacmi	200 dev/dk- 600 dev/dk- 1000 dev/dk

Tablo 3.2. Farklı devirlerde pervanelerin parametre sonuçları

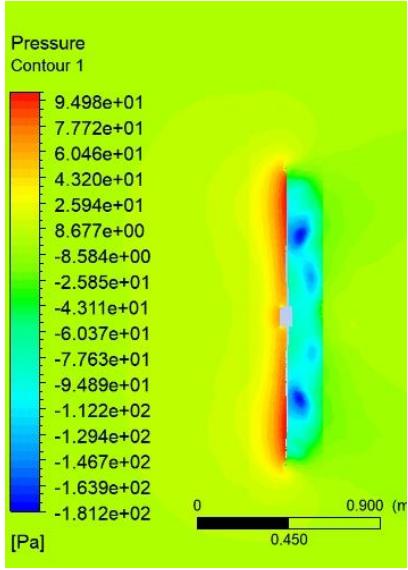
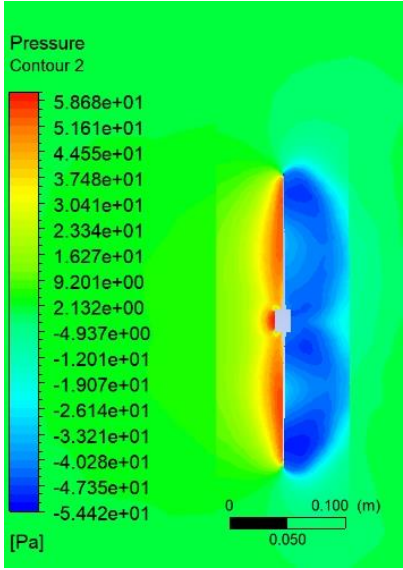
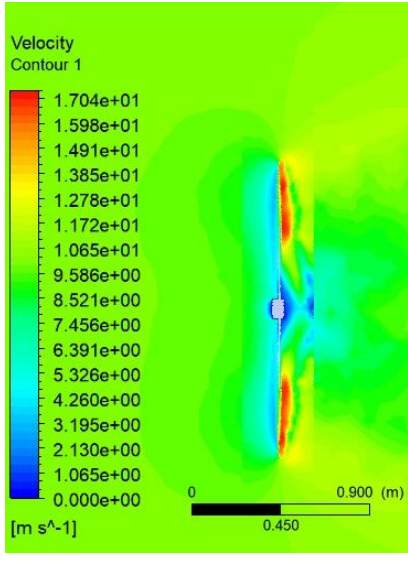
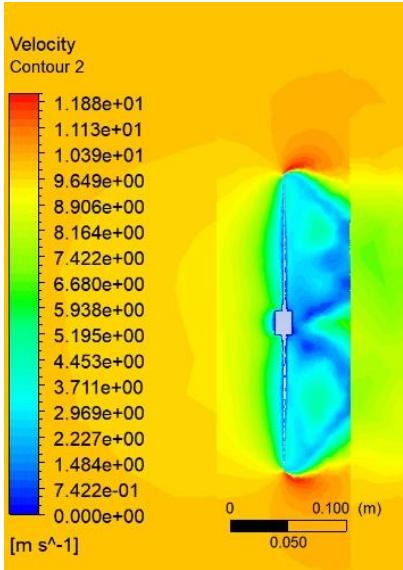
Devir Hızı	Forces (Newton)		Power (Watt)	
	Çap 1.5 m	Çap 0.25 m	Çap 1.5 m	Çap 0.25 m
200 Dev/dk	19.6 N	0.35 N	0.332 W	0.0156 W
600 dev/dk	90.05 N	0.38 N	0.4775 W	0.0529 W
1000 dev/dk	222.65 N	0.5 N	17.4 W	1.0372 W

Uzun çapa sahip pervaneler, daha geniş bir hava kütleini hareket ettirme yeteneğine sahiptir. Bu durum, uçağın ileriye doğru itilmesini sağlar ve bu sayede daha yüksek hızlara ulaşabilir. Ancak, uzun çapa aynı zamanda daha fazla dirençle karşılaşır, bu da daha fazla güç tüketimini gerektirir. Pervanenin ürettiği kuvvetin, enerji tüketimine göre dengeli olması, bir uçağın performansını belirleyen önemli bir unsurdur. Kısa çapa sahip pervaneler ise daha az güç

tüketebilir, ancak ürettikleri kuvvet miktarı sınırlıdır. Bu durum, düşük hızlı uçuşlar veya belirli uçuş koşulları için uygun olabilir. Ancak, genel uçuş performansı ve enerji verimliliği göz önünde bulundurulduğunda, uzun çapa sahip pervaneler daha avantajlı olabilir. En verimli pervane tasarımı belirlerken, üretilen kuvvetle tüketilen güç arasındaki dengeyi sağlamak önemlidir. Yüksek performanslı bir uçak tasarımında, bu dengeyi bulmak, hem hızlı hareket hem de enerji tasarrufu sağlamak açısından kritik bir unsurdur.

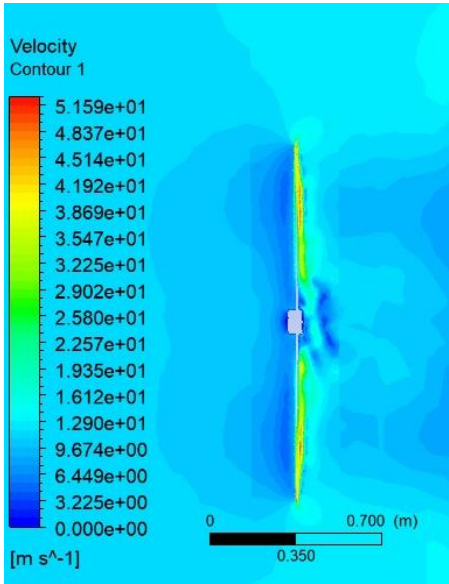
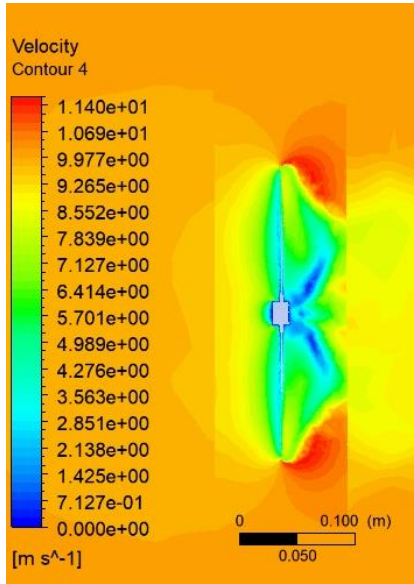
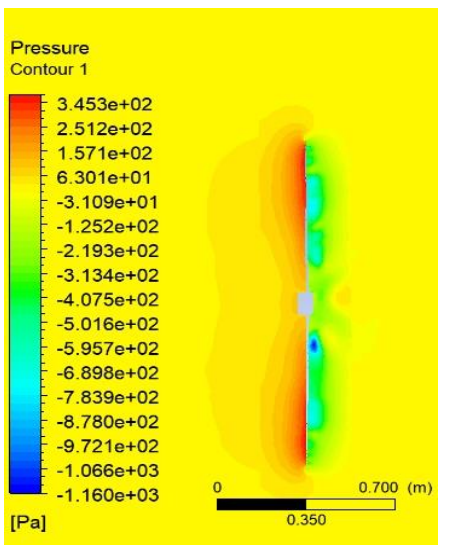
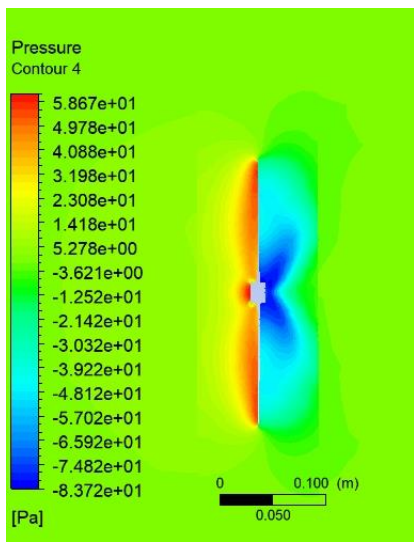
4.SONUÇ VE TARTIŞMA

Tablo 4.1. 200 dev/dk pervanelerin akışkan görüntüleri

	Çap 1.5 m	Çap 0.25 m
Basınç	 <p>Pressure Contour 1</p> <p>9.498e+01 7.772e+01 6.046e+01 4.320e+01 2.594e+01 8.677e+00 -8.584e+00 -2.585e+01 -4.311e+01 -6.037e+01 -7.763e+01 -9.489e+01 -1.122e+02 -1.294e+02 -1.467e+02 -1.639e+02 -1.812e+02</p> <p>[Pa]</p> <p>0 0.900 (m) 0.450</p>	 <p>Pressure Contour 2</p> <p>5.868e+01 5.161e+01 4.455e+01 3.748e+01 3.041e+01 2.334e+01 1.627e+01 9.201e+00 2.132e+00 -4.937e+00 -1.201e+01 -1.907e+01 -2.614e+01 -3.321e+01 -4.028e+01 -4.735e+01 -5.442e+01</p> <p>[Pa]</p> <p>0 0.100 (m) 0.050</p>
Hız	 <p>Velocity Contour 1</p> <p>1.704e+01 1.598e+01 1.491e+01 1.385e+01 1.278e+01 1.172e+01 1.065e+01 9.586e+00 8.521e+00 7.456e+00 6.391e+00 5.326e+00 4.260e+00 3.195e+00 2.130e+00 1.065e+00 0.000e+00</p> <p>[m s⁻¹]</p> <p>0 0.900 (m) 0.450</p>	 <p>Velocity Contour 2</p> <p>1.188e+01 1.113e+01 1.039e+01 9.649e+00 8.906e+00 8.164e+00 7.422e+00 6.680e+00 5.938e+00 5.195e+00 4.453e+00 3.711e+00 2.969e+00 2.227e+00 1.484e+00 7.422e-01 0.000e+00</p> <p>[m s⁻¹]</p> <p>0 0.100 (m) 0.050</p>

Tablo 4.1. de farklı pervanelerin 200 dev/dk döndürülmesi sonucu elde edilen hız ve basınç bilgileri verilmiştir. 0.25 m çapındaki pervane için basınç değeri $6.391e01$ pa olurken, 1.5 m çapındaki pervane için ise $1.681e02$ pa basınç oluşmuştur. Bunların birlikte pervaneler üzerinde oluşan hız bilgileri ise $1.212e01$ ve $1.740e01$ elde edilmiştir.

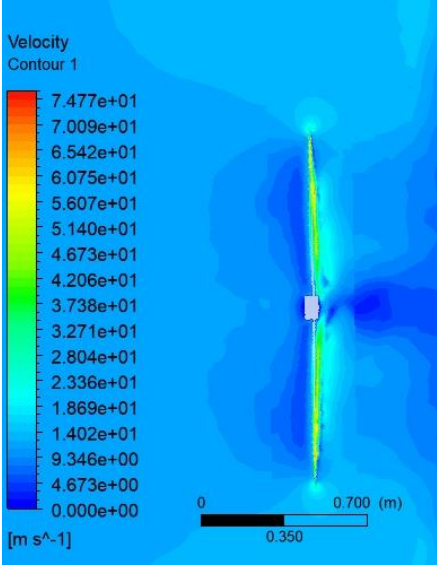
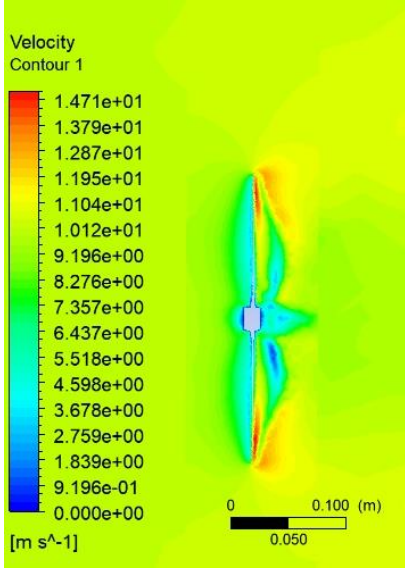
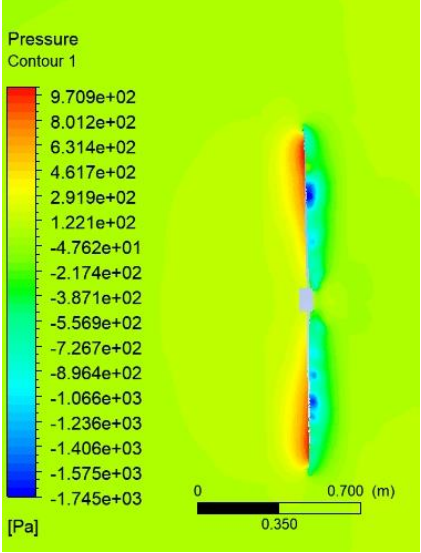
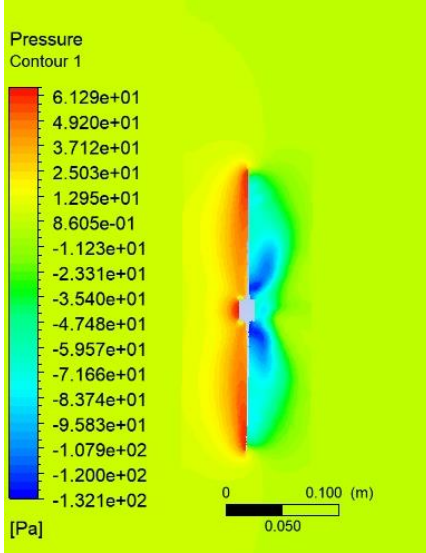
Tablo 4.2. 600 dev/dk pervanelerin akışkan görüntüleri

	Çap 1.5 m	Çap 0.25 m
Hız		
Basınç		

Tablo 4.2. de farklı pervanelerin 600 dev/dk döndürülmesi sonucu elde edilen hız ve basınç bilgileri verilmiştir. 0.25 m çapındaki pervane için basınç değeri $8.664e01$ pa olurken, 1.5 m

çapındaki pervane için ise $9.971e02$ pa basınç oluşmuştur. Bunlar birlikte pervaneler üzerinde oluşan hız bilgileri ise $1.124e01$ ve $5.267e01$ elde edilmiştir.

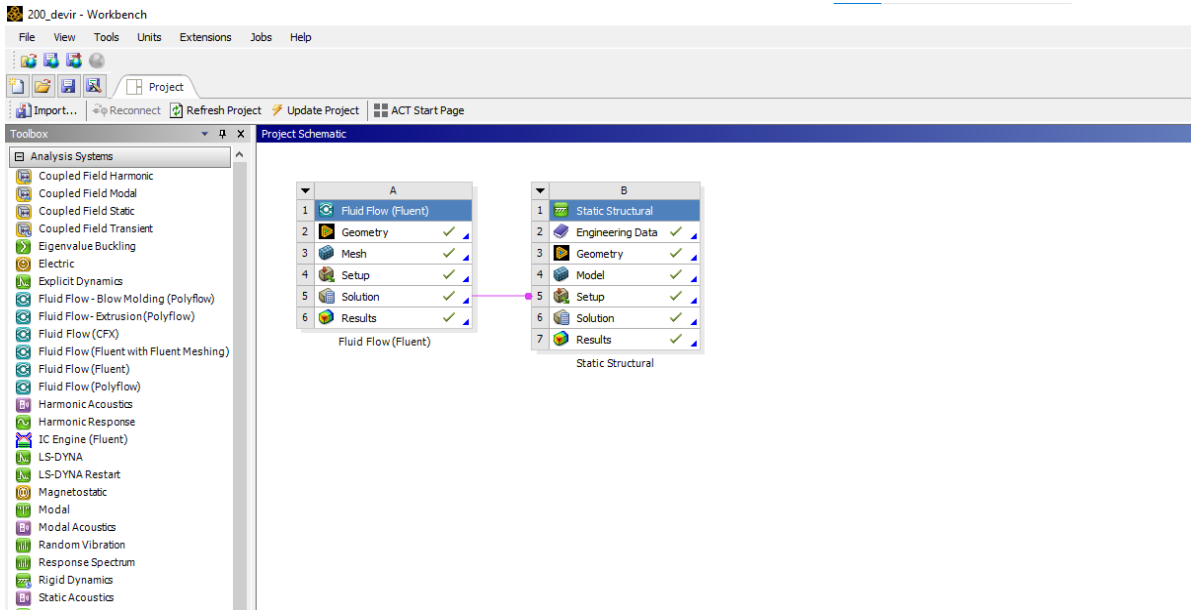
Tablo 4.3. 1000 dev/dk pervanelerin akışkan görüntüleri

	Çap 1.5 m	Çap 0.25 m
Hız		
Basınç		

Tablo 4.3 de farklı pervanelerin 600 dev/dk döndürülmesi sonucu elde edilen hız ve basınç bilgileri verilmiştir. 0.25 m çapındaki pervane için basınç değeri $1.463e02$ pa olurken, 1.5 m çapındaki pervane için ise $2.599e03$ pa basınç oluşmuştur. Bunlar birlikte pervaneler üzerinde oluşan hız bilgileri ise $1.502e01$ ve $7.632e01$ elde edilmiştir.

5. YAPISAL ANALİZ ÇALIŞMALARI

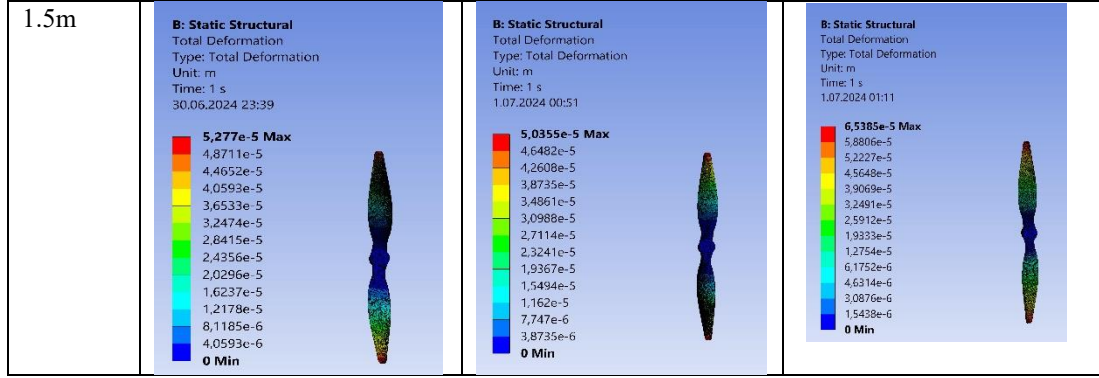
Elde ettiğimiz akış analizi sonuçları, yapısal analizde kullanılmak üzere kuvvetlere dönüştürülmüştür. Yapısal analiz çalışması kapsamında, akış sonucu nozula etki eden basınç kuvvet değeri kuvvet girdisi olarak tanımlanmıştır. Şekil 3 de görüldüğü gibi akışkan analizinin sonuç kısmı, yapısal analiz için girdisi olarak tanımlanmıştır. Burada belirli dönüş hızında döndürülen pervanelerden elde edilen parametre sonuçları ile yapısal analiz verileri birleştirilmiştir[6].



Şekil 5.1. Akışkan ve Yapısal Analiz Birleştirilmesi

Tablo 5.1. Farklı Devir Sayılarında Statik Analiz Verileri (Deformasyon)

Çap	Maksimum Deformasyon (mm)		
	200 Dev/dk	600 Dev/dk	1000 Dev/dk
0.25 m	<p>B: Static Structural Total Deformation Type: Total Deformation Unit: m Time: 1 s 1.07.2024 01:23</p> <p>0,00091594 Max 0,00084549 0,00077503 0,00070457 0,00063411 0,00056366 0,0004932 0,00042274 0,00035229 0,00028183 0,00021137 0,00014091 7,0457e-5 0 Min</p>	<p>B: Static Structural Total Deformation Type: Total Deformation Unit: m Time: 1 s 1.07.2024 01:36</p> <p>0,0048407 Max 0,0044684 0,004096 0,0037236 0,0033513 0,0029789 0,0026065 0,0022342 0,0018618 0,0014895 0,0011171 0,00074473 0,00037236 0 Min</p>	<p>B: Static Structural Total Deformation Type: Total Deformation Unit: m Time: 1 s 1.07.2024 01:53</p> <p>0,012663 Max 0,011689 0,010715 0,0097407 0,0087667 0,0077926 0,0068185 0,0058444 0,0048704 0,0038963 0,0029222 0,0019481 0,00097407 0 Min</p>



Tablo 5.1 de farklı pervanelerin belirli devirlerde elde edilen akışkan analizi sonucu verileri, statik analize aktarılmış ve elde edilen maksimum deformasyon verileri verilmiştir. 0.25 m çapındaki pervane için 200 dev/dk da $5.277e-5$ mm deformasyon gözlenirken, 0.5 m çapındaki pervane için $9.1633e-4$ mm oluşmuştur. Bununla birlikte 600dev/dk ve 1000 dev/dk gibi daha yüksek devirlerde özellikle pervane uçlarında daha yüksek deformasyonlar görülmüştür.

Tablo 5.2. Farklı Devir Sayılarında Statik Analiz Verileri (Ömür)

Çap	Maksimum Ömür (gün)		
	200 Dev/dk	600 Dev/dk	1000 Dev/dk
0.25 m	<p>B: Static Structural Life Type: Life 1.07.2024 01:24</p> <p>1,1574e+12 Max 1,1574e+12 Min</p>	<p>B: Static Structural Life Type: Life 1.07.2024 01:36</p> <p>1e8 Max 1e8 Min</p>	<p>B: Static Structural Life Type: Life 1.07.2024 01:54</p> <p>1,1574e+12 Max 1,1574e+12 Min</p>
1.5 m	<p>B: Static Structural Life Type: Life 30.06.2024 23:52</p> <p>2,7778e+13 Max 2,7778e+13 Min</p>	<p>B: Static Structural Life Type: Life 1.07.2024 00:52</p> <p>2,7778e+13 Max 2,7778e+13 Min</p>	<p>B: Static Structural Life Type: Life 1.07.2024 01:12</p> <p>1e8 Max 1e8 Min</p>

Tablo 5.2 da malzeme olarak alüminyum seçilen pervaneler için farklı devir sayılarında elde edilecek çalışma ömürleri hakkında detaylı veriler açıklanmıştır. Devir sayıları arttıkça malzeme ömrü giderek azalmaktadır. Örneğin 0.25 m çapındaki pervane 200 dev/dk da $2.7778e+13$ elde ederken 1000 dev/dk da ise $1e8$ e düşmüştür.

6. SONUÇ

Yüksek devirde dönen pervaneler, havayı etkili bir şekilde sürükleyerek çeşitli endüstriyel ve taşımacılık uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, bu yüksek devirlerdeki pervanelerin maruz kaldığı deformasyon olayları, pervanelerin performansını ve ömrünü etkileyebilecek önemli bir faktördür. Bu makalede, pervane tasarımındaki çeşitli faktörlerin deformasyon üzerindeki etkileri incelenmiş ve bu bağlamda önemli gözlemler elde edilmiştir. Öncelikle, yüksek devirlerde dönen pervanelerin deformasyon eğilimleri daha düşük devirde dönen pervanelere göre daha belirgin hale gelir. Bu durum, pervane malzemesinin maruz kaldığı yüklerin artmasıyla doğrudan ilişkilidir. Aynı devirde dönen pervanelerde ise, uzun çapa sahip olan pervanelerde kısa çapa sahip olanlara göre daha fazla deformasyon gözlemlenir. Bu durum, pervanenin uzunluğunun deformasyon üzerindeki etkilerini vurgular. Deformasyonun pervane ömrü üzerindeki etkileri de önemlidir. Daha fazla deformasyona maruz kalan pervaneler, ömür analizi sonuçlarında daha kısa bir ömür süresine sahip olacaktır. Bu durum, pervane tasarımında deformasyonu minimize etmenin, ömrü artırıcı bir faktör olduğunu göstermektedir. Aynı devirde dönen pervanelerin karşılaştırılmasında, uzun çapa sahip pervanelerin kısa çapa sahip pervanelere göre daha büyük gerilim ve elastik gerinim değerlerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu, uzun çapa sahip pervanelerin malzeme mukavemet sınırlarını daha fazla zorladığını ve bu nedenle daha yüksek gerilimlere maruz kaldığını gösterir. Sonuç olarak, pervane tasarımında devir, çapa uzunluğu ve malzeme seçimi gibi faktörlerin deformasyon üzerinde belirleyici etkileri bulunmaktadır. Bu faktörlerin dikkate alınması, pervane performansını optimize etme ve ömrünü uzatma açısından önemlidir. Bu çalışma, yüksek devirde dönen pervanelerin deformasyon özelliklerini anlamak ve bu anlayışı tasarım iyileştirmelerine yönlendirmek adına önemli bir katkı sağlamaktadır.

KAYNAKÇA

- [1] Oktay, T., & Eraslan, Y. (2020, June). Computational fluid dynamics (Cfd) investigation of a quadrotor UAV propeller. In International Conference on Energy, Environment and Storage of Energy (pp. 1-5).
- [2] Seenı, A. (2019). Aerodynamic Performance Characterization of Slotted Propeller: Part B Effect of Angle. INCAS Bulletin, 11(4), 155-170.
- [3] Zhang, B., Song, Z., Zhao, F., & Liu, C. (2022). Overview of propulsion systems for unmanned aerial vehicles. Energies, 15(2), 455. [4] Cummings, D. (1973). Numerical Prediction of Propeller Characteristics. Journal of Ship Research, 17, 12-18. <https://doi.org/10.5957/JSR.1973.17.1.12>.
- [5] Wald, Q. R. (2006). The aerodynamics of propellers. Progress in Aerospace Sciences, 42(2), 85-128. Fratello, G., Favier, D., & Maresca, C. (1988).

- [6]Fratello, G., Favier, D., & Maresca, C. (1991). Experimental and numerical study of the propeller/fixed wing interaction. *Journal of AIRCRAFT*, 28(6), 365-373.
- [7]Asnaghi, A., Svennberg, U., & Bensow, R. E. (2018). Numerical and experimental analysis of cavitation inception behaviour for high-skewed low-noise propellers. *Applied Ocean Research*, 79, 197-214.
- [8]Wang, L., Luo, W., & Li, M. (2022). Numerical investigation of a propeller operating under different inflow conditions. *Physics of Fluids*, 34(10).
- [9]Xu, H. Y., Ye, Z. Y., & Shi, A. M. (2012). Numerical study of propeller slipstream based on unstructured dynamic overset grids. *Journal of Aircraft*, 49(2), 384-389.
- [10]Morgado, J., Abdollahzadeh, M., Silvestre, M. A. R., & Páscoa, J. C. (2015). High altitude propeller design and analysis. *Aerospace Science and Technology*, 45, 398-407.
- [11]Xiang, S., Liu, Y. Q., Tong, G., Zhao, W. P., Tong, S. X., & Li, Y. D. (2018). An improved propeller design method for the electric aircraft. *Aerospace Science and Technology*, 78, 488-493.
- [12]Tang, E., & Chung, S. J. (2022). Rapid extraction of propeller geometry using photogrammetry. *International Journal of Micro Air Vehicles*, 14, 17568293221132044.
- [13]Sawale, A., Archana, D., & Seshank, C. (2018, December). Design and analysis of propeller. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 455, No. 1, p. 012018). IOP Publishing.
- [14]Gur, O., & Rosen, A. (2005). Propeller performance at low advance ratio. *Journal of aircraft*, 42(2), 435-441.
- [15]Laitone, E. V. (2000). Fixed-pitch propeller selection for light airplanes. *Journal of Aircraft*, 37(3), 390-395.
- [16]De Young, J. (1965). Propeller at high incidence. *Journal of Aircraft*, 2(3), 241-250.
- [17]Czyż, Z., Karpiński, P., Skiba, K., & Wendeker, M. (2021). Wind tunnel performance tests of the propellers with different pitch for the electric propulsion system. *Sensors*, 22(1), 2.
- [18]Cruzatty, C., Sarmiento, E., Valencia, E., & Cando, E. (2022). Design methodology of a UAV propeller implemented in monitoring activities. *Materials Today: Proceedings*, 49, 115-121.
- [19]Rajendran, P., & Jayaprakash, A. (2023). Numerical performance analysis of a twin blade drone rotor propeller. *Materials Today: Proceedings*, 80, 492-498.
- [20]Catalano, P., & Amato, M. (2003). An evaluation of RANS turbulence modelling for aerodynamic applications. *Aerospace science and Technology*, 7(7), 493-509.
- [21]Kwak, E. K., Lee, N. H., Lee, S. S., & Park, S. I. (2012). Performance evaluation of two-equation turbulence models for 3D wing-body configuration. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 13(3), 307-316.
- [22]Egorov, Y., & Menter, F. (2008, January). Development and application of SST-SAS turbulence model in the DESIDER project. In *Advances in Hybrid RANS-LES Modelling: Papers contributed to the 2007 Symposium of Hybrid RANS-LES Methods*, Corfu, Greece, 17-18 June 2007 (pp. 261-270). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.



APPLICATIONS OF HUMAN PLACENTAL CHORION-INDUCED PLURIPOTENT CELLS FOR TISSUE ENGINEERING

**Sude Naz Çataltepe^{1,a}, Nigar Sahra Karabul^{1,b}, Yağmur Kırbayır^{1,c}, Hatice Bashir^{1,d},
Pelin Saraçoğlu^{2,e}, Murat Ihlamur^{f,*}**

¹Biruni University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Molecular Biology and Genetics

²Yıldız Technical University, Graduate School of Science And Engineering, Department of Bioengineering

³Biruni University, Vocational School, Department of Electronics and Automation

^asudenazcattaltepe1@gmail.com, ORCID: 0009-0009-0441-5696

^bnigarsaharakarabul@gmail.com, ORCID: 0009-0009-5188-3986

^cyagmurkrbyr@gmail.com, ORCID: 0009-0007-0240-7284

^dhtcbshr@gmail.com, ORCID: 0009-0007-3495-4629

^epelinsaracogluu@gmail.com, ORCID:0000-0002-9701-4286

^fihlamurmurat@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0458-5638

ABSTRACT

Stem cells, which have an enormous capability for self-renewal and can transform into many diverse cell types in the body early in life and during growth, have been heavily researched in recent years. Stem cells are specialized cells that can regenerate and repair damaged or diseased organs in humans. They are employed in regenerative medicine and tissue engineering. Thus, beneficial outcomes have been observed in the treatment of many disorders and faulty tissues. Mesenchymal stem/stromal cell lines (abbreviated as MSCs) isolated from fetal and adult tissues are of considerable interest for use in tissue engineering and cell therapeutics, thanks to their ability to migrate, regenerate, and repair injured sites. In this review study, induced pluripotent stem cells were derived from human placental chorion to advance tissue engineering technologies and investigate therapeutic approaches to various disorders.

Keywords: Stem cell, Human Placental Chorion, Tissue Engineering, iPSC, CMSC

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

Atf (Citation): Çataltepe, S.N., Karabul, N.S., Kırbayır, Y., Bashir, H., Saraçoğlu, P., Ihlamur, M., "Applications of Human Placental Chorion-Induced Pluripotent Cells for Tissue Engineering", UMÜFED Uluslararası Batı Karadeniz Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 6(2): ss. 93-104, 2024

Geliş (Received): 19.08.2024

Kabul (Accepted): 30.12.2024

Yayın (Published): 31.12.2024

DOKU MÜHENDİSLİĞİ İÇİN İNSAN PLASENTAL KORYONUNDAN GELİŞTİRİLEN PLURİPOTENT HÜCRELERİN UYGULAMALARI

ÖZET

Yaşamın erken dönemlerinde ve büyüme sırasında vücutta çok çeşitli hücre tiplerine dönüşebilen ve kendini yenileme konusunda muazzam bir yeteneğe sahip olan kök hücreler son yıllarda yoğun bir şekilde araştırılmıştır. Kök hücreler, insanlarda hasarlı veya hastalıklı organları yenileyebilen ve onarabilen özel hücrelerdir. Kök hücreler rejeneratif tıp ve doku mühendisliği için kullanılır. Bu nedenle, birçok rahatsızlığın ve hatalı dokunun tedavisinde faydalı sonuçlar gözlemlenir. Fetal ve yetişkin dokulardan izole edilen mezenkimal kök/stromal hücre hatları (kısaca MSC'ler), göç etme, yenilenme ve yaralı bölgeleri onarma yetenekleri sayesinde doku mühendisliği ve hücre terapötiklerinde kullanım için önemli ilgi görmektedir. Bu inceleme çalışmasında, doku mühendisliği teknolojilerini ilerletmek ve çeşitli rahatsızlıklara yönelik terapötik yaklaşımları araştırmak için insan plasenta koryonundan indüklenmiş pluripotent hücreler türetilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kök hücre, İnsan Plasenta Koryonu, Doku Mühendisliği, iPSC, CMSC

1. INTRODUCTION

Stem cells are sources of cells in multicellular organisms that are partially differentiated or undifferentiated, self-replicating, able to survive for long periods, and live in microenvironments called niches, specialized structures that contributes to the continued existence of stem cells [1]. Under normal conditions in tissues, these cells maintain their population and provide tissues with new functional properties. Stem cells have an extraordinary potential for self-renewal. During early embryonic development and growth, they can differentiate into numerous distinctive cell types within the body. These cells divide symmetrically and asymmetrically in an unlimited manner, as there is no Hayflick limit. As a result of serial division, clonogenicity leads to the generation of either stem cells or committed/differentiating cells. In addition, although it is accepted that there is no Hayflick limit in stem cells, these cells cannot be passaged for long periods in the laboratory because they begin to differentiate as the passage number increases. This differentiation has led to the

classification of stem cells into to five categories: pluripotent, totipotent, multipotent, unipotent, and oligopotent stem cells [2]. Totipotent cells are embryonic stem cells capable of producing all parts of the human body, including placental, fetal, and embryonic tissues as well as extraembryonic tissues. A human zygote is created when an egg and sperm combine. During the morula stage of embryonic development, the newly formed zygote's cells divide and continue to be totipotent. The cleavage phase of this embryonic stage lasts from one to six days. A grape cluster shape with 8 cells is visible at the morula stage. A blastocyst, with a distinctly characterized inner cell mass, a fluid-filled blastocoele, and a layer of trophoblasts is then formed from the morula. Cells in the blastocyst state lose their totipotency. Clinically, the best evidence of the differentiation of totipotent cells into different lineages is seen in the evolution of dichorionic-diamniotic monozygotic twins [3, 4].

Pluripotent stem cells, a type of embryonic stem cells, are stem cells that cannot differentiate into extraembryonic tissues but can differentiate into any of the endoderm, ectoderm, and mesoderm germ layers. Since they can produce cell lines originating from any of the three germ layers, they can give rise to all fetuses. Yamanaka and Takahashi (2006) were the first to demonstrate how adult somatic cells, such as fibroblastas, can be made pluripotent. In their study, the scientists were able to change the behavior of mouse skin fibroblasts to resemble that of embryonic stem cells [5]. Takahashi and Yamanaka conducted a similar investigation on human cells in 2007 [6]. It was long believed that a specialized or mature cell could not revert to a young state. Yamanaka et al. 24 potential genes involved in reprogramming somatic cells toward pluripotency. Many of the candidates' retroviral transduction did not alter the cell in any way. Nevertheless, some colonies diverged from their fibroblast characteristics and became similar to embryonic stem cells. Among the 24 genes, only four - *KLF4, SOX2, OCT3/4, and c-MYC* - can induce ectopic expression and reprogram the cell to be similar to resemble embryonic stem cells, both physically and functionally. The placenta, a unique and temporary fetomaternal organ, has gained attention as a significant and valuable source of stem cells. Immature hematopoietic progenitors and hematopoietic stem cells can be detected in the placenta, a considerably vascularized hematopoietic tissue [7].

The placenta is a mammalian organ that connects the fetus to the uterine wall, while the umbilical cord connects the fetus to the placenta. After fertilization, the inner cell mass of the blastocyst differentiates into hypoblasts and epiblasts. The hypoblast produces the placenta's

umbilical cord and vessels, whereas the epiblast produces the placenta's amniotic membrane or inner layer, as well as the fetus. The amniotic membrane, also known as the amnion, is composed of mesenchymal-like cells that form an epithelial layer that surrounding the amniotic cavity. The outer layer of blastocyst, or trophoctoderm, produces trophoblasts, which form the chorionic membrane of the uterine wall or the outer layer placenta [8].

The chorion is the outer layer of the human extraembryonic fetal membrane that connects the growing fetus to the maternal tissues during pregnancy. The chorionic membrane is in proximity to the decidua and is separated from the amniotic membrane by a layer of spongy collagen fiber. During the first trimester of pregnancy, the chorion rapidly proliferates, forming multiple chorionic villi that eventually grow into the placenta. Because the formation of additional embryonic tissues occurs shortly after implantation, the cells remain immature as the entire embryo develops. Thus, the placenta and umbilical cord, which were previously discarded at birth, are now recognized as a valuable source of stem cell-like plasticity [9].

Mesenchymal stromal/stem cells (MSCs), isolated from adult tissues and fetal tissues like chorion, are of considerable interest for application in cell therapeutics and tissue engineering due to their ability to migrate, regenerate, and repair injured sites. Mesenchymal stromal cells are obtained from the trophoblastic and chorionic mesenchymal regions of the chorion. For this reason, they are divided into two subclasses: chorionic villous/placental mesenchymal stem/stromal cells (PMSCs) and chorionic mesenchymal stem/stromal cells (CMSCs). To separate MSCs from the chorionic membrane (CMSC), the tissue is initially treated with dispase to remove the trophoblastic layer and then digested with a collagenase/DNase or collagenase mixture [10]. According to Portmann-Lanz (2006), chorion-derived mesenchymal cells display superior differentiation capacity compared to amnion-derived cells in terms of chondrogenic, osteogenic, myogenic, and neurogenic processes. The chorion is derived from the trophoblast, while the amnion is obtained from the embryoblast, the internal layer of the blastocyst [11].

Chorionic mesenchymal stromal cells (CMSCs) appear from the first trimester of pregnancy to late gestation. Human chorionic cells can be effortlessly produced and cultured from a microscopic sample in the primary culture. CMSCs can differentiate into osteoblasts, myofibroblasts, adipocytes, nerve-like cells, and hepatocytes. They can also transform into cardiomyocytes, hepatocytes, or endothelial cells. CMSCs are specialized as placental MSCs,

despite enhanced expression and their variability of pluripotent markers, according to criteria defined by the International Workshop on Placenta-Derived Stem Cells. These cells can be successfully reprogrammed. They have enhanced immunomodulatory capabilities and epigenetic memory resembling that of pluripotent cells, which may be valuable for allogeneic approaches [12].

In regenerative medicine, stem cells are used to repair and rebuild the body's damaged tissues and organs. Regenerative medicine is one of the most advanced medical treatment that can replace or restore tissues and organs devastated by age, illness, or trauma, as well as normalize inborn malformations. Thus, promising preclinical and clinical data show that regenerative medicine is being used to treat diseases affecting a wide variety of organ systems and ligaments, including chronic and acute injuries, dermal wounds, cardiovascular diseases, cancer treatments, and more. Barriers to conventional therapies for treating organ and tissue failure and loss, such as grafting of healthy tissues and organs, limited donor availability, and severe immunological problems, can be overcome the use of regenerative medicine approaches. Tissue engineering is a critical component of regenerative medicine for tissue repair [13].

Tissue engineering is a scientific field that focuses on the development of scaffolds used as biomaterials that provide a 3-dimensional (3D) culture medium suitable for biological application that can replace diseased or damaged tissue in humans. Its primary purpose is to propose novel approaches for ensuring the proper functioning of bodily tissues and organs and promoting health, particularly when disorders arise within them. However, it does more than simply regenerate injured or diseased tissue; it also influences cell fate and seeks new diagnostic techniques. Tissue engineering combines biological compounds, such as growth and cell factors, with engineering techniques and synthetic materials [14]. These treatments incorporate autologous or allogeneic cells that have differentiated and are still reproducing. The scaffold is incubated in growth factor-containing conditions, which stimulate cell growth and division, and as the cell expand, replacement tissue forms. The scaffold can then be grafted into the human body and subsequently resorbed or eliminated [15].

In the 1960s and 1970s, the fields of tissue engineering and regenerative medicine focused on grafting somatic cells to the sites of a lesion to fill the crucial space between the increasing number of patients on the waiting list for organ transplants and the limited availability of donated organs. However, these efforts were largely unsuccessfully. Later, with

the development of biomaterial scaffolds, biomimetic environments that enhance cell maintenance and differentiation were produced and widely used in this field. By creating structures that resemble natural tissues, these methods provide an alternative solution. Four key elements need to be considered to create a tissue engineering plan. The cells must be able to restore the tissue's functionality. For instance, SCs and bone tissue cells must be capable of differentiating into bone cells if they are to be used for bone regeneration [15].

The culture medium should include all of the cytokines and growth factors required to encourage cell differentiation into the target cells, to promote proliferation and expansion, and to keep the desired cells alive and performing their expected functions in the tissue. The porous matrix should imitate the tissue's extracellular matrix, allowing cells to penetrate and regenerate the damaged tissue. It must possess the desired physical and chemical properties and be composed of biocompatible, bioabsorbable, and biodegradable components that promote cell growth. Finally, the bioreactor must imitate physiological conditions, providing optimal circumstances for cell proliferation and proper distribution in the scaffold [16,17].

Somatic cells, such as osteoblasts and chondrocytes, were among the earliest cell types exploited in tissue engineering applications. Adult tissue-derived stem cells, particularly MSCs, have shown promise in cell treatments and therapeutic applications due to their growth and multipotency. Cartilage, heart, bone tissue, and skin, which are candidate tissues for tissue engineering, scaffolds, and bio-artificial tissues are being investigated for use in the manufacture of bio-implanted limbs. The first successful demonstration of such a limb, a mouse leg with working muscles and arteries, was announced in 2015 [18]. Following the first developments in 3D printing, which Charles W. Hull referred to as "stereolithography" at the beginning of the 1980s, new techniques and methods for manufacturing 3D objects have emerged. These techniques are now being utilized for education, research, and even clinical practice. Initially, stereolithography was known as Photo-Doping. Resin printing, or optical production, was used to produce 3D objects by consecutively printing small layers of an ultraviolet-engineered substance. Since then, various production methods have been devised to automate the creation of individualized, machine-modeled tissue clones and organs [19].

In general, biofabrication is the process of creating bioactive chemicals, biomaterials, living cells, cell aggregates like microtissues, and hybrid cell-material structures using bioprinting or biomontage to create physiologically functioning products with structural

organization. Bioprinting is the process of using computer-aided transfer and manufacturing procedures for placing biochemicals, biological materials, and living cells to construct bioengineered structures of biological and biologically derived materials. The study reveals that using a layer-by-layer method with 3D printing for manufacturing tissue with structural control ranging from micro- to macro-scale has considerable potential [20]. The objective of 3D printing scaffold-free or scaffold-supported tissue engineering constructs is to create a biomimetic structural environment that supports host tissue integration and enables the development of new tissue (e.g., cellular infiltration, vascularization, and active remodeling). The integration of biomimetic elements into a bioprinted structure influences the adhesion, migration, growth, and functionality of both internal and external cells in a dynamic manner. Materials greatly influence the size, shape, and attachment of cells; therefore, a scaffold can regulate cell proliferation and differentiation [21].

There are several therapeutic options for stem cells. The most traditional and widely utilized multipotent stem cell therapy is hematopoietic stem cell transplantation [22]. Peripheral blood, cord blood, and bone marrow are the sources of stem cells. The patient's own cells are transplanted for specific therapeutic purposes. However, leukemia and other hematologic malignancies, such as bone marrow dysfunction are now frequently treated by allogeneic stem cell transplantation. The utilization of bone marrow transplants has greatly increased as a result of new immune-related research. Therefore, it is now possible to prevent graft-versus disease, which results in tissue incompatibility in recipients of allogeneic stem cell transplants. Therefore, cells from the patient should be utilized in new stem cell therapies, but the absence of such cells won't be a concern. Numerous scientists have tried to produce hESCs from a person's original somatic cells through nuclear transfer due to ethical concerns about using human embryos to develop pluripotent stem cells, as well as issues such as immunological rejection after transplantation. When Dolly the Sheep was cloned using nuclear transfer in 1996, this technique became more well-known [23].

These days, human disease pathophysiological pathways are studied using iPSCs as *in vitro* models. The iPSC approach has been beneficial for researching the pathophysiology of neurological diseases in humans, which is challenging to investigate due to the inaccessibility of nervous tissue. Under specific conditions, somatic cells from organs like the liver, fat, and blood have been transformed into iPSCs. Given its extraembryonic nature and ability to

reprogram induced pluripotent stem cells, the placenta—an organ that is removed at birth—has been the subject of much research. PMEDSAH, a synthetic polymer matrix, can successfully create new human iPSC lines from fetal chorionic mesenchyme cells that grow continuously under feeder-free culture conditions [24, 25].

Differentiated cell types derived from CMSC-iPSCs, can be used to test pharmaceuticals for newborns with congenital defects and to model disease. Since many pediatric diseases, such as congenital heart disease, pulmonary hypoplasia, and development brain disorders, are identified during pregnancy, these models can be used for ongoing research after the child is born. Pediatric neurological disorders such as neonatal hypoxic-ischemic encephalopathy, cerebral palsy, spina bifida, hypoplastic left heart syndrome, and fulminant liver failure, may be addressed by purified differentiated cell populations derived from CMSC-iPSCs *in vitro* [26, 27]. Another study found that 3B placental buds derived from iPSCs successfully differentiated into several trophoblast lineages, including cytotrophoblast-like, syncytiotrophoblast-like, and extravillous trophoblast-like cells, through the formation of structured layers. They were then administered to immune-deficient animals. The study yielded a success rate of 22%. This model may be useful for studying the pathophysiology and potential therapies of placental dysfunction [28]. Because they may replace animal models and have physiologic relevance, hiPSC-derived trophoblast models are a vital alternative to cell lines in placenta-on-chip systems. They can also be used to create patient-specific models. The feasibility of using trophoblasts grown from hiPSCs to produce a functional syncytium layer in placenta-on-chip devices was demonstrated by another study. This work offers a crucial resource that may be further investigated to enhance placental barrier models in addition to insights into the impact of the microfluidic environment on hiPSC-derived trophoblast models [29].

Placenta-on-a-chip systems have been developed recently. While they present intriguing potential for placental barrier modeling, they are not suited for high-throughput research because they lack include physiologically realistic trophoblasts. This was made possible by a study that developed a placental barrier model by putting trophoblasts grown from hiPSCs into a microfluidic device. HiPSC-derived trophoblasts developed a three-dimensional structure that exhibited fusogenic and endocrine activity, placental carriers, and invasive behavior when grown in a microchannel perfused with a collagen-based matrix. These results

demonstrate that it is possible to generate a differentiated primitive syncytium from hiPSCs on a microfluidic substrate. This discovery provides a substantial resource for enhancing placental barrier models, advancing research and therapeutic assessment in pregnancy, and broadening the breadth of uses for hiPSC-derived trophoblasts [8].

2. CONCLUSION AND PERSPECTIVES

The science of tissue engineering is dynamic and self-renewing, offering potential therapeutic benefits for a range of illnesses. This study investigated the role of human chorion cells in tissue engineering. Multipotent hCMSCs hold great promise for fetal tissue engineering and regenerative medicine research, as they share nearly the same features as human ESCs. Their use in regenerative medicine is supported by their low immunogenicity, immunomodulatory qualities, and in vitro differentiation capacity. This is especially relevant in allogeneic transplantation settings and for diseases where immunomodulatory properties may have therapeutic effects, such as in cases of inflammation.

The placenta is also a highly desirable tissue, as it is typically discarded after birth making it abundant. Additionally, obtaining it is safe, non-invasive, and presents no ethical issues [30]. Placental studies can provide further insight into reprogramming potential of extra-embryonic tissues related to human generation. Compared to other types of stem cells, multipotent hCMSCs offer several unique advantages. First of all, fetal progenitors, which are more versatile and have shorter telomeres than adult cells, can be used to create hCMSCs. Large volumes of growth variables are produced by hCMSCs, which also function as potent paracrine modulators that are resistant to carcinogenesis. A significant numbers of essential hCMSCs can be produced, which may be important for the development of pharmaceuticals.

It is clear from this review that placental chorion cells hold significant potential for tissue engineering. Additionally, this work proposes using placental chorion cells as a substitute source for the induction of pluripotent stem cells from fetal-derived somatic tissues. This approach may expand access to a larger cell supply while reducing the moral and practical challenges related to the use of embryonic stem cells. Using these cells could accelerate the development of patient-specific medications, offering more attractive and cost-effective treatment alternatives.

Further research on this topic of study is necessary. To fully comprehend placental chorion cells' tissue compatibility, separation ability, and long-term impacts, additional studies are needed. Moreover, it remains unclear whether these cells' advantages in reducing inflammation and promoting repair/regeneration result from their isolation or from paracrine effects on surrounding tissue. Incorporating these cells into therapeutic contexts will require more preclinical and clinical considerations. This important information will surely aid in the successful creation of advantageous treatments based on the utilization of placental cell transplantation, as well as showing the safety and effectiveness of the procedure.

REFERENCES

- [1] Ihlamur, M., Kelleci, K., Zengin, Y., Allahverdiyev, M.A., Abamor, E., (2024). Applications of Exosome Vesicles in Different Cancer Types as Biomarkers. *Curr Mol Med*, 24(3), 281-97.
- [2] Ihlamur, M., Akgul, B., Zengin, Y., Korkut, Ş.V, Kelleci, K., Abamor, E.Ş., (2024) The mTOR Signaling Pathway and mTOR Inhibitors in Cancer: Next-generation Inhibitors and Approaches. *Current Molecular Medicine*, 24(4).
- [3] Zakrzewski, W., Dobrzyński, M., Szymonowicz, M., Rybak, Z., (2019). Stem cells: past, present, and future. *Stem Cell Res Ther*, 10(1), 68.
- [4] Tian, Z., Yu, T., Liu, J., Wang, T., Higuchi, A., (2023). Introduction to stem cells. *Prog Mol Biol Transl Sci*, 199:3-32.
- [5] Takahashi, K., Yamanaka, S. (2006). Induction of pluripotent stem cells from mouse embryonic and adult fibroblast cultures by defined factors. *Cell*, 126(4), 663-676. (a)
- [6] Takahashi, K., Tanabe, K., Ohnuki, M., Narita, M., Ichisaka, T., Tomoda, K., Yamanaka, S. (2007). Induction of pluripotent stem cells from adult human fibroblasts by defined factors. *Cell*, 131(5), 861-872. (b)
- [7] Dzierzak, E., Robin, C., (2010). Placenta as a source of hematopoietic stem cells. *Trends Mol Med*, 16(8), 361-7.
- [8] Karvas, R. M., Khan, S. A., Verma, S., Yin, Y., Kulkarni, D., Dong, C., Park, K. M., Chew, B., Sane, E., Fischer, L. A., Kumar, D., Ma, L., Boon, A. C. M., Dietmann, S., Mysorekar, I. U., Theunissen, T. W. (2022). Stem-cell-derived trophoblast organoids model human placental development and susceptibility to emerging pathogens. *Cell Stem Cell*, 29(5), 810-25.e8.

- [9] Cai, J., Li, W., Su, H., Qin, D., Yang, J., Zhu, F., Xu, J., He, W., Guo, X., Labuda, K., Peterbauer, A., Wolbank, S., Zhong, M., Li, Z., Wu, W., So, K. F., Redl, H., Zeng, L., Esteban, M. A., Pei, D. (2010). Generation of human induced pluripotent stem cells from umbilical cord matrix and amniotic membrane mesenchymal cells. *J Biol Chem*, 285(15), 11227-34.
- [10] Koo, B. K., Park, I. Y., Kim, J., Kim, J. H., Kwon, A., Kim, M., Kim, J. H. (2012). Isolation and characterization of chorionic mesenchymal stromal cells from human full term placenta. *J Korean Med Sci*, 27(8), 857-863. (c)
- [11] Portmann-Lanz, C. B., Schoeberlein, A., Huber, A., Sager, R., Malek, A., Holzgreve, W., Surbek, D. V. (2006). Placental mesenchymal stem cells as potential autologous graft for pre- and perinatal neuroregeneration. *Am J Obstet Gynecol*, 194(3), 664-73.
- [12] Chen, L., Merkhan, M.M., Forsyth, N.R., Wu, P., (2019). Chorionic and amniotic membrane-derived stem cells have distinct, and gestational diabetes mellitus independent, proliferative, differentiation, and immunomodulatory capacities. *Stem Cell Res*, 40, 101537.
- [13] Han, F., Wang, J., Ding, L., Hu, Y., Li, W., Yuan, Z., Guo, Q., Zhu, C., Yu, L., Wang, H., Zhao, Z., Jia, L., Li, J., Yu, Y., Zhang, W., Chu, G., Chen, S., Li, B. (2020). Tissue Engineering and Regenerative Medicine: Achievements, Future, and Sustainability in Asia. *Front Bioeng Biotechnol*, 8, 83.
- [14] Dzobo, K., Thomford, N. E., Senthebane, D. A., Shipanga, H., Rowe, A., Dandara, C., Motaung, K. (2018). Advances in Regenerative Medicine and Tissue Engineering: Innovation and Transformation of Medicine. *Stem Cells Int*, 2018, 2495848. (d)
- [15] Olson, J.L., Atala, A., Yoo, J.J., (2011). Tissue engineering: current strategies and future directions. *Chonnam Med J*, 47(1), 1-13.
- [16] Tonelli, F., Paiva, Nd.C., Medeiros, R., Cunha Xavier Pinto, M., Tonelli, F., Resende, R.R., (2017). Tissue Engineering, 315-24.
- [17] Ihlamur, M., Akgül, B., Abamor, E.Ş. (2022). Farklı Hücre Hatlarında Besiyeri ve FBS'in Hücre Proliferasyonu Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. Süleyman Demirel University Faculty of Arts and Science Journal of Science, 17(1), 55-64.
- [18] Hutmacher, D. W. (2000). Scaffolds in tissue engineering bone and cartilage. *Biomaterials*, 21(24), 2529-2.543. doi:10.1016/s0142-9612(00)00121-6. (e)

- [19] Aimar, A., Palermo, A., Innocenti, B., (2019). The Role of 3D Printing in Medical Applications: A State of the Art. *J Healthc Eng*, 2019, 5340616.
- [20] Ong, C. S., Yesantharao, P., Huang, C. Y., Mattson, G., Boktor, J., Fukunishi, T., Zhang, H., Hibino, N. (2018). 3D bioprinting using stem cells. *Pediatr Res*, 83(1-2), 223-31.
- [21] Tasnim, N., De la Vega, L., Anil Kumar, S., Abelseh, L., Alonzo, M., Amereh, M., Joddar, B., Willerth, S. M. (2018). 3D Bioprinting Stem Cell Derived Tissues. *Cell Mol Bioeng*, 11(4), 219-40.
- [22] Perry, A.R., Linch, D.C., (1996). The history of bone-marrow transplantation. *Blood Rev*, 10(4), 215-9.
- [23] Loi, P., Czernik, M., Zacchini, F., Iuso, D., Scapolo, P.A., Ptak, G., (2013). Sheep: the first large animal model in nuclear transfer research. *Cell Reprogram*, 15(5), 367-73.
- [24] Yamanaka, S., (2020). Pluripotent Stem Cell-Based Cell Therapy-Promise and Challenges. *Cell Stem Cell*, 27(4), 523-31.
- [25] Jiang, G., Di Bernardo, J., DeLong, C.J., Monteiro da Rocha, A., O'Shea, K.S., Kunisaki, S.M., (2014). Induced pluripotent stem cells from human placental chorion for perinatal tissue engineering applications. *Tissue Eng Part C Methods*. 20(9), 731-40.
- [26] Paolini Sguazzi, G., Muto, V., Tartaglia, M., Bertini, E., Compagnucci, C., (2021). Induced Pluripotent Stem Cells (iPSCs) and Gene Therapy: A New Era for the Treatment of Neurological Diseases. *Int J Mol Sci*, 22(24).
- [27] Park, Y.J., Borlongan, C.V., Dezawa, M., (2021). Cell-based treatment for perinatal hypoxic-ischemic encephalopathy. *Brain Circ*, 7(1), 13-7.
- [28] Sato, M., Inohaya, A., Yasuda, E., Mogami, H., Chigusa, Y., Kawasaki, K., Kawamura, Y., Ueda, Y., Takai, H., Mandai, M., Kondoh, E. (2021). Three-dimensional human placenta-like bud synthesized from induced pluripotent stem cells. *Scientific Reports*, 11, 14167.
- [29] Serrenho, I., Rosado, M., Dinis, A., M Cardoso, C., Grãos, M., Manadas, B., Baltazar, G. (2021). Stem Cell Therapy for Neonatal Hypoxic-Ischemic Encephalopathy: A Systematic Review of Preclinical Studies. *Int J Mol Sci*, 22(6).
- [30] Caruso, M., Evangelista, M., Parolini, O., (2012). Human term placental cells: phenotype, properties and new avenues in regenerative medicine. *Int J Mol Cell Med*, 1(2), 64-74.



PORTLAND ÇİMENTOSUNA PERLİT VE POMZA İKAMESİNİN ÇİMENTONUN ÖZELLİKLERİNİN GELİŞİMİNE KATKILARI

İbrahim PINARCI^{1,a,*}

¹Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Tasarım Bölümü

^a ibrahim.pinarci@bilecik.edu.tr ORCID: 0000-0002-9318-4325

ÖZET

Çimento ile puzolanların etkileşimi ve sonrasında kazandırılan pozitif özellikler günümüzde birçok çalışmaya konu olmaktadır. Bu özellikleri gösterebilmek için yapılan çalışmada Portland çimentosu, perlit ve pomzanın fiziksel ve kimyasal özellikleri belirlenmiş ardından referans çimento ile her birinden % 5 ve % 10' ar oranlarında perlit ve pomza ikameli çimentoların su ihtiyacı, priz süresi, hacim genleşme ve basınç dayanımı değerleri tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar çerçevesinde, malzeme özellikleri ve ikame durumuna bağlı olarak su ihtiyacı, hacim genleşme değerleri, priz süreleri ve basınç dayanımlarında farklılıklar olduğu görülmüştür. Çalışma sonucunda basınç dayanımı bakımından oldukça verimli ve kabul edilebilir değerler elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Portland çimentosu, ikame, perlit, pomza, basınç dayanımı.

ABSTRACT

The interaction of cement and pozzolans and the positive properties gained afterwards are the subject of many studies today. In the study conducted to demonstrate these properties, the physical and chemical properties of Portland cement, perlite and pumice were determined, then the water requirement, setting time, volume expansion and compressive strength values of the reference cement and the cements with 5% and 10% perlite and pumice substitution were determined. Within the framework of the results obtained, it was observed that there were differences in water requirement, volume expansion values, setting times and compressive

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

Geliş (Received): 18/06/2024

Atıf (Citation): Pınarçı, İ. "Portland Çimentosuna Perlit ve Pomza İkamesinin Çimentonun Özelliklerinin Gelişimine Katkıları", UMÜFED Uluslararası Batı Karadeniz Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 6(2): 105-117, 2024.

Kabul (Accepted): 09/09/2024

Yayın (Published): 31/12/2024

strengths depending on the material properties and substitution status. As a result of the study, quite efficient and acceptable values were obtained in terms of compressive strength.

Keywords: Portland cement; substitution ; perlite; pumice; compressive strength.

1. GİRİŞ

Mineral katkıların çimento ve beton teknolojisinde kullanımı sayesinde betonun durabilite özelliklerinde kayda değer gelişme sağlanmasının yanı sıra, doğaya ve ülke ekonomisine de katkı sağlanabilmektedir. Mineral katkıları bu avantajları ile yapı malzemesi imalatında gün geçtikçe değer kazanmakta ve uygulanmaktadır. Söz konusu malzemeleri gruplandırarak olursak endüstriyel atık olarak bilinen silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, ısıtılarak özellik kazandırmak suretiyle elde edilen metakaolin, pirinç kabuğu külü, fındık kabuğu külü veya pomza, perlit, diatomit, tras, zeolit gibi doğal ürünler olarak sıralanabilir [1-17]. Puzolan olarak ifade edilen malzemeler, doğal halinde bağlayıcılık özelliği taşımayan, yapılarında yüksek miktarda silis ve alümin bulunduran, CH reaksiyonu sayesinde bağlayıcılık özelliği kazanan mineral katkılardır [18].

Çalışmanın amacı, çimento üretim aşamasında maliyetin azaltılması, sürdürülebilir temiz çevreye katkı sağlanması, betonun dayanım ve durabilite sorunlarına çözüm getirebilmektir [18]. Bu tür çalışmalarda kullanılan puzolanın oranı, hazırlama şartları ve planlaması ikame işleminin başarısını etkileyecektir [18], [19].

Çalışmada puzolan olarak perlit ve pomza kullanılmıştır. Perlit Kütahya bölgesinden temin edilmiştir. Bu malzeme lav parçacıklarının asit ortamında soğuması ve akabinde kırılması ile oluşan, yapısında su bulunduran bir cam türü olarak bilinir. Doğada açık griden siyaha kadar değişen renk skalası içerisinde bulunabilir. Dünya perlit kaynaklarının %74' ü ülkemizde bulunmaktadır. Bu anlamda değerlendirilmesi ülkemize büyük katkı sağlayacaktır [18], [20].

Pomza ise boşluk oranı yüksek sünger görünümünde silikat tabanlı kirli beyazdan kırmızı kahve ve siyaha kadar geniş bir renk skalasında bulunabilen silisyumca zengin bir kayadır. Volkanik olaylar sonucu yeryüzüne çıkan magmanın içerisindeki gazların bünyeyi terk etmesi ve hızlı bir şekilde soğuması ile oluşmuştur. Özellik olarak çoğunlukla asidik olmakla birlikte, bazik türü ile beraber iki çeşittir. Yapısında silisyum, alüminyum, demir, kalsiyum, magnezyum, sodyum ve potasyum bulunmaktadır [21], [22].

Tüm bu bilgiler çerçevesinde ülkemizde yüksek rezerv miktarına sahip olan perlit ve pomzanın ekonomimize dahil edilmesinde yarar vardır.

Çalışma kapsamında çimento, perlit ve pomzanın fiziksel ve kimyasal özellikleri incelenmiş ardından uluslararası çimento standartlarında belirtilen deneyler kullanılarak dayanıklılık ve durabilite özellikleri incelenmiştir. Deneyler kapsamında 42.5R Portland çimentosuna her birinden %5 ve %10' ar oranda perlit ve pomza ikamesi yapılmış, standart ikamesiz çimento ile birlikte 3 çeşit kompozit çimento üretilmiştir. Akabinde referans çimento, perlit ve pomzanın fiziksel, kimyasal, mineralojik ve mikro yapısal özellikleri test edilmiştir. Üretilen çimento harç ve hamur numuneleriyle standart çimento deneyleri yapılmıştır. Son olarak perlit ve pomza karışımı ile elde edilen harç ile hamur örneklerinin gelişim aşamaları tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, perlit ile pomzanın çimento ve beton üretim prosesinde, analizlerde uygulanan ikame oranlarında kullanılabilceğini göstermiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. MATERYAL

Çalışmada kullanılan çimento TS EN 197-1 standardına uygun olan CEM I 42.5 R Portland çimentosu olup çimentonun üretimi Eskişehir ÇİMSA çimento fabrikasında yapılmıştır [23]. Elde edilen yeni çimentoda kullanılan perlit ise Genper isimli firmadan alınmış olup Kütahya yöresine aittir. İkame işleminde kullanılan ikinci materyal olan pomza ise, Nevşehir yöresinden tedarik edilmiştir. Harç örneklerinin eldesinde standart kum kullanılmıştır. Kum TS EN 196-1'e uygundur. Ayrıca su olarak Eskişehir şehir şebeke suyu kullanılmıştır [24].

2.2. METOD

Kullanılan numuneler 2 mm' den küçük olduğundan herhangi bir kırma işlemi yapmadan öğütme işlemine tabi tutulmuştur. Pomza, bilyalı değirmende 68 rpm ile 30 dakika boyunca öğütülmüş ve 90 µm'lik elekten geçirilmiştir. Perlit ise zaten 90 µm' den küçük olduğundan öğütme ve eleme işlemine tabi tutulmamıştır.

Harç numuneler, perlit ve pomzanın bulunmadığı referans karışım, Portland çimentosunun %10'unun perlit ve pomza ile eşit oranda değiştirildiği karışım ve Portland çimentosunun %20'sinin perlit ve pomza ile eşit oranda değiştirildiği karışım olmak üzere üç

farklı karışımdan elde edilmiştir. Söz konusu çimentolar ve kodları ile harçtaki karışım oranları Tablo 1’ de sunulmuştur.

Tablo 1. Harç numunelerinin kodları ve karışım miktarları

Çimento Kodu	Çimento (g)	Çimento (%)	Pomza (g)	Pomza (%)	Perlit (g)	Perlit (%)	Su (g)	Kum (g)	s/ç
R	450	100	0	0	0	0	225		0.5
5PE5PO	405	90	22.5	5	22.5	5	250	1350	0.55
10PE10PO	360	80	45	10	45	10	270		0.60

Portland çimentosu, perlit ve pomza’ nın yapısal özelliklerinin tespitinde; kimyasal analizler ARL marka 9900 model X-Ray spektrometresi (XRF) cihazı ile, Özgül yüzey tayini Toni Teknik marka ve 7202 model Blain cihazı ile, Özgül ağırlıkları Quanta Chrome MVP-1 model piknometre cihazı ile tespit edilmiştir. Harç numuneleri TS EN 196-1’deki kurallar çerçevesinde imal edilmiştir [24]. Hamurlarda genleşme, priz süreleri ve su ihtiyacı tespitinde bağıl nemin % 65 ve sıcaklığın 20 °C olduğu laboratuvar şartlarında TS EN 196-3 standartlarına çerçevesinde tespitler yapılmıştır [25]. Harçlar ise 40x40x160 mm boyutlarında üç bölmeli kalıplara döküldükten sonra laboratuvar ortamında 24 saat bekletilmiş, 20 °C’ deki ortamda su havuzuna bırakılmış, hidrasyonun 2, 7, 28. ve 90. günlerinde havuzlardan çıkarılan harç numuneleri kurutularak TS EN 196-1’e göre basınç dayanımları Toni Teknik marka ve Toni Comp III 1511 Model Basınç test cihazı ile Eskişehir Çimsa Çimento Fabrikasında 2400±200 N/s hızda bir kuvvet uygulanarak numuneler kırılana kadar arttırılmaya devam edilerek değer tespiti yapılmıştır [24].

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Fiziksel Analizler

Referans çimento, perlit ve pomzanın fiziksel özellikleri analiz edilmiş elde edilen değerler toplu halde Tablo 2’de verilmiştir. Bu sonuçlara göre perlitin en küçük tane yapısında ve en büyük yüzey alanına sahip olduğu, bunun yanında pomzanın en büyük tane boyutuna ve en küçük blaine verisini gösterdiği anlaşılmaktadır. Özgül ağırlıkları değerlendirildiğinde referans portland çimentosunun 3.12 g/cm³, perlitin 2.38 g/cm³ ve pomzanın ise 2.68 g/cm³ olduğu tespit edilmiştir. Bu analizler sonucu, daha düşük özgül ağırlık değerlerine sahip perlit

ve pomzanın, Portland çimentosuyla ikamesi ile oluşturulan yeni kompozit çimentonun da özgül ağırlığında düşme meydana geleceği ön görülmektedir.

Tablo 2. Portland Çimentosu, perlit ve pomzanın fiziksel özellikleri

	Tane boyutu (elek üstü), %		Özgül ağırlık, g/cm ³	Özgül yüzey (Blaine), cm ² /g
	>45 µm	>90 µm		
Çimento	68.4	0	3.12	4187
Pomza	34.2	8.4	2.68	2732
Perlit	44.3	0	2.38	5274

3.2. Kimyasal Analizler

Portland çimentosu, perlit ve pomzanın kimyasal değerleri Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. Portland Çimentosu, perlit ve pomzanın kimyasal özellikleri

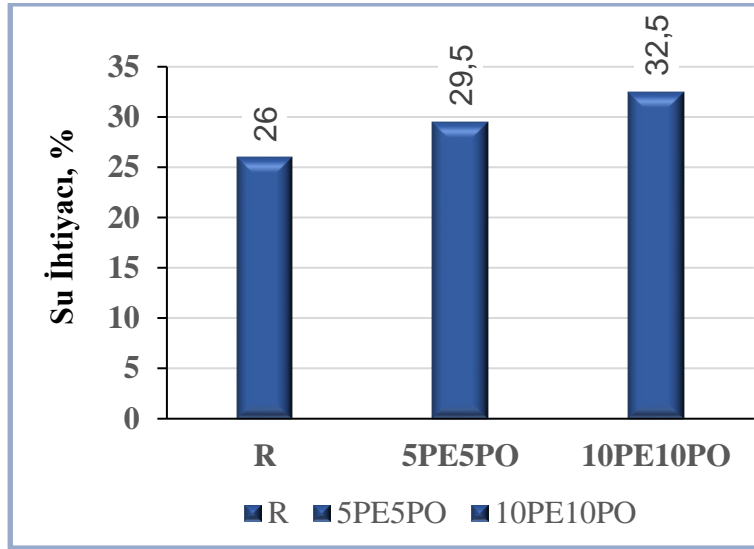
Materyaller	Çimento	Perlit	Pomza
SiO₂ (S)	21.28	74.32	66.32
Al₂O₃ (A)	4.14	13.48	17.43
Fe₂O₃ (F)	2.41	0,03	3.24
CaO	62.22	1,17	2.34
MgO	1.47	0.06	0.46
SO₃	3.43	0.02	0.32
Na₂O	0.18	3.53	3.13
K₂O	0.57	4.90	4.21
Cl⁻	0.012	0.04	0.02
Kızdırma kaybı	2.45	0.00	2.56
Serbest CaO	1.89	-	-
S+A+F		87.83	86,99

Tablo 3’ deki veriler incelendiğinde referans çimentonun CaO ve SiO₂ bakımından zengin, Al₂O₃, Fe₂O₃, SO₃ ve MgO oranı açısından zayıf olduğu görülmektedir. Perlitteki durum ise SiO₂ ve Al₂O₃ bakımından yüksek olduğu belirlenmiştir. Pomza bileşenlerinde de yüksek oran

içeren bileşenler SiO_2 ve Al_2O_3 ' dir. Buna karşılık CaO , Fe_2O_3 , MgO ve SO_3 miktarının ise daha az olduğu anlaşılmıştır. Pomza ve perlitin Na_2O oranının, K_2O oranına kıyasla görece daha fazla bulunması, malzemelerin Na^+ iyonlarınca bir miktar daha fazla olduklarını göstermektedir. Elde edilen bulgular sonucunda perlit ve pomzanın S+A+F toplam miktarının %80' den yüksek olduğu tespit edilmiş ve puzolanik olarak kullanılabilir olduğu anlaşılmıştır.

3.3. Su İhtiyacı

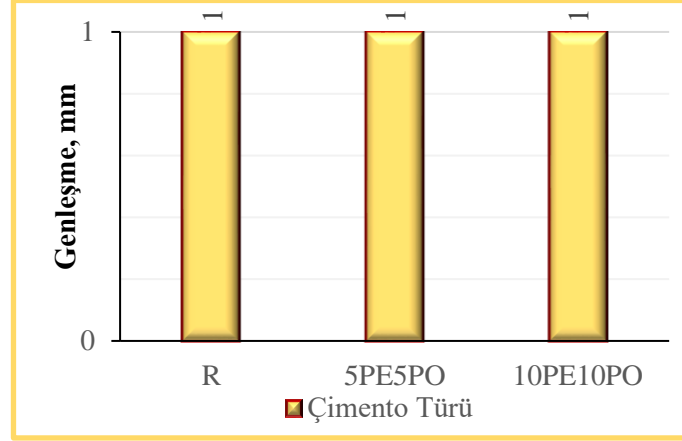
TS EN 196–3 standardında uygulanan su ihtiyacını belirleme analizleri sonucu perlit ve pomza ikameli çimento hamurlarına ait elde edilen veriler Şekil 1' de sunulmuştur [25].



Şekil 1. Su ihtiyacı sonuçları

3.4. Genleşme Değerleri

TS EN 196–3 Standardına göre uygulanan analizler neticesinde perlit ve pomza katkılı çimentolardan elde edilen hamurların genleşme sonuçları Şekil 2' de verilmiştir [25].

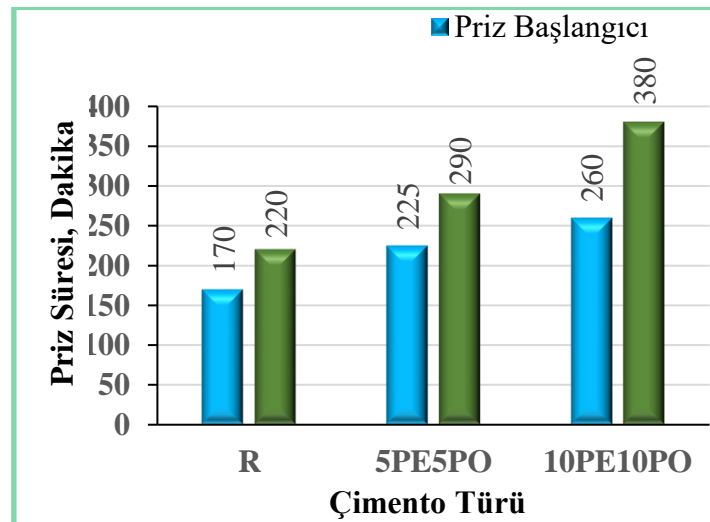


Şekil 2. Genleşme miktarı sonuçları

Deneylerde kullanılan çimento incelendiğinde MgO ve CaO' in fazla miktarda bulunduğu görülmektedir. Bu durum genleşme problemini ortaya çıkarmakta, dolayısı ile betonda bir takım durabilite problemlerini gündeme getirmektedir. Analizlerde referans çimento, perlit ve pomza çimento hamurlarında Le Chatelier kalıbı kullanılarak, tümünde 1mm genleşme olduğu tespit edilmiştir. TS EN 197-1' de tanımlanan standarda göre en yüksek sınır genleşme değeri 10 mm' dir. Bu bağlamda numunelerin kabul edilebilir genleşme değerleri içerisinde kaldığı için standartlara uygun olduğu anlaşılmıştır [23].

3.5.Priz Süreleri

Priz süresi tespiti için deneyler TS EN 196-3 standardına göre yapılmış, referans çimento, perlit ve pomza katkılı çimento hamurlarının priz süreleri tespit edilerek Şekil 3' te sunulmuştur [25].

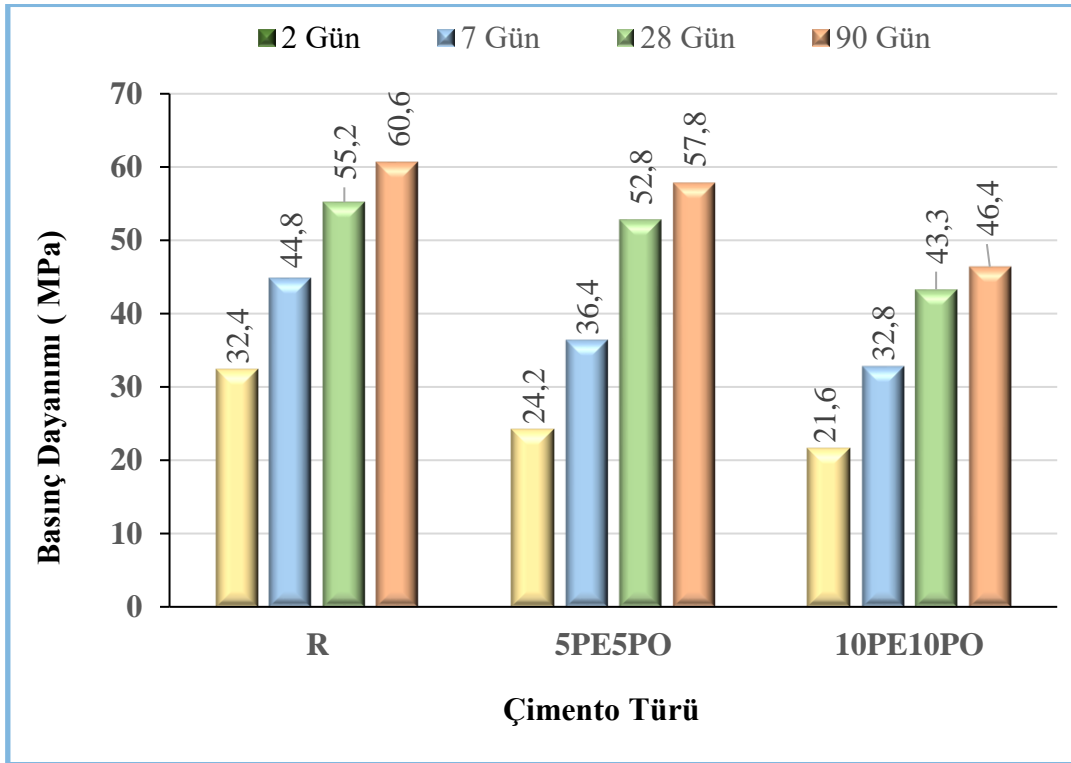


Şekil 3. Priz süreleri sonuçları

Şekil 3'e göre priz başlangıç süreleri kıyaslandığında en düşük süre 160 dk ile referans çimento hamuru numunesinde, en yüksek priz başlangıcının ise 260 dk ile 10PE10PO çimento hamurunda olduğu görülmüştür. Bu durumda referans numunelere göre sırasıyla 5PE5PO ve 10PE10PO çimento hamurlarında sırasıyla %32.35 ve % 52.99 oranında süre artışı tespit edilmiştir. Priz süre sonu verilerinde ise en erken süre 220 dk ile referans numunede görülürken, 380 dk ile en uzun süre 10PE10PO hamurunda olduğu anlaşılmıştır. Yine referans çimento hamuru ile kıyaslandığında 5PE5PO ve 10PE10PO çimento hamurlarında sırası ile % 41.17 ve % 94.11 kadar süre yükselmesi olduğu görülmüştür (Şekil 3). Tüm veriler birlikte değerlendirildiğinde, standartlarda referans olarak seçilen çimento için belirtilen 60 dk priz başlangıç minimum süre sınırının üstünde olduğu ve bu sebepten dayanım özelliklerine uygun olarak gelişim göstereceği, işlenebilirlik problemi görülmeyeceği, kalıp sökme işlemlerinde sıkıntı oluşmayacağı düşünülmektedir.

3.6. Basınç Dayanımları

Referans çimento perlit ve pomza katkılı harç örneklerinin 2, 7, 28 ve 90. hidrasyon günlerinde basınç dayanım sonuçları Şekil 4' de sunulmuştur.



Şekil 4. Basınç dayanımları sonuçları

Referans harç numunelerine göre 5PE5PO ve 10PE10PO örneklerinde sırasıyla 2. hidrasyon gününde %25.6 ve %33.75; 7. hidrasyon gününde %18.75 ve %26,78; 28. hidrasyon gününde %4.34 ve %21.55; 90. Hidrasyon gününde ise %4.6 ve %23,43 oranında dayanım düşüklüğü tespit edilmiştir (Şekil 4). Sonuçlar değerlendirildiğinde çimento harç numunelerinin basınç dayanımları ilk yaşlarda ikame oranları arttıkça referans çimento harç numunesine göre düşüş göstermektedir. Bunun temel nedeni meydana gelen puzolonik aktiviteler sebebiyle reaksiyon hızının düşmesi ve dolayısı ile sınırlı miktarda C-S-H oluşturulmasıdır. Ancak 28. hidrasyon gününden itibaren basınç dayanım değerleri tüm ikameli numunelerde standartlarda beklenen değerlere ulaştığı görülmüştür. Bu hızlı gelişimin sebebi ikamede kullanılan perlit ve pomzanın ortamda oluşan C-S-H oluşturmak için daha fazla CH' 1 bağlaması olarak mütalaa edilebilir. Ayrıca perlit ve pomza ile ikame edilen numunelerin tamamında TS EN 197-1 de kabul edilen 2 gün için beklenen basınç değeri olan 20 MPa' ı aşan sonuçlar vererek 42.5 R dayanım sınıfı değerlerini elde ettiği, ilaveten 28. hidrasyon gününde sırasıyla 5PE5PO ve 10PE10PO numunelerinde 52.8 MPa ile 43.3 MPa gibi referans çimentoda beklenen standart değerlere % 20 gibi yüksek bir ikame oranında ulaşabilmesi işlemin oldukça verimli olduğunu göstermektedir. Tüm bu durumlara ilave olarak 5PE5PO numunelerinin 28 günlük norm basınç değeri olan 52.5 MPa' yı aşan bir sonuçla 52.5 N dayanım sınıfına da girdiği görülmüştür [23].

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışma sonucunda elde edilen veriler değerlendirildiğinde;

- Kimyasal özellikleri için yapılan analizlerde perlitin S+A+F toplamının % 87.83; pomzanın ise % 86.99 (S+A+F>0.70) olarak bulunması özellik olarak istenilen puzolonik yapıda olduklarını;
- 45 µm ve 90 µm elek üstü taneciklerin tane boyut bölgesi ve özgül yüzey alanı sonuçları itibariyle, pomza referans çimentoya kıyasla görece daha büyük tane boyutuna ve daha küçük özgül yüzey alanına, perlit ise daha düşük tane boyutuna ve daha yüksek özgül yüzey alanına sahip olduğu;

- Pomza ve perlitin referans çimentoya göre özgül ağırlığının küçük olmasından dolayı söz konusu puzolanların çimento ile ikamesinden özgül ağırlığı daha düşük kompozit çimentoların üretilebileceği;
- Su ihtiyaçları noktasında, kullanılan ikame miktarı ile puzolanların kimyasal ve fiziksel özelliğine bağlı olarak bir miktar su ihtiyacının arttığı;
- Tüm numuneler için genleşme değerlerinin standartlarda belirtilen referans aralıklarında gerçekleştiği;
- Priz sürelerine bakıldığında, priz başlangıç ve son sürelerinin tüm numuneler için standartlarda belirtilen sürelerle uygun olduğu, bu anlamda işlenebilirlik açısından imalat sırasında bir problem oluşturmayacağı;
- Tüm ikameli harç numunelerinde TS EN 197-1’de belirtilen 2 gün için beklenen basınç değeri olan 20 MPa’ nın üstünde sonuçlanarak 42.5 R dayanım sınıfının elde edildiği sağladığı, bunun yanında % 20’ ye kadar yüksek sayılabilecek bir katkı oranında dahi 28 günlük basınç değerlerine göre, elde edilen üründen oldukça verimli sonuçlar alındığını;
- 5PE5PO numunesinde 28 günlük norm basınç değeri 52.5 MPa’ nın üzerinde elde edilmiştir. Dolayısı ile bu durum 52.5 N dayanım sınıfını da sağladığı da görülmüştür.

Yapılan çalışma neticesinde ülkemizde rezerv bakımından hatırı sayılır miktarda bulunan perlit ve pomzanın çimentoya ikamesiyle, hidrasyon sürecine katkı sağlamasının yanı sıra ekonomiye ve çevreye katkı sağlanmış olacaktır. Çalışma kapsamında perlit ve pomzanın fiziksel, kimyasal özellikleri ile bunlardan elde edilen kompoze çimento harç ve hamurlarının standart çimento deneyleri açısından değerlendirilmesi yapılmış olup bu incelemelerin ileri görüş teknikleri ile de desteklenerek katkı sağlanmasının faydalı olacağı düşünülmektedir.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma kapsamında yapılan analizler Çimsa Eskişehir Çimento Fabrikası gerçekleştirilmiş olup katkılarından dolayı teşekkürlerimi bir borç bilirim.

KAYNAKÇA

- [1] İlker Bekir Topçu, Taylan Sofuoğlu, “Pres filtre atığı ve uçucu kül ile elde edilen geopolimer harçların farklı koşullar altında birim ağırlığı ve basınç dayanımının değerlendirilmesi”, *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, c. 7/2, 806-823., 2020.
- [2] İbrahim Pınarcı, Yılmaz Kocak, “Hydration mechanisms and mechanical properties of pumice substituted cementitious binder ”, *Construction and Building Material*, c. 335, 2022.
- [3] İbrahim Pınarcı, Yılmaz Kocak, “Effects of hydration mechanism on mechanical properties of diatomite-cement composites”, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, c. 27(12), ss. 3707-3721, 2023.
- [4] Pınarcı İ., “Sürdürülebilirlik çerçevesinde yeşil betona bakış üzerine bir araştırma”, içinde *Interdisciplinary Studies on Contemporary Research Practices in Engineering in the 21st Century-I*, ss. 103-116, Özgür Yayıncılık., Gaziantep, 2023.
- [5] Pınarcı İ., “Diatomit ve pomza ikameli çimentoların hidrasyon reaksiyonlarının ve yüzey özelliklerinin spektroskopik yöntemlerle araştırılması”, Doktora Tezi, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye, 2022.
- [6] Yılmaz Koçak, Atilla Dorum, Bülent Yılmaz, ve Ali Uçar, “Trasın Çimento Yüzey Özelliğine, Hidratasyona Ve Basınç Dayanımına Etkisi, *E-Journal Of New World Sciences Academy Technological Applied Sciences*, c. 5, sy 1, ss. 1-14, 2010.
- [7] Kürşat Yıldız, Atilla Dorum, Yılmaz Koçak, “Pomza Zeolit Ve Cem I Çimentosunun Minerolojik Moleküler Elektrokinetik Ve Termal Uyumunun Yüksek Dayanımlı Betona Etkisinin Araştırılması”, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.* , c. 25, sy 4, ss. 867-879, 2010.

- [8] Hui Zhao, Wei Sun, Xiaoming Wu, Bo Gao, “The Properties Of The Self–Compacting Concrete With Fly Ash And Ground Granulated blast furnace slag mineral admixtures” *J Clean Prod*, sy 95, ss. 66-74, 2015.
- [9] Yılmaz Kocak, Eda Tasci, ve Unal Kaya, “The effect of using natural zeolite on the properties and hydration characteristics of blended cements”, *Constr Build Mater*, c. 47, ss. 720-727, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.033.
- [10] Yılmaz Kocak, “Effects of metakaolin on the hydration development of Portland–composite cement”, *Journal of Building Engineering*, c. 31/101419, 2020.
- [11] Abdurrahman Ergin, “Bitlis Yöresi Pomzasının Kendiliğinden Yerleşen Harçlarda Mineral Katkı Olarak Kullanılabilirliği”, Yüksek Lisans, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, , Elazığ, 2016.
- [12] Atilla Dorum, Yılmaz Koçak, Bülent Yılmaz, ve Ali Uçar, “Yüksek Fırın Cürufunun Çimento Yüzey Özelliklerine Ve Hidratasyona Etkileri”, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c. 19, ss. 47-58, 2009.
- [13] A. Tolgay, E. Yaşar, ve Y. Erdoğan, “Nevşehir Pomzasının Agrega Olarak Betonda Kullanılabilirliğinin Araştırılması”, İzmir: 5. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 2004.
- [14] Cabrera–Luna K., Maldonado–Bandala E. E., Nieves–Mendoza D., Castro–Borges P., ve García J. E., “Novel low emissions supersulfated cements of pumice in concrete; mechanical and electrochemical characterization ”, *J Clean Prod*, c. 272/ 122520, 2020.
- [15] İbrahim Pınarcı, Yılmaz Kocak, “Pomza ve diatomitin yüzey özelliklerinin portland çimentosunun fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi”, *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, c. 8/3, 1385-1394., 2021.
- [16] Yılmaz Kocak, “A Study On The Effect Of Fly Ash And Silica Fume Substituted Cement Paste And Mortars”, *Scientific Research And Essays*, c. 5, sy 9, ss. 990-998, 2010.

- [17] Pınarcı İ., “Hafif Beton ve Hafif Beton Üretiminde Kullanılan Yapı Malzemeleri Üzerine Bir Araştırma ”, *Mühendislik Bilimleri Alanında Yeni Trendler*, 1. bs, Prof. Dr. Birol KILIÇ ve Prof. Dr. Gülden BAŞYİĞİT KILIÇ, E, 2022.
- [18] Eylül Selin Kaya, “Ham Perlit Ve Genleştirilmiş Perlitin Puzolanik Malzeme Olarak Kullanılabilirliği ”, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü , Balıkesir, 2019.
- [19] DPT, “Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Yapı Malzemeleri III (Pomza, 96 Perlit, Vermikülit, Flogopit, Genleşen Killer), Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Sekizinci Beş Yıllık (2001-2005) Kalkınma Planı”, Ankara, 2001.
- [20] *TS EN-197-1, Çimento-Bölüm 1: Genel çimentolar-Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri*. Ankara, 2012, ss. 3-10.
- [21] Gonca Eroğlu ve Mesut Şahiner, “Dünyada Ve Türkiye’de Pomza”, 2020.
- [22] Necmettin Elmastaş, “Türkiye Ekonomisi İçin Önemi Giderek Artan Bir Maden: Pomza (Sünger Taşı)”, *Journal of International Social Research*, c. 5, sy 23, ss. 197-206, 2012.
- [23] *TS EN-197-1, Çimento-Bölüm 1: Genel çimentolar-Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri*. Ankara, 2012, ss. 3-10.
- [24] *TS EN-196-1. Çimento deney metodları-Bölüm 1: Dayanım tayini*,. Ankara, 2016, ss. 16-21.
- [25] *TS EN-196-3.Çimento deney yöntemleri-Bölüm 3: Priz süreleri ve genleşme tayini*. Ankara, 2017, ss. 5-8.



İKİ FARKLI SİMÜLASYON PROGRAMI KULLANILARAK OPTİMUM GÜNEŞ PANELİ EĞİM AÇISININ BELİRLENMESİ: AZERBAYCAN ÖRNEĞİ

Samir İSLAMOV^{1,a}, Özlem ONAY^{2,b,*}

¹ Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye.

² Eskişehir Teknik Üniversitesi, Porsuk Meslek Yüksekokulu, Eskişehir, Türkiye.

^a islamovsamir221@gmail.com ORCID: 0009-0001-6114-8047

^b oonay@eskisehir.edu.tr ORCID: 0000-0001-6230-9335

ÖZET

Günümüzde giderek artan insan nüfusu ve sanayi toplumunun yarattığı enerji ihtiyacını karşılamak ve enerjide dışa bağımlılığı azaltmak için, yeni teknolojiler geliştirerek yenilenebilir enerji kaynakların kullanımı giderek artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından en yaygın olarak kullanılan güneş enerjisi uygun maliyeti ve kolay kurulumu olması nedeniyle daha çok tercih edilmektedir. Güneş enerjisinden optimum miktarda elektrik elde edilebilmesi için fotovoltaik (PV) panellerin güneşe optimum bir açıda yerleştirilmesi oldukça önem arz etmektedir. Ayrıca gölgelenme süresi, uygun ve kaliteli ekipman kullanımı, toz ve kirlilik gibi diğer etkenler de PV panel verimini etkilemektedir. Bu çalışma kapsamında, güneş enerjisi yatırımları açısından henüz yeni gelişmekte olan Azerbaycan için yenilenebilir enerjiye olan teşvikin artırılması ve kullanımının yaygınlaştırılması amacı ile, Azerbaycan'ın 14 farklı siyasi bölgesi için yıllık değişim süreçlerinde optimum panel eğim açısı ve farklı eğim açılarında PV paneller üzerine gelen radyasyon miktarları ve elde edilen ışınım miktarları belirlenmiş ve elektrik enerjisine dönüştürülerek PV panellerin kurulumu için hesaplamalar yapılmıştır. Çalışmada PVGIS ve PVsyst'de yapılan hesaplamalar sonucunda Nahçıvan ilindeki güneş enerji potansiyelinin en yüksek olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Güneş pilleri, Optimum eğim açısı, PVGIS, PVsyst, Azerbaycan

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

Atf (Citation): İslamov, S., Onay, Ö., "İki Farklı Simülasyon Programı Kullanılarak Optimum Güneş Paneli Eğim Açısının Belirlenmesi: Azerbaycan Örneği", UMÜFED Uluslararası Batı Karadeniz Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 6(2), ss. 118-136, 2024.

Geliş (Received): 19.04.2024

Kabul (Accepted): 29.11.2024

Yayın (Published): 31.12.2024

ABSTRACT

Today, the use of renewable energy sources is increasing gradually by developing new technologies in order to meet the energy needs created by the ever-increasing human population and industrial society and to reduce external dependence on energy. Solar energy, which is the most widely used of renewable resources, is more preferred due to its affordable cost and easy installation. In order to obtain the optimum amount of electricity from solar energy, it is very important to place the PV panels at an optimum angle to the sun. In addition, other factors such as shade avoidance, appropriate and quality equipment, dust and pollution avoidance also affect the optimum energy from the sun. Within the scope of this study, with the aim of increasing the incentive for renewable energy and popularizing its use in Azerbaijan, which is just developing in terms of solar energy investments, the optimum panel tilt angle and the radiation on PV panels at different tilt angles in the annual change processes for 14 different political regions of Azerbaijan are examined. The amounts of radiation were calculated, the obtained radiation amounts were converted into electrical energy and calculations were made for the installation of PV panels. In the study, as a result of the calculations made in PVGIS and PVSyst, the solar energy potential in Nakhchivan province is more effective when compared to other provinces.

Keywords: *Solar cells, Optimum tilt angle, PVGIS, PVSyst, Azerbaijan*

1. GİRİŞ

Dünyada kullanılan ve en çok ihtiyaç duyulan iki enerji türü olan ısı ve elektrik enerjisi, fosil yakıt tabanlı enerjiler ve yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanmaktadır. Tüm bu enerji kaynaklarının hepsinden elde edilen enerjinin ekonomik, sağlık ve çevresel faktörler üzerinde faydaları ve zararları mevcuttur [1]. Fosil yakıt kaynaklarının aksine yenilenebilir enerji kaynakları tükenmeyen, sürekli kendisini yenileyen ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak bilinmektedir [2,3]. Bu kaynakların yaygın olarak kullanımı hem yenilenebilir olmayan (fosil tabanlı) kaynakların kullanımından ortaya çıkan çevresel zararları önleyebilmekte hem de enerji güvenliği oluşturarak ulusal ve uluslararası bir seviyede istikrar sağlamaktadır.

Enerji Enstitüsü Dünya Enerjisine İlişkin İstatistiksel İnceleme (2023) verilerine göre 2022 yılında tüketilen enerjinin %81,79'u fosil kaynaklı yakıtlar %17,49'u ise yenilenebilir

kaynaklardır. Tüketilen toplam enerjinin 3.448,24 TWh'i güneş enerjisi karşılamaktadır [4]. En güncel verilere göre 2022 yılı toplam küresel elektrik enerjisi üretim miktarı 28.527,76 TWh'tir. Nükleer ve yenilenebilir enerji kaynakları (11.142,61 TWh), üretilen toplam elektrik enerjisinin üçte birinden fazlasını (%39.06) oluşturmaktadır. Üretilen toplam elektrik enerjisinin 17.385,15 TWh'i (%60,94) fosil kaynaklı yakıtlardan sağlanmıştır [4].

Yenilenebilir kaynaklardan en yaygın olarak kullanılan güneş enerjisi hem geleneksel enerji kaynakları hem de yenilenebilir enerji kaynaklarının diğer türlerine göre çevreye en az zarar veren enerji kaynağıdır [5]. Güneş enerjisi ışınlarının dalga boyları uzayda 0,2 µm ile 4 µm, dünya üzerinde ise 0,3 µm ile 3 µm arasında değişmektedir. Atmosfer dışındaki ışınım değeri dünyadaki ışınım değerinden daha fazladır. Ortalama bir mesafe aldığımız zaman atmosfer dışında olan ışınım Güneş Sabiti denmekte ve ISC gibi ifade edilmektedir. Yapılan hesaplamalar ve ölçümlere göre atmosfer dışındaki ışınım miktarı (Güneş Sabiti) 1322 W/m² - 1395 W/m² arasında değişmektedir. Fakat araştırmacılar tarafından son yıllarda yapılan uzay ölçümleri sonucu güneş sabitinin 1353 W/m² (1164 kcal/m² h) olduğu kabul edilmiştir [6].

Güneş ışınımının atmosfere geliş açısına göre doğrudan: güneşten belli bir noktaya veya yüzeye gelen ışınım ve dolaylı: yer yüzünde dağılıma ve yansıma sonucu ortaya çıkan ışınım olmak üzere iki türü vardır. Güneş hücreleri yüzeylerine gelen güneş ışınlarını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürebilen yarıiletken cihazlardır [7]. Çalışma prensibi fotovoltajik olayına dayalı olan güneş hücreleri yarıiletken maddeden yapıldığından dolayı üzerlerine güneş ışığı (veya ışık) düştüğü zaman uçlarında bir potansiyel fark oluşmaktadır ve bu bir dış devreye bağlandığında devreden akım geçmektedir. PV piller seri bağlanma yoluyla birbirlerine bağlanıp bir katman üzerinde sıralı bir şekilde monte edilerek tipik güneş paneli oluşturmaktadırlar. Çok sayıdaki güneş hücrelerinden oluşturulan bu panelde toplam güç çıkışı arttırılarak çatı ve arazi tipli yerlerde şebeke bağlantılı veya şebekeden bağımsız güneş enerji sistemleri kurularak gereken enerji ihtiyacı veya bunun bir kısmı karşılanmaktadır.

PV güneş enerji sistemleri, kullanım amacına bağlı olarak farklı şekillerde monte edilebilmektedir. PV sistemlerin montaj şekillerine, arazi, çatı, kanal üstü, agrovoltajik (tarım veya sera), açık deniz ve yüzer güneş enerji sistemleri örnek verilebilir. Arazi tip Güneş enerji sistemleri kurulmadan önce panel montaj yapılarının eğim açısı yıl boyunca güneşten maksimum yararlanacak şekilde ayarlanmaktadır. Çatı tipi PV sistemlerin kurulumunda, güneşten ve kurulan PV sistemden maksimum şekilde yararlanmak için, çatı üstünde veya bina

etrafında gölge oluşturacak nesne veya yapılardan kaçınmak gerekmektedir. PVGIS, PV*SOL ve PVsyst gibi PV simülasyon yazılım araçları kullanılarak, fotovoltaik güneş sistemlerinin tasarımı, modellenmesi ve performans hesapları yapılabilmektedir.

PVGIS, dünya genelinde güneş enerjisi kaynaklarını ve fotovoltaik (PV) sistem performansını incelemeyi ve tahmin etmeyi amaçlayan ücretsiz bir çevrimiçi araçtır. PVGIS, kristalin silikon (c-Si), CdTe veya CIS güneş modüllerine sahip sabit veya izlemeli PV sistemleri için aylık ve yıllık elektrik üretim miktarlarının tahmini olarak belirlenmesini sağlar. İlk sürümleri güneş ışınımı ölçümlerini içerirken, en son sürümleri yalnızca uydu verilerine dayalı tahminleri içermektedir. Uydu verileri, METEOSAT gibi sabit uydulardan elde edilir ve 2005-2016 dönemini kapsar. Ayrıca PVGIS, sera gazı ve finansal analizlerinde yapılmasına olanak sağlar. PV*SOL, çeşitli zemin, izleme, çatı entegrasyonu veya çatı montajlı PV sistemlerinin 2D veya 3D görselleştirmeyle detaylı gölgeleme analizi için özel olarak tasarlanmış bir yazılımdır. Aynı zamanda PV sistemlerinin performans ve finansal analiz değerlendirmelerini de sağlar. PV*SOL, güneş modülleri ve invertörler için geniş bir kütüphane sunar ve gölgeleme etkilerini hesaplamak ve kapsama alanını optimize etmek için yakındaki nesnelere dikkate alır. PVsyst, PV sistem bileşenlerini, PV dizi özelliklerini, invertör modelini ve akü paketini gibi birçok değişkeni simüle edebilen, sistem analizi ve tasarımına yönelik bir yazılımdır. Ayrıca, finansal değerlendirmeler sunar ve sıralar arası gölgeleme etkilerini hesaplayabilir. PVsyst, birden fazla invertör türüne sahip PV sistemlerini ve farklı eğim ve azimut açılarına sahip PV dizilerini aynı anda modelleyebilir [8].

Literatürde zaman-optimum eğim açılarının belirlenmesine ilişkin birçok çalışma olduğu görülmektedir. Belmahdi ve Bouardi'nin yapmış olduğu bir çalışmada Fas'ın kuzeyinde 1 MW güce sahip bir PV güneş enerji sisteminin modellenmesi ve simülasyon çalışması yapılmış ve çalışmada Fas'ın Kuzey bölgesindeki dört farklı şehirde kurulan, sabit açılı ve mevsimsel olarak ayarlanmış eğim açılarındaki PV sistem için şebekeye aktarılan enerjiyi karşılaştırılmış ve bu şehirlerin performans oranı değerlerinin %76,9 ile %77,9 arasında değiştiği belirlenmiştir [9]. Dal tarafından yapılan bir çalışmada, Fotovoltaik Coğrafi Bilgi Sistemi (PVGIS) ve Hottel & Woertz (HW) metotlarını kullanarak güneş radyasyon miktarını ve eğim açılarının tespit etmiş ve çalışma sonucunda yıllık sabit (29,5°) eğim açısında yerleştirilen güneş paneline göre; her ay değişen, yılda iki ve dört kez değiştirilen panel eğim açılarındaki verimin sırasıyla yıllık olarak %4,11, %2,99 ve %3,25 oranda arttığını belirlemiştir

[10]. Taha ve arkadaşları, yaptıkları bir çalışmada PVGIS simülasyon aracı kullanarak Irak'ın Duhok kentindeki Duhok Politeknik Üniversitesi kampüsünde 50 kWp gücündeki PV sistem için aylık ve yıllık optimum eğim açılarını tespit etmişlerdir. Çalışma sonucunda 32,7°'in yıllık sabit açılı sistemler için optimum eğim açısı olduğu belirtilmiştir [11].

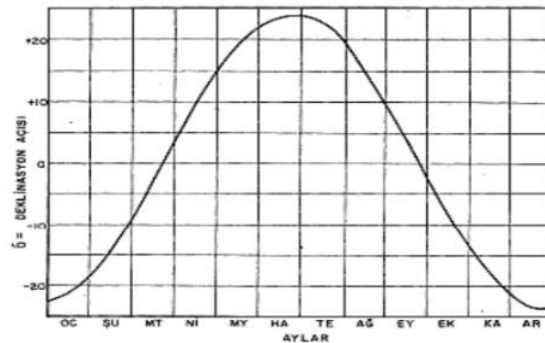
2. MATERYAL VE METOD

2.1. Güneş Açıları

Deklınasyon veya Sapma açısı (δ), güneş ışınımının ekvator düzlemi ile yaptığı açıdır. Deklınasyon açısı (δ), dünyanın kendi ekseninde dönme açısı ile güneş etrafındaki yörünge düzlemi arasındaki 23,45 derecelik açı nedeniyle oluşmaktadır. Bu açı değeri Güney yarımkürede negatif, Kuzey yarımkürede ise pozitif değerdir ve $-23,45^\circ$ ile $23,45^\circ$ arasında değişir. Deklınasyon açısı (δ), 21 Haziran tarihinde en yüksek değere sahipken ($23,45^\circ$), kış aylarında en düşük değer ($-23,45^\circ$) 22 Aralık' tadır. Deklınasyon (Sapma) açısını (δ) deneysel Cooper formülü ile hesaplamak mümkündür;

$$\delta = 23,45 * \sin[360 * (284 + n) / 365] \quad (1)$$

Burada; δ - deklınasyon açısı, n- yıl için gün sayısını ve n= 1, 1 Ocak'ı temsil ettiğinde başlangıç olarak kabul edilir [12-14].



Şekil 1. Deklınasyon açısının eğrisi [12]

Saat açısı (ω), güneş ışınlarının bulunduğu boylamla gözlemlenen konumun boylamı arasındaki açıyı ifade etmektedir. Saat açısı 12'den önceki ve 12'den sonrası için açı değeri negatif (-) ve pozitif (+) olur. Bu açı öğle saatlerinde, yani, saat 12'de 0° dir. Her 15° C saat

açısı dünyanın Güneş etrafındaki 1 saatlik dönme zamanına eşittir. Saat açısı denklem 2'deki gibi hesaplanmaktadır [12, 13, 17];

$$\omega = 15(t_s - 12) \quad (2)$$

Bu ifade de t_s - saat cinsinden güneş zamanıdır.

Enlem açısı (θ), ekvatorun kuzey veya güney yönündeki herhangi bir konumun ekvatorun orijin noktasına göre oluşan açısız mesafesidir. Ekvatorun kuzey tarafı artı, güneyi tarafı ise eksi değer almakta ve $-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ arasında değişmektedir. Enlem ve Boylam değerleri, dünyadaki herhangi bir konumu belirlemek için kullanılır [13, 17].

Zenit açısı (güneş ışınlarının yatay düzlemin dikeyi ile oluşturduğu açı, θ_z) değeri güneşin doğumu ve batımı zamanı 90° , güneşin ışınlarının dik bir şekilde geldiği öğlen vaktiyse 0° 'dir. Zenit açısı (θ_z) denklem 3'teki gibi hesaplanmaktadır; [12, 13, 18]

$$\cos \theta_z = (\cos \delta * \cos \varphi * \cos \omega + \sin \delta * \sin \varphi) \quad (3)$$

Azimet açısı: Bir yüzeyin kuzey veya güneyden ölçülen yatay açısını ifade eder. Azimet açısı, Güneşin güney konumundan oluşturduğu açısız uzaklığı olup güney yönünde 0° , batı yönündeyse 90° 'ye beraberdir. 2 tür Azimet açısı vardır. Bunlar; Güneş Azimet Açısı (γ_s) ve Yüzey Azimet Açısı (γ). Güneş azimet açısı (γ_s), güneşin dik açıda geldiği zaman 180° 'dir. Azimet açısı denklem 4 ile hesaplanır [13];

$$\gamma_s = \sin^{-1} \left[\frac{\cos(\delta) \sin(\omega)}{\cos(\alpha)} \right] \quad (4)$$

Denklem içinde δ - deklinasyon açısı, ω - saat açısı ve α - güneş yükseklik açısı olarak ifade edilmiştir.

Yüzey azimet açısı (γ) Eğik bir yüzeyin dikinin yatay düzlemdeki izdüşümü ile güney yönü arasındaki açı değeridir. Yüzey azimet açısı (γ) -180° ile 180° arasına değişir [13].

Güneş yükselme açısı (α), Güneş ışınlarının yatay düzlemle oluşturduğu açıyı, yani güneşin ufuk çizgisinden yüksekliğini ifade etmekte ve denklem 5 ile hesaplanmaktadır [13].

$$\alpha = 90 - \theta_z \quad (5)$$

Geliş açısı (θ), yüzeye direkt olarak gelen güneş ışınlarının o yüzeyin normali arasında oluşturduğu açıdır. Geliş açısı, eğer yüzey güneş ışınlarına dik bir konumda geliyorsa 0 derece, paralel olarak geliyorsa 90 derecedir [14]. Geliş açısı denklem 6'da gösterilen ifade ile hesaplanmaktadır;

$$\theta = \cos^{-1} [\cos(\delta)\cos(\phi-\beta)\cos(\omega) + \sin(\delta)\sin(\phi-\beta)] \quad (6)$$

Bu eşitlikte δ -deklınasyon açısı, ϕ - enlem açısı, ω - saat açısı ve β - yüzeyin eğim açısını gösterir.

Eğim açısı, paneller ile yatay düzlem arasındaki açı olup, simgesi (β)'dir. Bu açı, Kuzey Yarımküresinde güney yönüne doğru, Güney Yarımküresinde ise kuzey yönüne doğru yöneliktir. Bu açı değeri; $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$ gibi değişmektedir. PV güneş panellerinin, optimum eğim açısını belirlemek amacıyla öğlen saatlerinde güneşten maksimum miktarda yararlanabilmek için eğim açısı eşitlik 7'de verildiği gibi hesaplanarak montajı yapılabilir;

$$\beta = |\phi - \delta| \quad (7)$$

İlave olarak, tek eksenli (doğu-batı eksenli) bir sistem için, panel eğim açısı denklem 8 kullanılarak,

$$\tan\beta = \tan\theta_z / \cos\gamma_s \quad (8)$$

Yatay bir düzlemde çift eksenli (kuzey-güney eksenli) bir sistem için panel eğim açısı denklem 9 kullanılarak hesaplanmaktadır [12, 13, 17];

$$\tan\beta = \tan\theta_z / \cos(\gamma - \gamma_s) \quad (9)$$

Eğimli bir yüzey üzerine düşen toplam ışınım 3 farklı ışınımından oluşur. Bunlar; yüzeye doğrudan güneşten gelen ışınım olan direkt ışınım, güneş ışınımının atmosferde bulunan toz taneleri ve bulutlar tarafından bir miktarı yutulduğu veya saçıldığı yaygın ışınım ve yansıyan ışınımdır. Eğik bir yüzey üzerine (Güneş panellerine) gelen toplam ışınım denklem 10 kullanılarak hesaplanır. Bu denklemde $R_d (I_t - I_y)$ ifadesi eğimli yüzeye düşen direkt ışınım değerini göstermektedir.

$$I_{et} = R_d (I_t - I_y) + (I_y) [1 + \cos(s) / 2] + (I_t) \times \rho [1 - \cos(s) / 2] \quad (10)$$

2.2. PVGIS Metodundaki Hesaplamalar

PVGIS simülasyon aracı, Avrupa Komisyonu'nu tarafından finanse edilen, İtalya Ortak Araştırma Merkezi'nde geliştirmiş çevrimiçi bir simülasyon aracıdır. PVGIS'in harita temelli kullanıcı ara yüzü kullanıcıların istedikleri konumu seçmesini sağlamaktadır. Herhangi bir

konumu enlem ve boylam koordinatlarını belirtilmiş alana girerek yapmak mümkündür [19]. PVGIS simülasyon programında eğimli yüzeyler üzerine gelen toplam güneş ışınımı güneş yükseklik açısı, güneş azimut açısı aynı zamanda eğim açısı değerlerine bağlı olarak hesaplanmaktadır. Muneer'in geliştirdiği bu model gökyüzünün açık veya bulutlu olduğu durumları birbirinden ayırarak ışınımı tahmin etmektedir [20].

Bulutlu hava koşullarında PVGIS metodu eğimli düzleme düşen ışınımı hesaplamak için denklem 11'u kullanmaktadır;

$$G_{dT} = G_d \left[\left(\frac{1+\cos\beta}{2} \right) + 0,25227 \cdot \left(\sin\beta - \beta \cdot \cos\beta - \pi \left(\sin \frac{\beta}{2} \right)^2 \right) \right] \quad (11)$$

Gökyüzünün güneşli hava koşulları için eğimli düzlem üzerine gelen ışınım;

$$G_{dT} = G_d \left[\left(\frac{1+\cos\beta}{2} \right) + \left(\sin\beta - \beta \cdot \cos\beta - \pi \left(\sin \frac{\beta}{2} \right)^2 \right) \cdot \left(0,00263 - 0,712 \frac{G_b}{G_0} - 0,6883 \cdot \left(\frac{G_b}{G_0} \right)^2 \right) \cdot \left(1 - \frac{G_b}{G_0} \right) + \left(\frac{G_b}{G_0} \cdot \frac{\cos\xi}{\cos\sigma_z} \right) \right] \quad (12)$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır. Denklem 11 ve 12'de G_d , yatay düzlem üzerine gelen ışınımı [W/m^2] ve G_0 , atmosfer dışı toplam güneş ışınımı [W/m^2].

2.3. PVsyst Metodundaki Hesaplamalar

PVsyst programı, 1992 yılında Cenevre Üniversitesinde doktora fizikçisi André Mermoud tarafından geliştirilmiş ve 1999 yılında Mermoud tarafından grafik ara yüz özelliklerini etkinleştirmiş bir programdır [21]. Güneş panellerinin eğim açısının belirlenmesi ve bu eğim açısının PV panellerden üretilen enerji üzerindeki etkisini hesaplamak için PVsyst programı tarafından elde edilen transpozisyon faktörü kullanılmaktadır. Transpozisyon faktörü, kazanç ve kayıp oranlarının hesaplanmasında önemli bir etkidir. Bu program sistemin konfigürasyonunun tasarlanmasına yardımcı olmakta ve aynı zamanda üretilen enerji miktarının hesaplanmasını sağlamaktadır. Sonuçlar, temel olarak PV sistemin coğrafi konumuna bağlı olan boyutlandırma sisteminin simülasyonuna dayanmaktadır. Sonuçlar aylık, günlük veya saatlik değerler olarak görüntülenebilen birçok simülasyon değişkenini içerebilmektedir [22].

Yatay düzlem üzerine gelen yıllık toplam global ışınım miktarını G_{YY} ve eğim açısı α olan eğimli yüzeye gelen yıllık toplam global radyasyon miktarını da G_{YE} olarak isimlendirirsek; 0° eğim açısında, ($\alpha = 0^\circ$), $G_{YY}=G_{YE(0)}$ olacaktır. α açısındaki yıllık transpozisyon faktörü $G_{fY(\alpha)}$ $T_{fY(\alpha)}$ gösterilmektedir. Yıllık transpozisyon faktörü denklem 13’de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır [23].

$$T_{fY(\alpha)} = \frac{G_{YE(\alpha)}}{G_{YY}} = \frac{G_{YE(\alpha)}}{G_{YE(0)}} \quad (13)$$

2.4. Simülasyon Programlarında Yapılan Hesaplamalar

Bu çalışmada PVGIS ve PVsyst simülasyon programlarına $0-90^\circ$ arası eğim açıları onda birlik sayılar şeklinde girilerek ayrı ayrı hesaplamalar yapılmakta, maksimum güneş ışınımın miktarının olduğu açı değerleri tespit edilerek, aylık, mevsimlik, altı aylık, yıllık optimum açı değerleri, derece olarak ($^\circ$) bulunmuş ve ara yüz programları kullanılarak grafiksel sonuçlar elde edilmiş ve Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Hesaplama yapılacak illerin coğrafi koordinatları

BAKÜ BÖLGESİ		ABŞERON-HIZI BÖLGESİ		DAĞLIK ŞİRVAN BÖLGESİ		KUBA-HAÇMAZ BÖLGESİ		ŞEKİ-ZAGATALA BÖLGESİ	
BAKÜ ŞEHRİ		SUMGAYIT		AKSU		SİYEZEN		BALAKEN	
Enlem	40.3953	Enlem	40.5897	Enlem	40.5742	Enlem	41.0784	Enlem	41.7038
Boylam	49.8822	Boylam	49.6686	Boylam	48.3896	Boylam	49.1118	Boylam	46.4044
MERKEZİ ARAN BÖLGESİ		GENCE-DAŞKESEN BÖLGESİ		KAZAK-TOVUZ BÖLGESİ		DOĞU ZENGEZUR BÖLGESİ		NAHÇIVAN BÖLGESİ	
YEVLAH		GENCE		TOVUZ		CEBRAYIL		NAHÇIVAN	
Enlem	40.6172	Enlem	40.6831	Enlem	40.9955	Enlem	39.3987	Enlem	39.2083
Boylam	47.1500	Boylam	46.3608	Boylam	45.6166	Boylam	47.0245	Boylam	45.4122
KARABAG BÖLGESİ		MİL-MUĞAN BÖLGESİ		LENKERAN-ASTARA BÖLGESİ		ŞİRVAN-SALYAN BÖLGESİ			
FİZULİ		SAATLI		CELİLABAD		HACIKABUL			
Enlem	39.6003	Enlem	39.9311	Enlem	39.2052	Enlem	40.0394		
Boylam	47.1431	Boylam	48.3697	Boylam	48.5101	Boylam	48.9203		

Çizelge 2’de PVGIS ve PVsyst programlarında hesaplanan optimum eğim açı değerleri arasındaki fark gösterilmektedir. Bu fark PVsyst programından elde edilen açı değerinin PVGIS’te hesaplanan açı değerinden farklılığı olarak verilmiştir. Çizelge 2’de yazılan “-”

işareti PVsyst değerinin PVGIS değerinden az olduğunu göstermektedir. Çizelge incelendiği zaman her iki simülasyon programı arasında en düşük açı farkının ± 0.10 , en fazla eğim açısı farkının ise Nahçıvan ilinde Eylül- Şubat aylarında ± 3.80 olduğu görülmektedir. Ayrıca, Şubat ayında saatli ilinde, Nisan ayında Nahçıvan ilinde, Mayıs ayında Aksu ilinde, Haziran ayında Bakü ilinde, İlk bahar aylarında Cebrayıl ilinde, son olarak Kasım ayında Siyezen ayında her iki simülasyon programından elde edilen açı değerleri aynı oldukları için, hiçbir açı farkı oluşmamaktadır.

Çizelge 3'te her iki simülasyon programından alınan ışınım miktarlarının karşılaştırılması ve aralarındaki ışınım miktarı farkı hesaplanmıştır. Bu fark PVsyst programından elde edilen ışınım miktarının PV GIS'te hesaplanan ışınım miktarından ne kadar fazla veya düşük olduğu yönde hesaplanmıştır. Çizelge 3'te yazılan “-” işareti PVsyst değerinin PVGIS değerinden az olduğunu göstermektedir. İki program arasındaki en düşük ışınım farkı Siyezen ilinde Haziran ayında ($0,06 \text{ kWh/m}^2$), en yüksek ışınım farkıysa Gence ilinde Panel eğimi yıllık sabit açıda ayarlandığı durumunda ($238,7 \text{ kWh/m}^2$) gözükmektedir. Saatli ilinde ise Temmuz ayında PV panel üzerinde düşen ışınım miktarı her iki simülasyon sonuçlarına göre aynı değere sahiptir ($207,87 \text{ kWh/m}^2$).

Çizelge 2. PVGIS ve PVsyst programlarında hesaplanan optimum eğim açısı değerleri arasındaki fark

ŞEHİRLER	Bakü			Sumgayıt			Nahçıvan			Gence			Cebrayıl			Fuzuli			Tovuz		
	PV GIS Optimum Eğim Açısı°	PVSyst Optimum Eğim Açısı°	Eğim Açıları Farkı°	PV GIS Optimum Eğim Açısı°	PVSyst Optimum Eğim Açısı°	Eğim Açıları Farkı°	PV GIS Optimum Eğim Açısı°	PVSyst Optimum Eğim Açısı°	Eğim Açıları Farkı°	PV GIS Optimum Eğim Açısı°	PVSyst Optimum Eğim Açısı°	Eğim Açıları Farkı°	PV GIS Optimum Eğim Açısı°	PVSyst Optimum Eğim Açısı°	Eğim Açıları Farkı°	PV GIS Optimum Eğim Açısı°	PVSyst Optimum Eğim Açısı°	Eğim Açıları Farkı°	PV GIS Optimum Eğim Açısı°	PVSyst Optimum Eğim Açısı°	Eğim Açıları Farkı°
Ocak	59.7	61,6	1.9	60.2	63	2.8	60.3	64	3.7	62.9	65.3	2.4	62.5	63.3	0.8	61.6	63.3	1.7	63.1	65	1.9
Şubat	50.3	49	-1.3	50.8	51.7	0.9	52.3	54.6	2.3	52.7	54.7	2	52.6	52.3	-0.3	50.2	52.3	2.1	52.4	54.5	2.1
Mart	39.4	39,5	0.1	39.7	39,4	-0.3	41	42	1	40.5	41.8	1.3	40.5	40.8	0.3	39.1	40	0.9	40.5	43	2.5
Nisan	27.2	25,6	-1.6	27.5	24,7	-2.8	26.7	26.7	0	26	26.4	0.4	26	24.2	-1.8	24.8	25.7	0.9	26.7	26.9	0.2
Mayıs	16.2	15,4	-0.8	16.5	13,9	-2.6	14.4	13	-1.4	14.7	14.4	-0.3	15	13.9	-1.1	14.5	13	-1.5	15	13.9	-1.1
Haziran	9.3	9,3	0	10	9,2	-0.8	8.7	7,2	-1.5	10	8.7	-1.3	9.3	7.8	-1.5	9.6	8.6	-1	10.3	8.9	-1.4
Temmuz	13.8	11,5	-2.3	13.8	11,6	-2.2	13	9.7	-3.3	13	12	-1	12.3	10	-2.3	12.5	10.3	-2.2	13.8	11.2	-2.6
Ağustos	24	21,9	-2.1	24.1	21,3	-2.8	22.9	23	0.1	23.1	23.2	0.1	22.7	22.3	-0.4	22.6	21.8	-0.8	23.8	24.5	0.7
Eylül	37	34,1	-2.9	37.1	33,3	-3.8	37.6	38.2	0.6	36.2	37.4	1.2	36.6	35.9	-0.7	35.7	34.5	-1.2	37.2	37.3	0.1
Ekim	48.4	45,5	-2.9	48.8	47.2	-1.6	50.2	51.5	1.3	49.1	50.8	1.7	49.1	49.4	0.3	48	46.9	-1.1	49.9	51.1	0.2
Kasım	57.7	59,4	1.7	58.6	59,4	0.8	60.4	61.9	1.5	60.3	61.6	1.3	59.7	61	1.3	59	59.6	0.6	60.8	61.3	0.5
Aralık	62.3	64,2	1.9	63.3	64,6	1.3	63.4	66.2	2.8	66	67.2	1.2	65	65.9	0.9	64.3	65.4	1.1	66.5	66.9	0.4
YILLIK SABİT AÇI	31.6	32.1	0.5	32.1	33	0.9	33.7	36.3	2.6	35	37.2	2.2	34.1	36.2	2.1	32.6	34.7	2.1	35.4	37.4	2
KIŞ	57	59.3	2.3	58.2	60.4	2.2	58.8	61.6	2.8	61.1	64	2.9	60.4	61	0.6	59.1	60.9	1.8	61.1	63	2.9
İLK BAHAR	26.1	25.6	-0.5	26.7	24.7	-2	26.7	27.4	0.7	26.6	28	1.4	26	26	0	24.9	25.6	0.7	27	28.5	1.5
YAZ	16	13.9	-2.1	16.3	13.8	-2.5	14.6	13.2	-1.4	15.6	14.4	-1.2	14.7	13.4	-1.3	14.8	12.8	-2	16.1	14.7	-1.4
SON BAHAR	45.5	44.6	-0.9	46.3	46	-0.3	48	49.5	1.5	47.6	49	1.4	47.1	47.6	0.5	46.2	46.1	-0.1	47.9	48.9	1
MART- AĞUSTOS	20.5	19	-1.5	20.3	19.4	-0.9	20.1	19.8	-0.3	20.3	19.7	-0.6	19.6	18.8	-0.8	19	18.8	-0.2	20.8	20.7	-0.1
EYLÜL- ŞUBAT	50.3	51.3	1	51	53.5	2.5	52.2	56	3.8	53.9	55.9	2	53.6	54.4	0.8	52.3	53.4	1.1	53.8	56.5	2.7

Çizelge 2. (Devam) PVGIS ve PVsyst programlarında hesaplanan optimum eğim açısı değerleri arasındaki fark

ŞEHİRLER	Yevlah			Aksu			Balaken			Sivezen			Hacıgabal			Saatlı			Celilabad		
	PV GIS Optimum Eğim Açısı°	PVsyst Optimum Eğim Açısı°	Eğim Açları Farkı°	PV GIS Optimum Eğim Açısı°	PVsyst Optimum Eğim Açısı°	Eğim Açları Farkı°	PV GIS Optimum Eğim Açısı°	PVsyst Optimum Eğim Açısı°	Eğim Açları Farkı°	PV GIS Optimum Eğim Açısı°	PVsyst Optimum Eğim Açısı°	Eğim Açları Farkı°	PV GIS Optimum Eğim Açısı°	PVsyst Optimum Eğim Açısı°	Eğim Açları Farkı°	PV GIS Optimum Eğim Açısı°	PVsyst Optimum Eğim Açısı°	Eğim Açları Farkı°	PV GIS Optimum Eğim Açısı°	PVsyst Optimum Eğim Açısı°	Eğim Açları Farkı°
Ocak	61.8	64.2	2.4	60.3	62.8	2.5	62.7	65.2	2.5	59.9	61.9	2	60.3	61.9	1.6	60.5	61.5	1.5	60.3	62.4	2.1
Şubat	52	52.3	0.3	49.8	49.9	0.1	52.8	56.5	3.7	50.5	51.8	1.3	50	49	-1	50.3	50.3	0	50	50.6	0.6
Mart	40.5	40.8	0.3	39.3	39.2	-0.1	40.8	42.1	1.3	38.3	41.8	3.5	39.3	37.9	-1.4	39.3	40	0.7	39.3	39	-0.3
Nisan	26.9	26.3	-0.6	26.4	24.6	-1.8	27.4	28	0.6	26.9	24.4	-2.5	26.4	23.8	-2.6	26.2	24.7	-1.5	26.4	25.1	-1.3
Mayıs	16.2	13.7	-2.5	16.4	16.4	0	16.5	14	-2.5	16	15	-1	16	14.5	-1.5	16	14.1	-1.9	16	13.5	-2.5
Haziran	10.9	8.8	-2.1	11.7	9.8	-1.9	11.5	9.4	-2.1	9.7	9.4	-0.3	10	8.7	-1.3	11	8.6	-2.4	10	8.5	-1.5
Temmuz	13.8	11.3	-2.5	13.6	11.4	-2.2	14.3	11.7	-2.6	14.2	11.8	-2.4	13	10.8	-2.2	13.1	10.7	-2.4	13	9.9	-3.1
Ağustos	24	22.9	-1.1	23.9	21.3	-2.6	24.8	23.6	-1.2	24.2	21.7	-2.5	23.3	21.7	-1.6	23.4	20.7	-2.7	23.3	21	-2.3
Eylül	37.2	35.5	-1.7	37	34.7	-2.3	38	38.1	0.1	38	35.8	-2.2	36	33.7	-2.3	36.2	33.2	-3	36	34.7	-1.3
Ekim	49.1	48.4	-0.7	48.5	46.6	-1.9	49.9	50	0.1	49.5	46.7	-2.8	47.6	44.5	-3.1	47.6	45.1	-2.5	47.6	46	-1.6
Kasım	59.6	60.6	1	59	58.7	-0.3	60.9	61.5	0.6	59	59	0	57.9	59.7	1.8	57.6	59.4	1.8	57.9	57.6	-0.3
Aralık	64.3	66.5	2.3	63	65.3	2.3	65.8	67.5	1.7	63.7	64	0.3	62.8	64.3	1.5	62.8	64.1	1.3	62.8	64.2	-1.4
YILLIK SABİT AÇI	33.8	35.7	1.9	32	33.3	1.3	34.3	36.5	2.2	33	32.8	-0.2	31.7	31.9	0.2	31.9	32.8	0.9	31	33.3	2.3
KIŞ	59.6	61.9	2.3	57.9	60.7	2.8	60.5	64.2	3.7	58.1	60.2	2.1	58	58.9	0.9	58.1	58.5	0.4	57.5	59.4	1.9
İLK BAHAR	26.8	26.1	-0.7	25.5	24.9	-0.6	27	27.4	0.4	25.7	26.3	0.3	25.8	24	-1.8	25.8	24.6	-1.2	24.5	25.1	0.6
YAZ	16.3	14.4	-1.9	16	13.9	-2.1	16.9	14.6	-2.3	16.3	14	-2.3	15.6	13.4	-2.2	15.6	12.8	-2.8	14.6	13	-1.6
SON BAHAR	47.3	47.7	0.4	46.7	46	-1.7	47.9	49.1	1.2	46.7	46.1	-0.6	45.6	44.8	-0.8	45.4	45.1	-0.3	44.5	45	0.5
MART-AĞUSTOS	20.6	19.6	-1	20	19.2	-0.8	20.9	20.6	-0.3	20.3	19.4	-0.9	20	18	-2	19.9	18.2	-1.7	18.8	18.4	-0.8
EYLÜL-ŞUBAT	52.3	54.5	2.2	51	52.8	1.8	53.4	55.9	2.5	51.4	52.8	1.4	50.6	52	1.4	51	52	1	50.4	52.9	2.5

Çizelge 3. PVGIS ve PVsyst programlarında hesaplanan maksimum ışınım değerleri arasındaki fark

SEHİRLER	Bakü			Sumgayıt			Nahçıvan			Gence			Cebrayıl			Fuzuli			Tovuz		
	PV GIS Maks. Işınım Miktarı kWh/m ²	PVSyst Maks. Işınım Miktarı kWh/m ²	Işınım Miktarı Farkı kWh/m ²	PV GIS Maks. Işınım Miktarı kWh/m ²	PVSyst Maks. Işınım Miktarı kWh/m ²	Işınım Miktarı Farkı kWh/m ²	PV GIS Maks. Işınım Miktarı kWh/m ²	PVSyst Maks. Işınım Miktarı kWh/m ²	Işınım Miktarı Farkı kWh/m ²	PV GIS Maks. Işınım Miktarı kWh/m ²	PVSyst Maks. Işınım Miktarı kWh/m ²	Işınım Miktarı Farkı kWh/m ²	PV GIS Maks. Işınım Miktarı kWh/m ²	PVSyst Maks. Işınım Miktarı kWh/m ²	Işınım Miktarı Farkı kWh/m ²	PV GIS Maks. Işınım Miktarı kWh/m ²	PVSyst Maks. Işınım Miktarı kWh/m ²	Işınım Miktarı Farkı kWh/m ²	PV GIS Maks. Işınım Miktarı kWh/m ²	PVSyst Maks. Işınım Miktarı kWh/m ²	Işınım Miktarı Farkı kWh/m ²
Ocak	80,91	108,6	27,69	83,98	115,4	31,42	101,02	156,5	55,48	105,23	153,1	47,87	117,98	144,5	26,52	100,63	136,6	35,97	100,63	142,7	42,07
Şubat	84,2	91,8	7,6	87,3	96,5	9,2	115,65	140,3	24,65	99,02	122	22,98	111,53	117,2	5,67	95,23	110	14,77	95,23	119,4	24,17
Mart	127,23	134,5	7,27	129,77	134,9	5,13	156,3	177,4	21,1	131,77	156	24,23	145,79	150,9	5,11	132,44	143,7	11,26	132,44	158,5	26,06
Nisan	153,43	146,2	-7,23	156,34	145,3	-11,04	167,53	183,8	16,27	138,53	152,9	14,37	156,59	155,2	-1,39	140,6	151,5	10,9	140,6	154,4	13,8
Mayıs	194,99	185,7	-9,29	196,53	183,7	-12,83	194,84	203,8	8,96	164,49	185,6	21,11	191,56	185,3	-6,26	165,71	180,4	14,69	165,71	185,6	19,89
Haziran	209,39	200,3	-9,09	211,55	199,4	-12,15	222,75	234,7	11,95	183,97	201,9	17,93	218,12	206,5	-11,62	189,02	201,8	12,78	189,02	199,1	10,08
Temmuz	206,87	193	-13,87	212,14	193,6	-18,54	231,96	230,4	-1,56	188,95	196,7	7,75	219,1	196,6	-22,5	195,52	193,1	-2,42	195,52	185,6	-9,92
Ağustos	195,17	176,3	-18,87	196,93	175,7	-21,23	220,97	229,7	8,73	180,68	190	9,32	204,15	190,9	-13,25	186,04	183,8	-2,24	186,04	185,5	-0,54
Eylül	160,82	143,4	-17,42	161,37	144,6	-16,77	198,46	211,4	12,94	147,18	167,2	20,02	170,75	163,7	-7,05	155,03	154,3	-0,73	155,03	164,6	9,57
Ekim	120,42	109,5	-10,92	122,6	133,7	11,1	161,12	178,9	17,78	121,97	143,6	21,63	139,7	144,2	4,5	125,92	129,2	3,28	125,92	141,1	15,18
Kasım	86,42	99,2	12,78	90,68	100,1	9,42	137,07	158,2	21,13	106,27	132,7	26,43	118,34	134,9	16,56	107,78	120	12,22	107,78	127,7	19,92
Aralık	77,99	102,3	24,31	85,5	105	19,5	101,77	150,9	49,13	85,5	143,7	58,2	121,37	145,5	24,13	108,9	133,4	24,5	108,9	134,4	25,5
KIŞ	242,34	301,2	58,86	255,9	315,7	59,8	317,52	446,4	122,88	313,71	417,4	103,69	349,64	405,7	56,06	303,43	378,6	75,17	303,43	395,2	91,77
İLK BAHAR	471,31	461,3	-10,01	478,06	458,2	-19,86	511,63	555,7	44,07	429,58	487,3	57,72	487,97	484,5	-3,47	433,45	469,1	35,65	433,45	490,3	56,85
YAZ	609,39	567,8	-41,59	618,48	567	-51,48	672,87	690,6	17,73	551,76	586,1	34,34	639,08	591,3	-47,78	568,59	576,6	8,01	568,59	567,1	-1,49
SON BAHAR	364,65	347,6	-17,05	371,3	354	-17,3	491,07	541,6	50,53	371,03	438	66,97	424,08	436,9	12,82	384,3	398,3	14	384,3	428,1	43,8
MART-AĞUSTOS	1077,82	1025,3	-52,52	1093,5	1021,9	-71,6	1179,74	1238,8	59,06	978,27	1068,2	89,93	1122,96	1071	-51,96	998,95	1041,2	42,25	998,95	1052,2	53,25
EYLÜL-ŞUBAT	604,57	645	40,43	624,58	665,4	30,82	805,97	982,9	176,93	680,93	850,1	169,17	769,52	837,8	68,28	684,14	711,4	27,26	684,14	818,4	134,26
YILLIK SABİT AÇI	1642,94	1621,8	-21,24	1675,45	1633,1	42,35	1925,59	2136,2	210,61	1607,1	1845,8	238,7	1831,19	1837,4	6,21	1630,83	1749,6	118,77	1630,83	1804,3	173,47

Çizelge 3. (Devam) PVGIS ve PVSyst programlarında hesaplanan maksimum ışınım değerleri arasındaki fark

ŞEHİRLER	Yevlah			Aksu			Balaken			Siyezzen			Hacıgabal			Saatli			Celilabad		
	PV GIS Maks, Işınım Miktarı kWh/m ²	PVSyst Maks, Işınım Miktarı kWh/m ²	Işınım Miktarı Farkı kWh/m ²	PV GIS Maks, Işınım Miktarı kWh/m ²	PVSyst Maks, Işınım Miktarı kWh/m ²	Işınım Miktarı Farkı kWh/m ²	PV GIS Maks, Işınım Miktarı kWh/m ²	PVSyst Maks, Işınım Miktarı kWh/m ²	Işınım Miktarı Farkı kWh/m ²	PV GIS Maks, Işınım Miktarı kWh/m ²	PVSyst Maks, Işınım Miktarı kWh/m ²	Işınım Miktarı Farkı kWh/m ²	PV GIS Maks, Işınım Miktarı kWh/m ²	PVSyst Maks, Işınım Miktarı kWh/m ²	Işınım Miktarı Farkı kWh/m ²	PV GIS Maks, Işınım Miktarı kWh/m ²	PVSyst Maks, Işınım Miktarı kWh/m ²	Işınım Miktarı Farkı kWh/m ²	PV GIS Maks, Işınım Miktarı kWh/m ²	PVSyst Maks, Işınım Miktarı kWh/m ²	Işınım Miktarı Farkı kWh/m ²
Ocak	96,17	136	39,83	83,62	113,2	29,58	86,27	130,4	44,13	75,26	101,4	26,14	90,83	115,3	24,47	92,35	113,5	21,15	91,13	131,7	40,57
Şubat	95,34	105,9	10,56	80,06	90	9,94	91,57	118,6	27,03	78,68	89,8	11,12	85,54	90,6	5,06	89,86	91,7	1,84	83,56	103,2	19,64
Mart	134,4	143,8	9,4	122,38	126,5	4,12	124,04	148,8	24,76	111,21	131,3	20,09	129,61	128,7	-0,91	128,63	129,3	0,67	123,6	138,4	14,8
Nisan	148,38	149,9	1,52	144,06	137,8	-6,26	140,67	156	15,33	139,36	141	1,64	149,99	139,3	-10,69	147,26	139,3	-7,96	140,36	148,2	7,84
Mayıs	182,15	183,2	1,05	188,7	180,6	-8,1	177,25	187,7	10,45	170,18	179,8	9,62	192,92	181,7	-11,22	189,02	179,4	-9,62	183,91	182,2	-1,71
Haziran	202,56	200,2	-2,36	208,02	193,7	-14,32	198,18	205,2	7,02	193,36	193,3	-0,06	210,1	196,7	-13,4	209,3	195,9	-13,4	207,45	202,6	-4,85
Temmuz	204,74	192,5	-12,24	207,33	184	-23,33	197,42	193,5	-3,92	196,98	186,4	-10,58	208,73	187,6	-21,13	207,87	207,87	0	205,12	193,8	-11,32
Ağustos	193,19	182	-11,19	196,26	174,6	-21,66	189,04	186,5	-2,54	182,68	171,4	-11,28	197,86	176,3	-21,56	195,55	174,3	-21,25	192,19	180,8	-11,39
Eylül	158,92	156,4	-2,52	159,32	143,8	-15,52	157,64	168	10,36	146,43	142,1	-4,33	155,87	141	-14,87	156,05	139,8	-16,25	145,92	144	-1,92
Ekim	125,33	127	1,67	120,33	111,4	-8,93	120,67	134	13,33	113,33	106,9	-6,43	119,44	108,4	-11,04	118,96	110,2	-8,76	115,03	120,1	5,07
Kasım	103,51	116,7	13,19	95,76	100,8	5,04	99,16	116,9	17,74	85,68	94,3	8,62	94,47	104,1	9,63	93,73	103,7	9,97	91,17	109,6	18,43
Aralık	95,35	128,3	32,95	82,83	110,6	27,77	92,04	126,4	34,36	79,36	96,6	17,24	88,71	106,8	18,09	88,71	108,4	19,69	89,62	121,8	32,18
KIŞ	285,91	368,5	82,59	245,59	312,3	66,71	268,85	374,3	105,45	232,45	287	54,55	262,1	311,2	49,1	269,99	312,4	42,41	263,28	355,4	92,12
İLK BAHAR	459,94	470,2	10,26	450,95	440,1	-10,85	437,29	485,1	47,81	417,26	445,8	28,54	467,99	445	-22,99	460,45	442,2	-18,25	443,67	463	19,33
YAZ	598,4	572,2	-26,2	609,52	550,7	-58,82	582,57	582,7	0,13	571,29	549,4	-21,89	614,61	558,6	-56,01	610,64	555,3	-55,34	602,86	575,2	-27,66
SON BAHAR	383,86	395	11,14	371,86	351,9	-19,96	373,49	414,2	40,71	342,17	339,7	-2,47	366,36	348,8	-17,56	365,45	348,9	-16,55	348,71	369,9	21,19
MART-AĞUSTOS	1055,19	1038,3	-16,89	1057,87	987,6	-70,27	1017,14	1062,7	45,56	986,42	991,6	5,18	1079,59	1000,6	-78,99	1068,13	993,5	-74,63	1043,86	1034,2	-9,66
EYLÜL-ŞUBAT	666,7	758,3	91,6	615,07	659,8	44,73	639,3	783,1	143,8	572,42	622,9	50,48	625,63	655,9	30,27	632,48	657,1	24,62	609,16	720,6	111,44
YILLIK SABİT AÇI	1673,91	1734	60,09	1630,37	1595,2	-35,17	1609,08	1779,3	170,22	1519,01	1566,1	47,09	1662,23	1604,5	-57,73	1657,18	1599,3	-57,88	1609,52	1696,1	86,58

3. SONUÇLAR

Hesaplama yapılan PVGIS simülasyon sonuçlarına göre PV panel eğim açısı yıllık sabit açıda ayarlanırsa hesaplama yapılan 14 farklı bölge içinde PV panel üzerine gelen en fazla ışınım miktarının Nahçıvan bölgesinde olduğu görülmektedir. Bu değer (1925,59 kWh/m²) panel eğim açısının 33,7° olarak ayarlandığı zaman görülmektedir. PVsyst simülasyon programında hesaplama yapıldığı zamansa panel üzerine gelen en yüksek ışınım miktarının yine Nahçıvan bölgesinde olduğu sonucuna varılmıştır (2136,2 kWh/m²). Bu değer ise PVsyst programında panel eğim açısının 36,3° olarak ayarlandığı zaman görülmektedir. Nahçıvan bölgesi için paneli eğim açısı yıllık sabit açıda ayarlandığı zaman her iki program arasında 2,6°'lik bir eğim açısı farkı ve 210,61 kWh/m²'lik (veya ≈ %11) ışınım miktarı farkı ortaya çıkmaktadır. Her iki simülasyon programı karşılaştırıldığı zaman Azerbaycan'da Nahçıvan ili için en fazla verim PV sistemin eğim açısının yılın her ayı (yılda 12 kez) değiştirildiği zaman elde edilmektedir. Bu değerler PVGIS programında 2009,44 kWh/m², PVsyst programındaysa 2256 kWh/m² olarak elde edilmiştir. Nahçıvan ili için yılın her ayı panel eğim açısı değiştirildiği zaman yıllık sabit optimum eğim açısına göre %4,35 (PVGIS) ve %5,60 (PVsyst) verim artışı elde edildiği tespit edilmiştir.

PVGIS ve PVsyst değerlerine bakıldığı zaman tüm eğim açısı ayarları dikkate alındığında Nahçıvan'da kurulan bir PV sistemden diğer illere göre %14,9 ila %38 daha fazla elektrik enerjisi elde edile bilinmektedir. PVsyst verilerine göre Nahçıvan ilinin Siyezen ve Gence illerine göre ne kadar fazla elektrik enerjisi ürettiği hesaplandığında Siyezen iline kıyasla 469 MWh/yıl, Gence ili ile kıyaslandığıdaysa 231,8 MWh/yıl daha fazla elektrik enerjisi ürettiği sonucuna varılmıştır. Hesaplamalar 1 MWp'lik saha için yapılmış ve bu hesaplamada Trina Solar firmasının üretmiş olduğu TSM-335DD14A(II) markalı 335Wp'lik monokristal güneş paneli ve Huawei firmasının üretmiş olduğu SUN2000-125KTL-M0 markalı 125kW'lık invertör kullanılmıştır.

Çalışmada yapılan hesaplamalar sonucunda, Nahçıvan ilindeki Güneş enerji potansiyelinin diğer illere bakıldığı zaman daha etkili olduğunu göstermektedir. Bu bilgilerden yola çıkarak daha detaylı şekilde bir inceleme yapılırsa ülke genelinde bir optimum eğim açısı haritası oluşturulabilir, bu şekilde Azerbaycan'ın tüm illeri için güneş enerjisinden daha verimli şekilde fayda elde edilebilir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları herhangi bir kurum, kuruluş, kişi ile kişisel ve finansal çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedirler.

KAYNAKLAR

- [1]Hernández-Callejo, L. Gallardo-Saavedra S., Alonso-Gómez(2019). A review of photovoltaic systems: Design, operation and maintenance, *Solar Energy*, 88, 426-440
- [2] Koç, E. ve Şenel, M. C. (2013). Dünyada ve Türkiye’de Enerji Durumu–Genel Değerlendirme. *Mühendis ve Makina Dergisi*, 54 (639), 32-44.
- [3] Şenel, M. C. (2012). Rüzgar Türbinlerinde Güç İletim Mekanizmalarının Tasarım Esasları–Dinamik Davranış. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü., 202s.
- [4] Ember; Energy Institute Statistical Review of World Energy (2023), [http-1: https://ember-climate.org/data-catalogue/yearly-electricity-data/](http://ember-climate.org/data-catalogue/yearly-electricity-data/) (Erişim tarihi: 20.07.2023).
- [5] Yağlı, H., Koç, Y., Koç, A., Görgülü, A., ve Tandiroğlu, A. (2016). Parametric Optimization and Exergetic Analysis Comparasion of Subcritical and Supercritical Organic Rankine Cycle (ORC) for Biogaz Fuelled Combined Heat and Power (CHP) Engine Ex-haust Gas Waste Heat. *Energy.*, 111, 922- 930.
- [6] Handbook of Solar Radiation Data for India, Anna Mani, Allied Publishers, New Delhi, 1981.
- [7] Köse, S. (1986). Yarıiletken Güneş Pilleri ve Verimlilikleri. Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü., 78s.
- [8] https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/phys-2022-0042/html?lang=en#j_phys-2022-0042_ref_007 (Erişim tarihi: 02.09.2023).
- [9] B. Belmahdi and A. El Bouardi. (2020) Solar potential assessment using PVsyst software in the northern zone of Morocco. *Procedia Manufacturing.*, 46, 738–745.
- [10] Dal, A. R. (2021). Güneş Enerji Panellerindeki Optimum Eğim Açısının Verime Etkisinin İncelenmesi. *BŞEÜ Fen Bilimleri Dergisi.*, 241-250.
- [11] Taha, H. M. and Hameed, S. (2020). Optimization of Tilt Angle of a PV System to Get Maximum Generated Power: a Case Study. *Kurdistan Journal of Applied Research.*, 5 (2), 71-81.
- [12] R. A. Messenger, J. Ventre (2003) Photovoltaic systems engineering, Boca Raton, U. S.A, CRC Press.

- [13] J. A. Duffie, W. A. Beckman. (2006). Solar engineering of thermal processes. Wiley, Hoboken, New Jersey, U. S. A.
- [14] Patkó, I., Szeder, A. and Patkó, C. (2013). Evaluation the impact tilt angle on the sun collectors. Energy Procedia., 32, 222-231.
- [15] Darhmaoui, H., & Lahjouji, D. (2013). Latitude based model for tilt angle optimization for solar collectors in the Mediterranean region. Energy Procedia., 42, 426-435.
- [16] Şenpınar, A. (2006). Güneş Açılarına Bağlı Olarak Optimum Sabit Güneş Paneli Açısının Hesaplanması. Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi., 4 (2), 36-41.
- [17] Stine, W. B. and Geyer, M. (2015). Power from the Sun.
- [18] Despotovic, M. and Nedic, V. (2015). Comparison of optimum tilt angles of solar collectors determined at yearly, seasonal and monthly levels. Energy Conversion and Management., 97, 121-131.
- [19] http- 48: <https://www.whatnextnow.com/home/solar/PVGIS-a-comprehensivesolar-panel-calculator-for-photovoltaic-systems> (Erişim tarihi: 05.09.2023).
- [20] Gracia, A. M. and Huld, T. (2013). Performance comparison of different models for the estimation of global irradiance on inclined surfaces. European Comission: Luxemburg.
- [21] http- 51: <https://www.purepower.com/blog/when-to-use-pvsyst-helioscopeand-sam> (Erişim tarihi: 05.09.2023).
- [22] Kumar, R., Rajoria, C. S., Sharma, A. and Suhag, S. (2021). Design and simulation of standalone solar PV system using PVsyst Software: A case study. Materials Today: Proceedings., 46, 5322-5328.
- [23] Ekanem, O. D. and Onojo, J. O. (2017). Determination of yearly fixed optimal tilt angle for flat-plate photovoltaic modules based on perez transposition model. American Journal of Software Engineering and Applications., 6 (3), 80.