

YAYINCI
PUBLISHER



MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ ve TASARIM DERGİSİ

**JOURNAL OF ENGINEERING
SCIENCES AND DESIGN**

e-ISSN: 1308-6693

Cilt/Volume: 12 Sayı/Issue : 3 Eylül/September 2024

İmtiyaz Sahibi / Owner

Deanery of Engineering and Natural Sciences Faculty, Suleyman Demirel University, Isparta, TURKIYE

Editörler / Editors

Gultekin OZDEMİR

Suleyman Demirel University, Isparta
(Baş Editör / Editor-in-Chief)

Fatma AKSEVER

Suleyman Demirel University, Isparta
(Editör Yrd. / Co-Editor)

Fatih Ahmet SENEL

Suleyman Demirel University, Isparta
(Editör Yrd. / Co-Editor)

Karani KURTULUS

Suleyman Demirel University, Isparta
(Editör Yrd. / Co-Editor)

Ali AGCAL

Suleyman Demirel University, Isparta

Caglayan BALKAYA

Suleyman Demirel University, Isparta

Atilla BAYRAM

Van Yuzuncu Yil University, Van

Sehnaz Sule KAPLAN BEKAROĞLU

Suleyman Demirel University, Isparta

Mehmet Ali BELEN

Artvin Coruh University, Artvin

Ahmet CAGLAR

Akdeniz University, Antalya

Habib GURBUZ

Suleyman Demirel University, Isparta

Baris GUREL

Suleyman Demirel University, Isparta

Tahir Serkan IRMAK

Kocaeli University, Kocaeli

Mesud KAHRIMAN

Suleyman Demirel University, Isparta

Ayberk KAYA

Recep Tayyip Erdoğan University, Rize

Şemsettin KILINCARSLAN

Suleyman Demirel University, Isparta

Alper KUSCU

Suleyman Demirel University, Isparta

Mehmet Onur OLGUN

Suleyman Demirel University, Isparta

Mehmet OZCELİK

Suleyman Demirel University, Isparta

Muhammed Maruf OZTURK

Suleyman Demirel University, Isparta

Savas OZUN

Suleyman Demirel University, Isparta

Yunus PAMUKOĞLU

Suleyman Demirel University, Isparta

Olcay POLAT

Pamukkale University, Denizli

Hakan TONGAL

Suleyman Demirel University, Isparta

Volkan UZ

Izmir Institute of Technology, Izmir

Ali YALCIN

Suleyman Demirel University, Isparta

Mehmet Ali YALCINKAYA

Kırşehir Ahi Evran University, Kırşehir

Kerim YAPICI

Suleyman Demirel University, Isparta

Demet YILMAZ

Suleyman Demirel University, Isparta

Turgay AYDOĞAN

Suleyman Demirel University, Isparta

Danışma Kurulu / Editorial Advisory Board

Michael G. KAY
North Carolina State University, USA

Bedri TUC
Baskent University, Ankara, TR

Yun-Chia LIANG
Yuan Ze University, Taoyuan, TW

Erol TUTUMLUER
University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois, USA

Alice E. SMITH
Auburn University, Auburn, USA

Fatma YALCINKAYA
Technical University of Liberec, Liberec, Czech Republic

Ravi SANKAR
University of South Florida, Florida, USA

Gerhard-Wilhelm WEBER
Poznan University of Technology, Poznan, PL

Yayın Editörleri / Technical Editors

Ayşe BIYIKLI
Suleyman Demirel University, Isparta

Yasemin SIMSEK TURKER
Suleyman Demirel University, Isparta

Mehmet KIR
Suleyman Demirel University, Isparta

Onur Mustafa UZUM
Suleyman Demirel University, Isparta

Sıla YAMAN
Suleyman Demirel University, Isparta

Yabancı Dil Editörü / Foreign Language Editor

Ahmet UNAL
Suleyman Demirel University, Isparta

Dizin ve İndeksler / Abstracting & Indexing

/ TR-DIZIN / EBSCOhost / SCILIT / ROAD / EuroPUB / SOBIAD /
/ Google Scholar / CrossRef

Duyurular / Announcements

Dergiye 01 Haziran 2022 tarihinden itibaren özgün "Araştırma Makalesi" türü dışındaki başvurular kabul edilmemektedir.

As of 01 June 2022, submissions other than the original "Research Paper" type will not be submitted.

İçindekiler / *Contents*

Araştırma / <i>Research</i>	Sayfa / <i>Pages</i>
1. MUZ VE PİRİNÇ KABUĞU TOZLARININ POLİPROPİLENİN FİZİKSEL, TERMAL VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ Elif Ulutaş* , Münir Taşdemir	466-475
2. FOTOVOLTAİK SİSTEM ENTEGRELİ ELEKTRİKLİ ARAÇ ŞARJ SİSTEMLERİNDE OPTİMUM KAPASİTENİN BELİRLENMESİ Ramazan Ayaz , Hakan Akça*	476-487
3. CLASSIFICATION OF ACUTE LYMPHOBLASTIC LEUKEMIA CELLS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE Ayşe Berika Varol Malkoçoğlu , İsmail İşeri*	488-504
4. CLASSIFICATION OF X-RAY AND CT IMAGES IN DIFFERENT COLOR SPACES USING ROBUST CNN Nesrin Aydın Atasoy* , İrem Kura	505-516
5. DEEP LEARNING BASED NETWORK INTRUSION DETECTION Güneş Harman , Emine Cengiz*	517-530
6. GÜNEY MARMARA HAVZASI'NDA SWAT+ MODELİ İLE HİDROLOJİK MODELLEME Halil Emre Kışlıoğlu* , Şehnaz Şule Bekaroğlu , Filiz Dadaser-celik	531-543
7. DAĞBELİ KÖYÜ (ANTALYA) GÜNEYİ KİREÇTAŞI AKİFERİNİN HİDROJEOKİMYASAL ÖZELLİKLERİ Ayşen Davraz , Şehnaz Şener* , Erhan Şener	544-556

- [8. GOOSE ALGORİTMASI KULLANILARAK ÇİFT BANTLI MİKROŞERİT BAĞLANTILI KOMBİNE BANT GEÇİREN FİLTRE TASARIM PROBLEMİNDE DİZİ ARALIK SEÇİMİNİN SONUÇ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ](#) 557-571
[Ahmet Uluslu*](#), [Kervendurdy Allaberdiyev](#)
- [9. INVESTIGATION OF PHYSICAL, MECHANICAL AND THERMAL PROPERTIES OF MINERAL ADMIXED AUTOCLAVED FOAM CONCRETE](#) 572-584
[Nuri Işıldar*](#), [Şemsettin Kılınçarslan](#), [Metin Davraz](#)
- [10. INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF DENSITY ON PHYSICAL, MECHANICAL AND THERMAL PROPERTIES OF FOAM CONCRETE](#) 585-594
[Metin Davraz](#), [Şemsettin Kılınçarslan](#), [Murat Kuru*](#)
- [11. EXPLORING THE EFFECTS OF STITCHING PROCESS ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF THREE- DIMENSIONAL \(3D\) STITCHED UNIDIRECTIONAL COMPOSITES](#) 595-602
[Mehmet Korkmaz*](#)



MUZ VE PİRİNÇ KABUĞU TOZLARININ POLİPROPİLENİN FİZİKSEL, TERMAL VE TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Elif ULUTAŞ^{1*}, Münir TAŞDEMİR¹

¹ Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Polipropilen, Polimer Kompozit, Muz Kabuğu, Pirinç Kabuğu, Organik Atık.</i>	Son yıllarda, geleneksel seramik, metal ve polimerlerin yerini alabilecek üstün özelliklere sahip ve ekonomik açıdan avantajlı malzemelere yönelik ilgi önemli ölçüde artmıştır. Bu durum, malzeme bilimi ve mühendisliği alanındaki araştırmacıların dikkatlerini kompozit malzemelere yönlendirmesine neden olmuştur. Özellikle çevre dostu ve sürdürülebilir özelliklere sahip biyo-bazlı kompozitler, bu alandaki çalışmaların odak noktası haline gelmiştir. Bu araştırma çalışmasında, toz formda kullanılan muz kabuğu (MK) ve pirinç kabuğu (PK) oranlarının polimer kompozitler üzerindeki fiziksel, termal ve tribolojik etkileri incelenmiştir. Polimer kompozit üretiminde, atık kazanımına katkıda bulunması amacıyla geri dönüştürülmüş polipropilen (R-PP) tercih edilmiştir. Çalışma kapsamında yapılan deney sonuçları, organik atıkların R-PP'nin termal direncini artırdığını ortaya koymuştur. Ağırlıkça %30 konsantrasyonunda takviye ilavesiyle, ısıl çarpılma sıcaklığı (HDT) ve vicat yumuşama sıcaklığı sırasıyla %5 ve %4 oranında artış göstermiştir. MK/PK oranının artması yoğunluğu artırırken, aşınma oranının da artmasına neden olmuştur. Organik katkı maddelerinin yapısındaki hidrofilik bölgelerin nem çekme özelliği nedeniyle, maksimum takviye oranıyla polimer kompozitlerin nem emme oranı %36 artmıştır.

THE EFFECT OF BANANA AND RICE HUSK POWDERS ON THE PHYSICAL, THERMAL, AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF POLYPROPYLENE

Keywords	Abstract
<i>Polypropylene, Polymer Composite, Banana Peel, Rice Husk, Natural Waste.</i>	In recent years, there has been a significant increase in interest in materials with superior properties and economic advantages that can replace traditional ceramics, metals, and polymers. This shift has led researchers in the field of materials science and engineering to focus on composite materials. Particularly, bio-based composites with environmentally friendly and sustainable attributes have become the focal point of studies in this domain. This research study investigated the effects of banana peel (BP) and rice husk (RH) powders, used in particulate form, on the physical, thermal, and tribological properties of polymer composites. Recycled polypropylene (R-PP) was chosen for the production of polymer composites due to its contribution to waste recovery. Experimental results indicated that organic waste materials enhance the thermal resistance of R-PP. With the addition of 30 wt% reinforcement, the heat deflection temperature (HDT) and Vicat softening temperature increased by 5% and 4%, respectively. An increase in the BP/RH ratio led to a higher density and an increase in wear rate. Due to the moisture-absorbing nature of the hydrophilic regions within the organic additives, the moisture absorption rate of the polymer composites increased by 36% at the maximum reinforcement level.

Alıntı / Cite

Ulutaş, E., Taşdemir, M., (2024). Muz ve Pirinç Kabuğu Tozlarının Polipropilenin Fiziksel, Termal ve Tribolojik Özelliklerine Etkisi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 12(3), 466-475.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

E. Ulutaş, 0000-0001-7753-8878
M. Taşdemir, 0000-0001-8635-7251

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	02.04.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date	27.06.2024
Kabul Tarihi / Accepted Date	12.07.2024
Yayın Tarihi / Published Date	26.09.2024

* İlgili yazar / Corresponding author: elif.ulutas@marmara.edu.tr , +90 535 025 0125

THE EFFECT OF BANANA AND RICE HUSK POWDERS ON THE PHYSICAL, THERMAL, AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF POLYPROPYLENE

Elif Ulutaş^{1†}, Münir Taşdemir¹

¹ Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Highlights (At least 3 and maximum 4 sentences)

- Composites containing natural additives were prepared by extrusion.
 - The effect of reinforcement ratio on physical properties was examined.
 - The behavior of MK/PK powders in the matrix was examined by microstructural analysis.
-

Purpose and Scope

Within the scope of the study, the usability of organic wastes in polymer composites and their effects on physical properties were examined. It is aimed to improve the physical properties of cheap and easily processable PP with natural additive reinforcement. Another issue in the development of polymer composites is the recovery of waste without using synthetic additives.

Design/methodology/approach

Thermoplastic composites containing various amounts of organic fillers are materials with a low environmental impact. It is of great interest because it does not adversely affect the environment when disposed of, is economically suitable, and has advanced features. The extrusion system is widely used in the processing of particle-reinforced polymer composites. R-PP/MK/PK polymer composites obtained within the scope of the study were produced in a twin-screw extrusion machine. Among the methods of shaping polymer composites, injection molding is a widely used. With this method, we can achieve high processing speeds and product efficiency. The molding process of polymer composites was carried out in an injection machine.

Findings

With the addition of MK/PK mixture, the thermal properties of polymer composites improved and the moisture absorption in the composite increased. While density increased with the addition of organic waste, MFI decreased. As a result of the wear rate determination at a 40 m wear distance, the wear rate also increased as the amount of reinforcement increased.

Research limitations/implications (if applicable)

This work provides an effective strategy to improve the thermal properties of R-PP/MK/PK polymer composites and offers a new perspective for the utilization of organic wastes such as banana peels and rice husks. At the same time, it is thought that increasing the efficiency between the filler and the polymer matrix will be effective in improving the physical properties. To establish new interactions at the interface, a suitable compatibilizer material should be preferred in future studies.

Originality

This study presents the effect of organic wastes in improving the properties of polymer composites. R-PP/MK/PK polymer composites have become a new perspective on the development of materials in terms of waste utilization and providing good economic returns.

[†] İlgili yazar / Corresponding author: elif.ulutas@marmara.edu.tr , +90 535 025 0125

1. Giriş (Introduction)

Hızla değişen dünyada artan malzeme kullanımı ve ekolojik değişiklikler, hammadde temini açısından ciddi tehditler oluşturmaktadır. Bu durum, bilim insanları ve araştırmacıları biyolojik olarak parçalanabilen yeni malzemeler arayışına yönlendirmiştir (Rao vd., 2021). Çevre sorunları ve kaynak kıtlığı konusundaki artan farkındalık, biyo bazlı malzemelerin çeşitli uygulamalarda kullanımına olan ilgiyi artırmaktadır. Organik atık bileşenlerinin geri kazanımı ve ikincil kullanımına yönelik teşvikler, çevresel farkındalık, ekonomik faktörler ve küresel politikaların birleşimiyle desteklenmektedir (Väisänen vd., 2016).

Malzeme mühendisliği alanında doğal takviyeler, binlerce yıldır çeşitli uygulamalarda kullanılan önemli bir bileşen olarak karşımıza çıkmaktadır. Günümüzde bu takviyeler, özellikle polimer matrislerle birleştirilerek malzemelerin mekanik özelliklerini artırmak ve çevresel etkileri azaltmak amacıyla yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Kenevir, jüt, muz gibi bitkisel kökenli takviyeler, yenilenebilir kaynaklardan elde edilmeleri ve biyobozunabilir olmaları nedeniyle özellikle dikkat çekmektedir (Sakthivei ve Ramesh, 2013). Organik atıkların termoplastik veya termoset matrise dahil edilmesi, nihai ürünün fiyatının önemli ölçüde azaltılmasına ve mekanik, termo-mekanik, fiziksel ve termal özelliklerinin iyileştirilmesine olanak sağlar (Çavuş ve Mengeloğlu, 2017; Barczewski vd., 2019; Chun vd., 2020; Boran Torun, 2021; Dubey vd., 2021).

Literatürde, bitkilerin farklı bölgelerinden elde edilen dolgu maddelerinin araştırılması, malzeme bilimi ve mühendisliği alanında önemli bir araştırma konusu olarak yer almaktadır. Bu dolgu maddeleri genellikle bitkinin sapları, kabukları, yaprakları ve diğer odunlaşmış parçaları gibi çeşitli kaynaklardan elde edilmekte ve kullanılmaktadır (Pauksza, 2014; Kaymakçı vd., 2013; Büyükkaya, 2017; Arjmandi vd., 2015; Pradhan vd., 2020; Suhot vd., 2021; Laaziz vd., 2017). Takviye malzemesi seçimi, kullanılacak dolgu maddesinin yerel mevcudiyetine, atık yönetimi gereksinimlerine ve nihai ürünün özelliklerine bağlı olarak belirlenmektedir. Doğal takviyelerin etkinliği, sadece geometrisinden (örneğin, lif veya partikül formu) değil, aynı zamanda içerdikleri kimyasal bileşenlerden kaynaklanmaktadır. Bu bileşenler arasında selüloz, hemiselüloz, lignin, nişasta, protein ve lipitler bulunmaktadır ve bu kimyasal bileşenler malzemenin mekanik, termal ve fiziksel özelliklerini belirlemede önemli rol oynamaktadır (Barczewski vd., 2019; Gholampour ve Özbakkaloğlu, 2020; Vigneshwaran vd., 2020). Polimerler üzerindeki etkilerinin araştırıldığı organik atıklara mısır koçanı, fındık kabuğu, pirinç kabuğu, odun lifi, pamuk lifi, ayçiçeği çekirdeği kabuğu, muz kabuğu örnek olarak verilebilir (Adeniye ve ark., 2019; Arjmandi ve ark., 2015; Barczewski ve ark., 2019; Demir ve Elmalı, 2020; Mistik ve Merdan, 2011; Taşdemir ve Şen, 2022). Pirinç kabuğu, pirincin toplam ağırlığının yaklaşık %20'sini oluşturur ve kimyasal bileşimi genellikle şu şekildedir: %50 selüloz, %25-30 lignin, %15-20 silika ve %10-15 nem içermektedir (Singh, 2018). Muz kabuğu ise kimyasal yapısında %60-65 selüloz, %6-19 hemiselüloz, %5-10 lignin içermektedir (Wijianto vd., 2019).

Salasinka ve Ryszkowska'ya ait bir çalışmada, ayçiçeği kabuğu ve fındık kabuğu tozlarının polietilenin (PE) çekme dayanımı, sertlik ve darbe özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Dolgu türünün etkisinin incelendiği çalışmada, fındık kabuğu içeren numunelerde daha yüksek darbe dayanımı görülürken, ayçiçeği kabuğu içeren kompozitlerde daha yüksek sertlik değerleri kaydedilmiştir. Fındık kabuğuna kıyasla ayçiçeği içeren kompozitlerde elastiklik modülü de daha yüksek oranda artış göstermiştir (Salasinka ve Ryszkowska, 2015).

Das ve arkadaşları, muz lifi takviyeli düşük yoğunluklu PE kompozitlerin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemişlerdir. Deneysel analiz için farklı elyaf yüklemesine sahip numuneler (%50, 60, 70, 80 ve 90) üretilmiştir. Mekanik ve kimyasal olarak ekstrakte edilen muz lifi takviyeli polimer kompozitin eğilme ve çekme mukavemetinin, polimer içeriğinin belirli bir yüzdeye kadar artmasıyla arttığı, daha sonra kademeli olarak azaldığı bildirilmiştir. Kimyasal olarak ekstrakte edilmiş liflerden hazırlanan kompozitler, mekanik olarak ekstrakte edilmiş liflere sahip kompozitlere göre daha üstün özellikler sergilemiştir (Das vd., 2015).

Taşdemir ve Şen'e ait organik atık olarak üzüm sapının kullanıldığı bir çalışmada PP matrisli kompozitlerin özellikleri incelenmiştir. Enjeksiyon kalıplama ile ürettikleri kompozitlere yapılan testler sonucunda %20 oranında üzüm sapı ilavesini kompozitlerin nem emme oranını artırdığı görülmüştür. Aynı zamanda yapılan termal testler sonucunda HDT değeri yaklaşık olarak %34 oranında artış göstermiştir. Vicat yumuşama sıcaklığı değeri ise kayda değer bir artış göstermemiştir (Taşdemir ve Şen, 2022).

Girdis ve arkadaşlarına ait bir çalışmada; üç boyutlu (3D) yazıcıda kullanılabilecek yenilikçi bir mikro odun ürünü tasarlamak amacıyla fındık kabukları (%0, 19, 29) ve akrilonitril bütadien stiren (ABS) plastikleri çeşitli oranlarda karıştırılmış ve bağlayıcı bir ajan eklenerek filamentler üretilmiştir. Çekme testinin uygulandığı numunelerde %19 fındık kabuğu içeren ABS filamentleri, ticari Woodfill filamentlere göre %25 daha yüksek özgül çekme mukavemeti ve %60 daha fazla süneklik göstermiştir. Fındık kabuğu içeren filamentler, ticari ahşap dolgu malzemesinden %30'dan daha hafiftir. Ayrıca dolgu içeriğindeki yoğunlukta bir azalmaya yol açtığı aynı zamanda tüm örnekler için mukavemette bir azalmaya neden olduğu bulunmuştur (Girdis vd., 2017).

Hem hammadde olarak kullanılması hem de atık azaltma açısından birçok atık türünden organik kökenli, çevreye ve sağlığa zararı bulunmayan tarım atıklarının otomotiv, inşaat, gıda sektöründe kullanılabilirliği önem kazanmıştır (Demir ve Elmalı, 2020). Bu çalışmada organik kökenli atıkların polimer kompozitlerde kullanılabilirliği ve fiziksel özellikler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Farklı oranlarda kullanılan MK/PK karışımı tozları, R-PP matris içerisine ilave edilerek ekstrüzyon makinesinde polimer kompozitler üretilmiştir. Enjeksiyon makinesinde kalıplanan numunelerin HDT, vicat yumuşama sıcaklığı, erime akış indeksi (MFI), nem oranı, yoğunluk ve aşınma oranı gibi fiziksel özellikleri incelenmiştir. Organik kökenli atıkların üretim prosesinde önemli bir kullanım potansiyeli olduğu ve çeşitli çevre dostu yapı malzemelerinin üretilebileceği ortaya konmuştur.

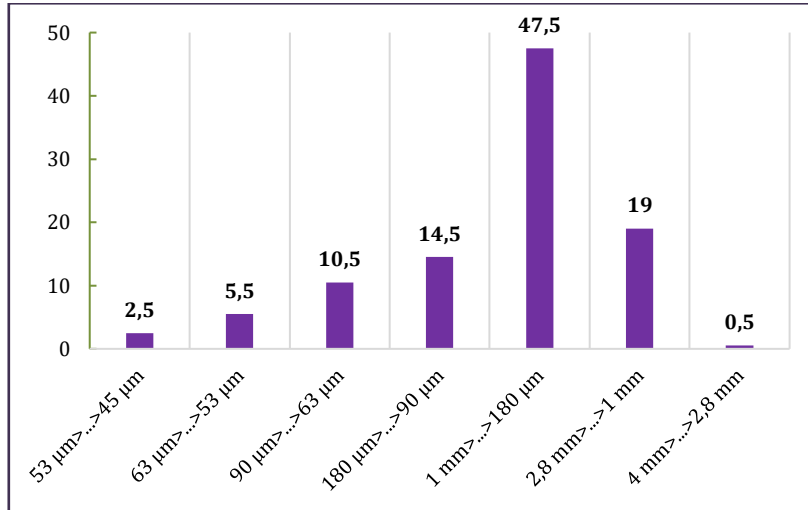
2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Yapılan çalışma kapsamında üretilen R-PP/MK/PK polimer kompozitlerinin bileşenlerine ait karışım oranları Tablo 1’de verilmiştir. Kompozit üretiminde matris malzeme olarak kullanılan R-PP Lyondell Basell firmasından tedarik edilmiş olup, polimerin yoğunluğu 0,90 g/cm³ ve HDT değeri 95 °C (0,45 MPa)’dir. Katkı malzemesi olarak kullanılan MK Granny’s Waffle’dan (Kadıköy-İstanbul) ve PK ise Trakya bölgesinden temin edilmiştir.

Tablo 1. R-PP/MK/PK polimer kompozitlerine ait karışım oranları (Mixing ratios of R-PP/MK/PK polymer composites)

GRUPLAR	R-PP (% Ağırlıkça)	MK/PK KARIŞIMI (% Ağırlıkça 50:50)
1	100	-
2	90	10
3	80	20
4	70	30

İlk olarak yüzeyinde bulunan kirlerin arındırılması amacıyla muz kabukları toz formuna getirilmeden önce temiz su ile yıkanmıştır. Ardından PK ile eşit miktarlarda karıştırılan MK bilyeli öğütücüde toz haline getirilmiştir. Karışımın partikül boyutlarına ait elek analizi sonuçları Şekil 1’de verilmiştir.



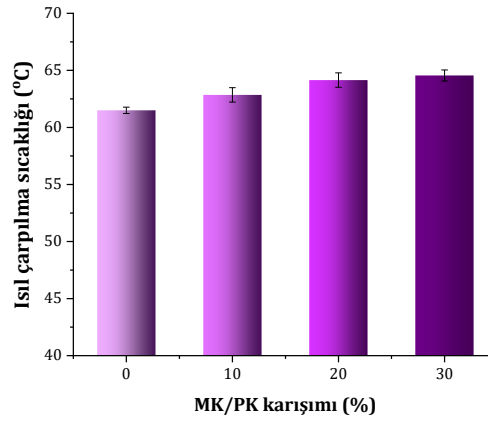
Şekil 1. MK/PK karışımı tozlarının elek analizi sonuçları (Sieve analysis results of MK/PK mixture powders)

Tablo 1’de belirtilen oranlarda hazırlanan karışımlar çift vidalı bir ekstrüzyon makinesinde (Yonca Makine, İstanbul) eriyik olarak karıştırılmıştır. Uygun eriyik akışın sağlanabilmesi için vida dönüş hızı 60 rpm ve çalışma sıcaklığı 180-210 °C olarak belirlenmiştir. Soğutma esnasında sudan geçirilen lifler kırıcı yardımı ile granül formuna getirilmiştir. Ardından granüller, yapısındaki nemi uzaklaştırmak amacıyla 105 °C sıcaklıkta 24 saat boyunca etüvde kurutulmuştur. Test numunelerinin üretimi enjeksiyon makinesinde (Mikrosan Makine A.Ş., Türkiye) gerçekleştirilmiştir. Enjeksiyon çalışma şartları; 180-210 °C sıcaklık, 100-110 bar basınç olarak belirlenmiştir. R-PP/MK/PK polimer kompozitlerinin fiziksel özelliklerini incelemek için HDT, vicat yumuşama sıcaklığı, nem oranı tayini, yoğunluk, MFI, aşınma testleri yapılmıştır. Polimerlerin termal davranışını belirlemek için HDT ve vicat yumuşama sıcaklığı testleri sırasıyla ISO 75 ve ISO 307 standartlarına uygun olarak içerisinde silikon yağı bulunduran Devotrans marka test kabininde gerçekleştirilmiştir. Yoğunluk testi ISO 2781 test standardına göre yapılmıştır. ASTM D 6980 standardına göre Kern marka test cihazıyla yapılan nem oranı tayini ile numunelerin yapısında bulundurduğu nem miktarı belirlenmiştir. Aşınma testi; tambur dönme hızı 40 rpm olan Devotrans marka bir cihazda 40 m mesafede gerçekleştirilmiştir. Test esnasında numuneler 10 N yük uygulanmıştır. Takviye elemanının matris içerisindeki dağılımını incelemek için yapılan mikroyapı incelemesi

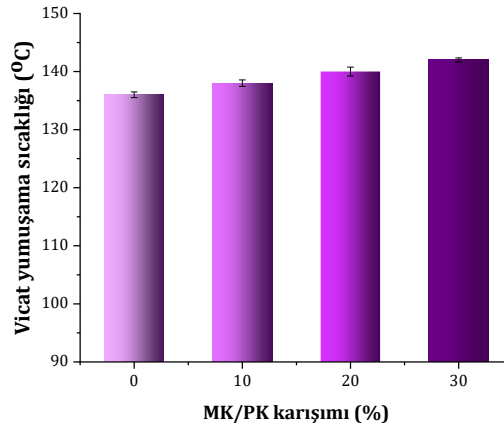
Polaron marka bir SEM cihazında gerçekleştirilmiştir. Görüntü alınmadan önce şarj yüklenmesini önlemek için numunelerin darbe testi sonrası kırık yüzeyleri altın/paladyum karışımı ile kaplanmıştır.

4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

R-PP/MK/PK polimer kompozitlerinin termal davranışını incelemek için yapılan HDT ve vicat yumuşama sıcaklığı testlerine ait sonuçlar sırasıyla Şekil 2 ve Şekil 3'te verilmiştir. Benzer şekilde sonuçlanan testlerde MK/PK karışımı ilavesiyle polimer kompozitlerin termal özellikleri iyileşme göstermiştir. Ağırlıkça %100 R-PP, %10 %20 ve %30 MK/PK takviyeli kompozitlere ait HDT değerleri sırasıyla 61,5, 62,85, 64,15, 64,55 °C olarak ölçülmüştür. Vicat yumuşama sıcaklığı değerleri ise sırasıyla 136, 138, 140,142 °C olarak ölçülmüştür. Ağırlıkça %100 R-PP numuneleri ile kıyaslandığında %30 konsantrasyonunda takviye ilavesiyle HDT ve vicat yumuşama sıcaklığı sırasıyla %5 ve %4 oranında artış göstermiştir. Ramaraj'a ait bir çalışmada şeker kamışı ilaveli PP kompozitlerin mekanik ve termal özellikleri incelenmiştir. Yapılan testler sonucunda ağırlıkça %0 ile %20 arasında şeker kamışı ilavesinin kompozitlerin HDT değerini 45,5 °C'den 65,5 °C'ye yükselttiği görülmüştür. Çalışmada; HDT'deki bu artışın polimer kompozitlerin modülündeki artıştan kaynaklandığı rapor edilmiştir (Ramaraj, 2007). Ayrıca Sahoo ve arkadaşları lignin bazlı biyobozunur polimerlerin özelliklerini inceledikleri çalışmada lignin içeriğinin artmasıyla HDT değerinin de arttığını gözlemlemişlerdir. Bu artış, saf polimerlere kıyasla biyo-kompozitlerin daha yüksek kristalline atfetmişlerdir (Sahoo vd., 2011).



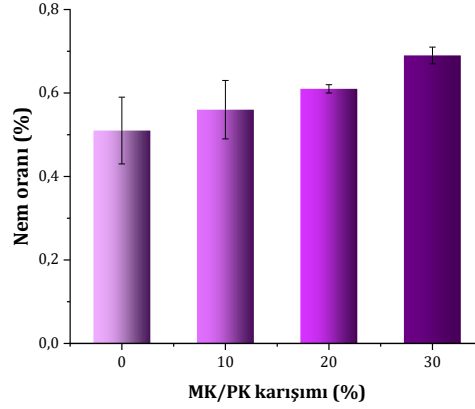
Şekil 2. R-PP/MK/PK polimer kompozitlerinin HDT değerleri (HDT values of R-PP/MK/PK polymer composites)



Şekil 3. R-PP/MK/PK polimer kompozitlerinin vicat yumuşama sıcaklığı değerleri (Vicat softening temperature values of R-PP/MK/PK polymer composites)

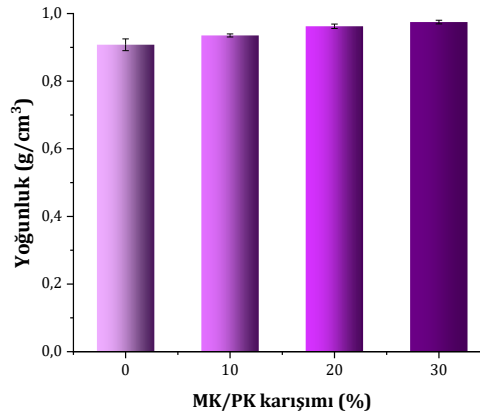
Şekil 4'te verilen nem oranı tayini sonuçları incelendiğinde MK/PK karışımı ilavesiyle polimer kompozitlerin nem çekmesinde düzenli bir artış görülmüştür. Ağırlıkça %100 R-PP numuneleri ile kıyaslandığında maksimum oranda takviye ilavesiyle nem oranı %36 artış göstermiştir. Bu durum organik katkıların hidrofilik bölgeler içermesiyle açıklanabilir. Lignoselülozik dolguların hidrofilik yapısı, numunelerin su emilimini ve nem çekme kapasitesini artırma eğilimindedir. Bu yapılarıdaki selüloz ve hemiselülozlar, bünyesinde çok sayıda polar hidroksil grubu barındırır ve bu serbest hidroksil grupları, su molekülleriyle hidrojen bağı oluşturma özelliğine sahiptir. Dolayısıyla organik katkıların polimerlere ilavesinde nem emiliminin artması beklenmektedir. Kompozitlere dolgu

eklenmesiyle kompozitin mikro yapısında oluşan parçacıklar ve gözenekli agregatların varlığı sebebiyle su/nem emilimi önemli ölçüde artış gösterir (Ayrılmış vd., 2013; Nik Yusuf vd., 2018). Arsene ve arkadaşları su emilimini azaltmak için yapmış oldukları çalışmada muz liflerinin yüzeyini silan ile kaplamıştır. Liflerin morfolojisi değiştikçe gözeneklilik ve boyut artış göstermiştir. Bunun sonucunda silan ilavesiyle su emilimi azalmıştır (Arsene vd., 2013).



Şekil 4. R-PP/MK/PK polimer kompozitlerinin nem oranı değerleri (Moisture content values of R-PP/MK/PK polymer composites)

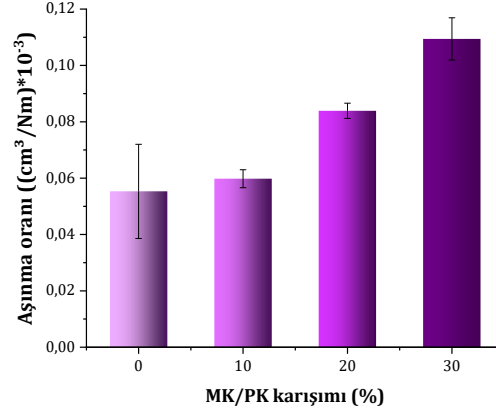
Kompozitlerin yoğunluk değerlerinin yer aldığı Şekil 5 incelendiğinde MK/PK oranının artması ile bu değer arttığı görülmektedir. Ağırlıkça %100 R-PP, %10 %20 ve %30 MK/PK takviyeli kompozitlere ait yoğunluk değerleri sırasıyla 0,9077, 0,9353, 0,9625, 0,9746 g/cm³ olarak ölçülmüştür. Ağırlıkça %100 R-PP numuneleri ile kıyaslandığında %30 konsantrasyonunda takviye ilavesiyle yoğunluk %7,4 oranında artış göstermiştir. Literatürde verilen değerler incelendiğinde genel olarak doğal katkı malzemelerinin (kenevir elyaf, muz elyaf, jüt elyaf, kenaf elyaf vb.) PP'ye kıyasla daha yüksek yoğunluğa sahip olduğu görülmüştür (Kandemir vd., 2023). R-PP/MK/PK polimer kompozitlerinde yoğunluktaki artış doğal katkı malzemelerinin polimerlere kıyasla daha yüksek yoğunluğa sahip olması ile açıklanabilir (Muz: 1,35 g/cm³).



Şekil 5. R-PP/MK/PK polimer kompozitlerinin yoğunluk değerleri (Density values of R-PP/MK/PK polymer composites)

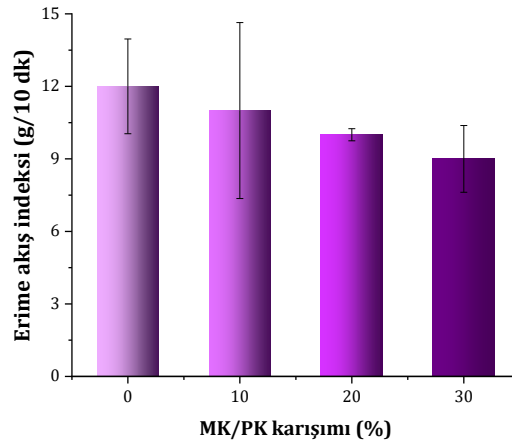
Endüstriyel ve imalat parçalarının çoğu, uygulama esnasında aşındırıcı gibi birçok tribolojik yüke maruz kalır. Bu nedenle malzemelerin tribolojik performansı, mekanik parçaların tasarımında dikkat edilmesi gereken önemli bir husustur. Polimerler doğal katkı ile güçlendirilerek aşınma performansı artırılabilir fakat bu kompozitlerin tamamı için geçerli değildir (Shalwan ve Yousif, 2013). Yapılan çalışma kapsamında R-PP/MK/PK polimer kompozitlerine ait aşınma oranı Şekil 6'da verilmiştir. Ağırlıkça %100 R-PP, %10 %20 ve %30 MK/PK takviyeli kompozitlere ait aşınma oranı değerleri sırasıyla 0,0553, 0,0598, 0,0839, 0,1094 cm³/Nm*10⁻³ olarak ölçülmüştür. R-PP içerisine MK/PK karışımı ilavesiyle polimer kompozitlerin aşınma oranının arttığı görülmektedir. Takviye içeriği arttıkça aşındırma esnasında yüzeyden kopan parça miktarı artış göstermiştir. Matris ve takviye arasındaki ara yüzey etkileşimi aşınma oranını etkileyen temel faktörlerden birisidir. Ara yüzey yapışmasının az olması; kayma esnasında partikülün çekilmesi ve yüzeyden koparak ayrılması ile sonuçlanır. Şahin ve arkadaşları polimer kompozitlerde aşınma direncini inceledikleri çalışmalarında; takviye parçacıklarının, matrisle iyi yapışması durumunda aşındırıcı yüzeye karşı daha yüksek aşınma direncine sahip olduğundan daha yüksek direnc

göstereceğini belirtmişlerdir (Şahin vd., 2024). Aşınma direnci üzerinde bir diğer önemli faktör kopma uzamasıdır. PP kırılmaya karşı daha fazla direnç sergiler ve dolayısıyla aşındırıcı koşullar altında gerilimi daha iyi karşılayabilir. Chand ve Dwivedi'ye ait bir çalışmada parçalara ayrılmış jüt lifleri kullanılarak sıkıştırma kalıplama ile PP polimer kompozitler üretilmiştir. Uyumlaştırıcı malzeme olarak maleik anhidrit aşıllı PP (MAPP) kullandıkları çalışma da işlem görmüş ve görmemiş kompozitlerin tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan aşınma testleri sonucunda Saf PP'ye kıyasla tüm kompozitlerin aşınma oranının yüksek olduğu ve uyumlaştırıcı madde kullanılması ile aşınma oranında azalma görülmüştür. Aşınma miktarında; polimer kompozitlerin ara yüzey yapışmasının etkili olduğu rapor edilmiştir (Chand ve Dwivedi, 2006).



Şekil 6. R-PP/MK/PK polimer kompozitlerinin aşınma oranı değerleri (Wear rate values of R-PP/MK/PK polymer composites)

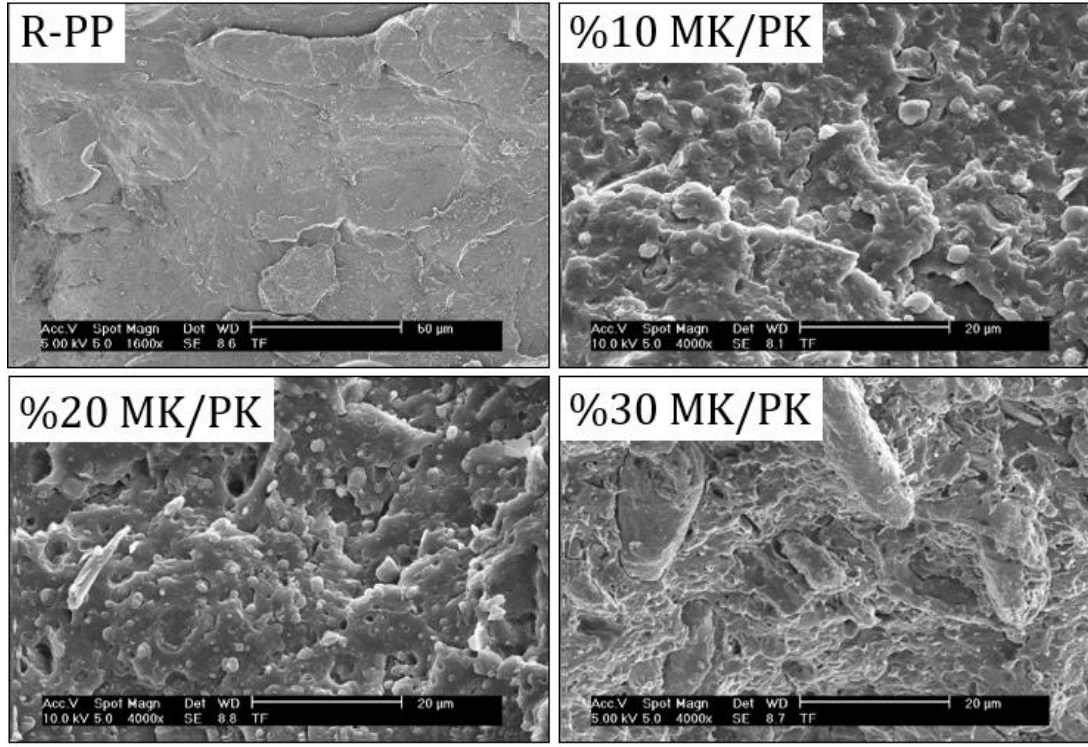
MK/PK konsantrasyonunun polimer kompozitlerin erime akış davranışı üzerindeki etkisi Şekil 7'de verilmiştir. Takviye elemanının eklenmesiyle MFI değerinin azaldığı görülmüştür. Ağırlıkça %100 R-PP, %10 %20 ve %30 MK/PK takviyeli kompozitlere ait MFI değerleri sırasıyla 12, 11, 10, 9 g/10 dk olarak ölçülmüştür. Ağırlıkça %100 R-PP numuneleri ile kıyaslandığında %30 konsantrasyonunda takviye içeren polimer kompozitlerin MFI değeri %24 azalmıştır. Kompozitlerin yapısındaki dağılmış parçacıkların varlığı akışı kısıtlamaktadır. Bu kısıtlama partikül miktarının artmasıyla artmaktadır. Rosa ve arkadaşları çalışmalarında pirinç kabuğu dolgu PP kompozitlerin özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma kapsamında kullanılan dolgu miktarı %10, 20, 30, 40 olacak şekilde dört ayrı karışım hazırlanmıştır. Kompozitlerde polimer matrise kıyasla daha düşük MFI değerleri bulunmuştur. Aynı zamanda çalışma kapsamında uyumlaştırıcının akışa olan etkisi de araştırılmıştır. MAPP ilavesinin bu değerleri daha da düşürme eğilimi gösterdiği gözlenmiştir. Bu davranış, dolgu maddesi ile polimer matrisi arasında yeni etkileşimlerin kurulduğunu ve böylece PP zincirlerinin ve pirinç kabuğu parçacıklarının kaymasının azaldığını göstermektedir (Rosa vd., 2009).



Şekil 7. R-PP/MK/PK polimer kompozitlerinin MFI değerleri (MFI values of R-PP/MK/PK polymer composites)

Şekil 8'de çalışma kapsamında üretilen R-PP ve R-PP/MK/PK polimer kompozitlerine ait SEM görüntüleri verilmiştir. Kompozit numunelerine ait görüntülerde oyuklar görülmektedir. Bu bölgelerde takviye elemanı matris içeresinden kolaylıkla ayrılarak boşluk oluşumuna sebebiyet vermiştir. Ağırlıkça %30 MK/PK karışımı içeren polimer kompozite ait mikroyapı görüntülerinde matris ve partikül arasında meydana gelen çatlaklar ve boşluklar

açıkça görülmektedir. Matris-takviye arasında meydana gelen bu boşluk yapışmanın iyi olmamasından kaynaklanmaktadır. İyapı kusurları gibi hareket eden bu boşluklar herhangi bir yük altında gerilme oluşturur. Takviye elemanı bu durumda görevini yapamaz ve matrise yük dağılımını gerçekleştiremez. Bunun sonucunda malzemede beklenenden daha erken kırılma görülür.



Şekil 8. R-PP/MK/PK polimer kompozitlerinin SEM görüntüleri

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışma, geri dönüşümlü polipropilen (R-PP) matrisine muz kabuğu (MK) ve pirinç kabuğu (PK) karışımının eklenmesinin polimer kompozitlerin termal özelliklerini iyileştirdiğini ve kompozitlerin nem emilimini artırdığını göstermektedir. Ayrıca, organik atık ilavesiyle kompozitlerin yoğunluğunun arttığı ancak erime akış indeksi (MFI) değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Kompozitlerin aşınma direnci üzerine yapılan çalışmalar, takviye miktarının artmasıyla birlikte aşınma oranının da arttığını ortaya koymuştur.

Bu bulgular, R-PP/MK/PK polimer kompozitlerinin termal performansını artırmak için etkili bir strateji sunmakta ve organik atıkların endüstriyel uygulamalarda değerlendirilmesine yeni bir perspektif getirmektedir. MK ve PK karışımının polimer kompozit plakaların fiziksel özelliklerini nasıl etkilediği de çalışmanın önemli bir başka sonucudur. Doğal katkı maddelerinin, sentetik alternatiflere göre maliyet, üretilebilirlik ve atık geri kazanımı açısından avantajlı olduğu belirtilmektedir. Gelecekteki çalışmalar, kompozit malzemelerin ara yüzey özelliklerini iyileştirmek için uygun uyumlaştırıcı malzemelerin geliştirilmesine odaklanmalıdır.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Adeniyi, A. G., Ighalo, J. O., Onifade, D. V., 2019. Banana and Plantain Fiber-Reinforced Polymer Composites. *Journal of Polymer Engineering*, 39 (7), 597-611. doi:10.1515/polyeng-2019-0085
- Arjmandi, R., Hassan, A., Majeed, K., Zakaria, Z., 2015. Rice Husk Filled Polymer Composites *International Journal of Polymer Science*, 2015, 1-32. doi: 10.1155/2015/501471.
- Arsene, MA., Bilba, K., Savastano Junior, H., Ghavami, K., 2013. Treatments of Non-Wood Plant Fibres Used As Reinforcement in Composite Materials. *Materials Research*, 16 (4), 903-923. doi: 10.1590/S1516-14392013005000084.
- Ayrılmış, N., Kaymakçı, A., Özdemir, F., 2013. Physical, Mechanical, and Thermal Properties of Polypropylene Composites Filled With Walnut Shell Flour. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 18 (2), 908-914.

- Barczewski, M., Sałasińska, K., Szulc, J., 2019. Application of Sunflower Husk, Hazelnut Shell And Walnut Shell As Waste Agricultural Fillers For Epoxy-Based Composites: A Study Into Mechanical Behavior Related To Structural And Rheological Properties. *Polymer Testing*, 75, 1-11. doi: 10.1016/j.polymertesting.2019.01.017.
- Boran Torun, S., 2021. Bazı Çevresel Atıkların ve Doğal Liflerin Kompozitlerde Kullanılabilirliği. *Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 22 (1), 126-133. doi: 10.17474/artvinofd.768285.
- Büyükkaya, K., 2017. Isırgan Lifi-Fındık Kabuğu Unu Dolgulu Hibrit Kompozitlerin Mekanik Davranışının İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 5 (4), 133-144. doi: 10.29109/http-gujsc-gazi-edu-tr.337247.
- Chand N., Dwivedi, UK., 2006. Effect of Coupling Agent on Abrasive Wear Behaviour of Chopped Jute Fibre-Reinforced Polypropylene Composites. *Wear*, 261 (10), 1057-1063. doi: 10.1016/j.wear.2006.01.039.
- Chun, KS., MAimunah, T., Yeng, CM., Yeow, TK., Kiat, OT., 2020. Properties of Corn Husk Fibre Reinforced Epoxy Composites Fabricated Using Vacuum-Assisted Resin Infusion. *Journal of Physical Science*, 31 (3), 17-31. doi: 10.21315/jps2020.31.3.2.
- Çavuş V., Mengeloğlu, F., 2017. The Effect of Lignocellulosic Filler Types And Concentrations on The Mechanical Properties of Wood Plastic Composites Produced With Polypropylene Having Various Melt Flowing Index (MFI). *Pamukkale Journal Of Engineering Science*, 23 (8), 994-999. doi: 10.5505/pajes.2017.80000.
- Das, H., Saikia, P., Kalita, D., 2015. Physico-Mechanical Properties of Banana Fiber Reinforced Polymer Composite as an Alternative Building Material. *Key Engineering Materials*, 650, 131-138. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.650.131.
- Demir, İ., Elmalı, M., 2020. Organik Atıkların Yapı Malzemesi Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8 (4), 1303-1311. doi: 10.21923/jesd.781554.
- Gildis, J., Gaudion, L., Proust, G., Löschle, s., Dong, A., 2017. Rethinking Timber: Investigation into the Use of Waste Macadamia Nut Shells for Additive Manufacturing. *Journal of The Minerals, Metals&Materials Society*, 69, 575-579. <https://doi.org/10.1007/s11837-016-2213-6>.
- Gholampour, A., Özbakkaloğlu, T., 2020. A Review of Natural Fiber Composites: Properties, Modification and Processing Techniques, Characterization, Applications. *Journal of Material Science*, 55 (3), 829-892. doi: 10.1007/s10853-019-03990-y.
- Dubey, SC., Mishra, V., Sharma, A., 2021. A Review On Polymer Composite With Waste Material As Reinforcement. *Materials Today: Proceedings*, 47, 2846-2851. doi: 10.1016/j.matpr.2021.03.611.
- Kandemir, Y., Varol, T., Aslan, M., 2023. Silah Gövdeleri İçin Geliştirilen Polimer Kompozit Malzemeler İçin Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ile Doğal Takviye Malzemesinin Seçimi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13 (4), 911-926. doi: 10.17714/gumusfenbil.1215620.
- Kaymakçı, A., Ayrılmış, N., Özdemir, F., Güleç, T., 2013. Utilization of Sunflower Stalk in Manufacture of Thermoplastic Composite. *Journal of Polymer Environment*, 21 (4), 1135-1142. doi: 10.1007/s10924-012-0564-9.
- Laaziz, SA., Raji, M., Hilali, E., Essabir, H., Rodrigue, D., Bouhfid, R., Qaiss, A., 2017. Bio-Composites Based on Polylactic Acid And Argan Nut Shell: Production And Properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 104, 30-42. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2017.05.184.
- Mistik, S. İ., Merdan, N., 2011. Doküma Bazalt-Cam ve Fındık Kabuğu Takviyeli Polimer Kompozitlerinin Eğilme Dayanımı ve Isı Geçirgenliklerinin İncelenmesi. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri*, 10 (20), 119-126.
- Nik Yusuf NAA., Razab, MKAA., Abu Bakar, MB., Yen, KJ., Tung, CW., Ghani, RSM., Nordin, MN., 2018. Determination of Structural, Physical, and Thermal Properties of Biocomposite Thin Film From Waste Banana Peel. *Jurnal Teknologi*, 81 (1), 91-100. doi: 10.11113/jt.v81.12599.
- Paukszta, D., Szostak, M., Rogacz, M., 2014. Mechanical Properties of Polypropylene Copolymers Composites Filled With Rapeseed Straw. *Polimery*, 59 (2), 165-169. doi: 10.14314/polimery.2014.165.
- Pradhan, P., Nanda, BP., Satapathy, A., 2020. Polyester Composites Filled With Walnut Shell Powder: Preparation and Thermal Characterization. *Polymer Composites*, 41 (8), 3294-3308. doi: 10.1002/pc.25620.
- Ramaraj, B., 2007. Mechanical and Thermal Properties of Polypropylene/Sugarcane Bagasse Composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 103 (6), 3827-3832. doi: 10.1002/app.25333.
- Rao, L., Makode, Y., Tiwari, A., Dubey, O., Sharma, S., Mishra, V., 2021. Review On Properties Of Banana Fiber Reinforced Polymer Composites. *Materials Today: Proceedings*, 47, 2825-2829, doi: 10.1016/j.matpr.2021.03.558.
- Rosa, SML., Nachtigall, SMB., Ferreira, CA., 2009. Thermal and Dynamic-Mechanical Characterization Of Rice-Husk Filled Polypropylene Composites. *Macromolecular Research*, 17 (1), 8-13. doi: 10.1007/BF03218594.
- Sahoo, S., Misra, M., Mohanty, A., (2011). Enhanced Properties of Lignin-Based Biodegradable Polymer Composites Using Injection Moulding Process. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42 (11), 1710-1718.
- Sakthivel, M., Ramesh, S., 2013. Mechanical Properties of Natural Fibre (Banana, Coir, Sisal) Polymer Composites. *Science Park*, 1 (1).
- Salasinska, K., Ryszkowska, J., 2015. The Effect of Filler Chemical Constitution And Morphological Properties on The Mechanical Properties Of Natural Fiber Composites. *Composite Interfaces*, 22 (1), 39-50. doi: 10.1080/15685543.2015.984521.
- Shalwan, A., Yousif, BF., 2013. In State of Art: Mechanical and Tribological Behaviour of Polymeric Composites Based on Natural Fibres. *Materials & Design*, 48, 14-24. doi: 10.1016/j.matdes.2012.07.014.
- Singh, B., 2018. Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete Characterisation, Properties and Applications *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering*. 417-460. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102156-9.00013-4>
- Suhot, MA., Hassan, MZ., Aziz, SA., Md Daud, MY., 2021. Recent Progress of Rice Husk Reinforced Polymer Composites: A Review. *Polymers*, 13 (15), 2391. doi: 10.3390/polym13152391.
- Şahin, AE., Fidan, S., Çetin, B., Sınmazçelik, T., 2024. Comparison of The Usage of Nut Shell, Walnut Shell, And Pistachio Shell As A Reinforcement Particle on The Mechanical And Wear Performance of Polypropylene. *Journal of Applied Polymer Science*, 141(16). <https://doi.org/10.1002/app.55248>

- Taşdemir, M., Şen, E. G., 2022. Polipropilen/Üzüm Sapı/Çeltik Polimer Kompozitinin Mekanik Özelliklerinin Atık Cam Elyaf ile Geliştirilmesi. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 34 (1), 131-140. doi:10.7240/jeps.1041672
- Väisänen, T., Haapala, A., Lappalainen, R., Tomppo, L., 2016. Utilization of Agricultural And Forest industry Waste And Residues In Natural Fiber-Polymer Composites: A Review. *Waste Management*, 54, 62-73. doi: 10.1016/j.wasman.2016.04.037.
- Vigneshwaran, S., Sundarakannan, R., John, KM., Johnson, R., Prasath, KA., Ajith, S., Arumugaprabu, V., Uthayakumar, M., 2020. Recent Advancement in The Natural Fiber Polymer Composites: A Comprehensive Review. *Journal of Cleaner Production*, 277. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124109.,
- Wijianto, W., Rijal, M.B., Adityarini, H., 2019. Effect of NaOH Concentration Treatment on Tensile Strength, Flexure Strength and Elasticity Modulus of Banana Fiber Reinforced Polyester Resin. *Materials Science Forum*, 961, 10-15.



FOTOVOLTAİK SİSTEM ENTEGRELİ ELEKTRİKLİ ARAÇ ŞARJ SİSTEMLERİNDE OPTİMUM KAPASİTENİN BELİRLENMESİ

Hakan AKÇA^{1*}, Ramazan AYAZ^{2,3}

¹ Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

² Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

³ Yıldız Teknik Üniversitesi, Temiz Enerji Teknolojileri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Fotovoltaik Sistem,
Elektrikli Araç,
Batarya Kapasitesi,
Optimum Kapasite,
Şarj İstasyonu.

Öz

Bu çalışmada, fotovoltaik (FV) sistem entegreli ve şebekeye bağlı bir elektrikli araç şarj istasyonunda optimum FV kapasitesinin belirlenmesi için yeni bir yaklaşım ortaya konulmuştur. Gerçek ortamda FV panelin ürettiği güç değerleri, MATLAB FV modeli ve FV simülatör yardımıyla elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır ve sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Çalışmada 16,8 kWh kapasiteli bir elektrik araç bataryasının şarj edilmesi için gereken FV sistem kapasitesinin optimizasyonu amaçlanmıştır. Bunun için FV sistem optimum eğim ve azimut açıları belirlendikten sonra FV boyutlandırması yapılmıştır. Elektrikli araç bataryasının bir yıllık toplam enerjisinin FV sistemin bir yıllık toplam ürettiği enerji ile karşılanması amaç fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Bu şartlar altında MATLAB modeli yardımıyla elde edilen sonuçlar 3,35 kWp'lik FV kapasitesinin bir aracın yıl boyunca ihtiyaç duyduğu enerjiyi karşılayabileceğini ortaya koymuştur. Bu çalışma, FV sistemlerin elektrikli araç şarj sistemleri için optimum kapasitenin belirlenmesinde etkili bir yöntem sunmaktadır.

DETERMINATION OF OPTIMUM SYSTEM CAPACITY IN PHOTOVOLTAIC SYSTEM INTEGRATED ELECTRIC VEHICLE CHARGING SYSTEMS

Keywords

Photovoltaic System,
Electrical Vehicle,
Battery Capacity,
Optimum Capacity,
Charging Station.

Abstract

In this study, a new approach is proposed for determining the optimum photovoltaic (PV) capacity in a grid-connected electric vehicle charging station with integrated PV system. The power generated by the PV panel in real environment is compared with the results obtained with the help of MATLAB PV model and PV simulator and the results are found to be compatible with each other. It is aimed to optimize the PV system capacity required for charging an electric vehicle battery with a capacity of 16,8 kWh in this study. For this purpose, PV system optimum tilt and azimuth angles are determined, and PV sizing is performed. The objective function is determined as providing the total energy of the electric vehicle battery for one year with the total energy produced by the PV system for one year. Under these conditions, the results obtained with the help of the MATLAB model show that a PV capacity of 3,35 kWp can supply the energy needs of a vehicle throughout the year. This study presents an effective method for determining the optimum capacity of PV systems for electric vehicle charging systems.

Alıntı / Cite

Akça, H., Ayaz, R., (2024). Fotovoltaik Sistem Entegreli Elektrikli Araç Şarj Sistemlerinde Optimum Kapasitenin Belirlenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 12(3), 476-487.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

H. Akça, 0000-0001-9138-0755
R. Ayaz, 0000-0002-6201-1181

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	06.03.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date	02.07.2024
Kabul Tarihi / Accepted Date	16.07.2024
Yayın Tarihi / Published Date	26.09.2024

* İlgili yazar / Corresponding author: hakan.akca@ege.edu.tr, +90-232-311-1817

DETERMINATION OF OPTIMUM CAPACITY IN PHOTOVOLTAIC SYSTEM INTEGRATED ELECTRIC VEHICLE CHARGING SYSTEMS

Hakan Akça^{1†}, Ramazan Ayaz^{2,3}

¹ Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

² Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

³ Yıldız Teknik Üniversitesi, Temiz Enerji Teknolojileri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye

Highlights

- In this study, the optimum PV system capacity is determined for meeting the energy of an electric vehicle battery for one year.
- It is shown that a PV system with 3,35 kWp installed power can provide the energy of a 16,8 kWh electric vehicle battery for one year.
- MATLAB PV model verified with experimental data is used for PV system capacity determination.
- It is determined that the tilt and azimuth angles at which the annual total energy produced is maximum are $\beta=28^\circ$ and $\gamma=21^\circ$, respectively.

Graphical Abstract (If applicable)

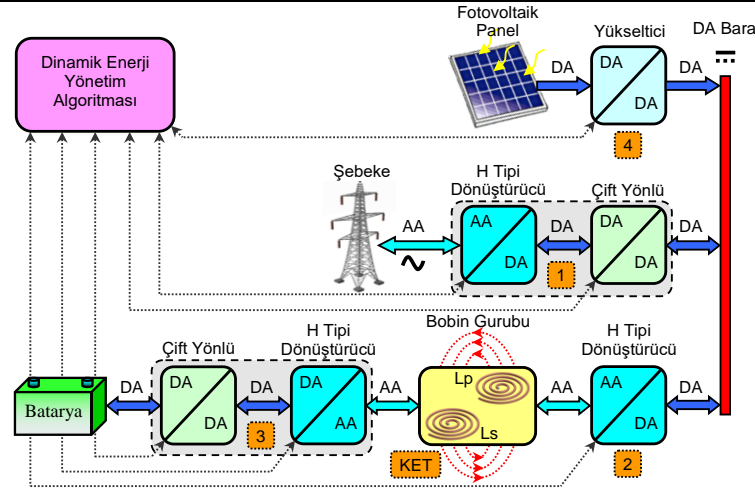


Figure. FV integrated and grid-connected electric vehicle charging station block diagram

Purpose and Scope

In this study, the PV capacity is sized in an electric vehicle charging station connected to the grid and integrated with a PV system. The objective function was determined as the annual total energy required to charge the electric vehicle battery to be met by the PV system.

Design/methodology/approach

Real ambient data such as irradiance, temperature, and wind etc. of Izmir province were used. These data are used together with the PV model created in MATLAB environment to calculate the capacity at optimum tilt and azimuth angles.

Findings

It has been revealed that an optimum PV system installed power of 3,35 kWp can meet the one-year energy of an electric vehicle with a battery capacity of 16,8 kWh.

Originality

This study presents a method for determining the optimum PV system capacity for electric vehicle charging systems.

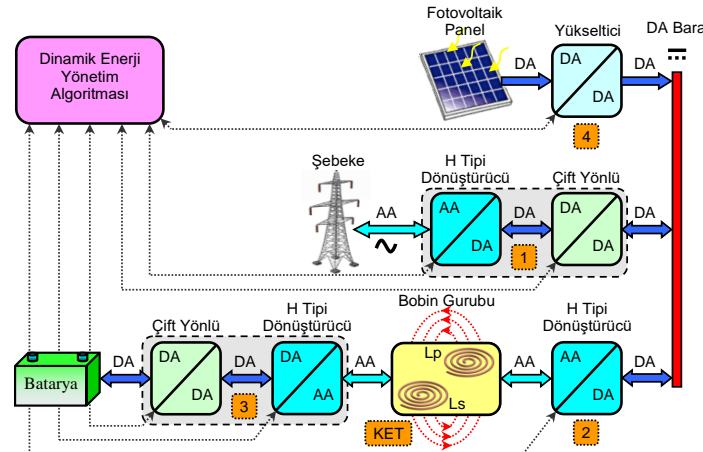
[†] İlgili yazar / Corresponding author: hakan.akca@ege.edu.tr, +90-232-311-1817

1. Giriş (Introduction)

Elektrikli araçların hızla yaygınlaşmasıyla beraber şarj (Yousuf vd., 2023) için gerekli enerjinin (Gülkaya vd., 2021) miktarı da artmıştır. Dolayısıyla bu enerjinin nereden ve nasıl karşılanacağı problemi ortaya çıkmıştır. Elektrikli araç şarj istasyonlarının güçleri incelendiğinde özellikle hızlı şarj özelliğine sahip doğru akım (DA) şarj istasyonu güçleri birkaç 100 kW (Rangaraju vd., 2020) mertebesine çıkabilmektedir. Mevcut yükler ile geleneksel şebeke altyapısının sınırları zorlanırken elektrikli araç şarj istasyonu gibi yüksek güçte ve sayıda yükün aynı anda enerji talebi (Mukherjee vd., 2015) şebeke altyapısının çökmesine kadar gidebilecek sonuçlara sebep olabilir. Dolayısıyla enerji talebinin artması bu araçların şarj altyapısının etkili bir şekilde yönetilmesi konularında yeni zorlukları beraberinde getirmiştir. Bu ciddi problem için farklı çözüm önerileri sunulabilir. Bunlardan ilki enerjiye talebin az olduğu puant saat dışındaki saatlerde bu yükleri beslemek için enerji tüketiminin yönetilmesi (Das vd., 2021) için yeni stratejiler geliştirilebilir. Diğer bir çözüm ise yenilenebilir enerji kaynaklarının (Zhang vd., 2022) şarj istasyonlarının yakınına veya bu istasyonlar ile entegreli (Arulvendhan vd. 2024, Muttaqi vd. 2022) olarak yapılması önerilebilir. Mevcut literatürde fotovoltaik sistemlerin elektrikli araç şarj istasyonlarına entegrasyonu ile ilgili sınırlı çalışma bulunmaktadır. Bu kapsamda, FV entegreli ve şebeke bağlı şarj istasyonları, enerji tüketimini sürdürülebilir ve çevre dostu bir şekilde karşılayabilme potansiyeli sunmaktadır.

Mevcut elektrikli araçların artan sayısı göz önüne alındığında tüm elektrikli araç şarj enerjisinin (Zhang vd., 2014) aynı anda şebeke altyapısı tarafından kaldırılamayacağı sorunu, FV entegreli şarj istasyonlarının önemini daha da artırmaktadır. Bu noktada, FV entegrasyonu (Heba vd. 2022, Li vd. 2024), güneş panelleri aracılığıyla elde edilen enerjiyi kullanarak şebeke bağlı şarj istasyonlarının enerji ihtiyacını destekler. Böylece, geleneksel enerji kaynaklarına olan bağımlılığı azaltarak, elektrikli araçların şarj süreçlerini daha sürdürülebilir ve ekolojik açıdan uyumlu hale getirir. FV entegrasyonu, güneş enerjisiyle elektrikli araçları şarj etme (Xiao vd. 2023) kapasitesine sahip istasyonlar, sadece çevre dostu bir enerji kaynağı sunmakla kalmayıp aynı zamanda mevcut şebeke (Yildizhan vd., 2022) kaynaklarının üzerindeki yükü hafifletir (Chen vd., 2021). Bu, enerji talebinin yoğun olduğu saatlerde ve bölgelerde, şebeke altyapısının (Güner vd., 2022) daha az zorlanmasına ve enerjinin daha sürdürülebilir bir şekilde kullanılmasına olanak tanır.

Elektrikli araç talebinin sürekli artmasıyla birlikte, FV entegreli şarj istasyonlarının kullanımı, enerji verimliliğini artırabilir ve karbon ayak izini azaltabilir (John vd., 2021). FV entegreli (Mishra vd. 2022, Sekhar vd. 2023) şarj istasyonları, güneş ışığına bağlı olarak enerji üretebilir ve bu durum, özellikle güneşli günlerde ekstra avantaj sağlar. Bu sistemler, geleneksel enerji kaynaklarına olan bağımlılığı azaltarak (Praapati vd., 2019), elektrikli araçların şarj süreçlerini daha sürdürülebilir ve ekolojik açıdan uyumlu hale getirir.



Şekil 1. FV entegreli ve şebeke bağlantılı elektrikli araç şarj istasyonu blok diyagramı (PV integrated and grid-connected electric vehicle charging station block diagram)

FV entegreli ve şebeke bağlı şarj istasyonları, elektrikli araç endüstrisinde yenilenebilir enerji kullanımına yönelik çevre dostu olan bir çözüm sunar. Bu çalışmada, yenilenebilir enerji kullanımının ve çevre dostu teknolojilerin yaygınlaştırılmasında FV entegreli şarj istasyonlarının potansiyeli vurgulanmaktadır. Elektrikli araçlar ve şebeke altyapısı arasındaki arz talep dengesinin korunmasına yardımcı olan FV entegrasyonu enerjinin sürdürülebilir olarak sağlanması için önemli bir strateji sunmaktadır. Bu çalışma Şekil 1'de verilen bir sistemin FV sistem ve batarya kısmında boyutlandırma çalışmasını kapsamaktadır. Şekilden görüldüğü üzere FV panelden elde edilen enerji çift yönlü güç dönüştürücüleri ile 4 ve 1 nolu bloklar üzerinden hem şebekeye hem de 4, 2 ve 3 nolu bloklar üzerinden bataryaya aktarılabilir. Dolayısıyla FV panelden elde edilen enerji (Yüzer vd., 2023) ihtiyaç durumuna göre şebeke veya bataryaya aktarılabilir. Batarya, FV panelden enerjisini karşılayabildiği gibi FV sistemden gelen enerji yetersiz olduğunda 1, 2 ve 3 nolu bloklar üzerinden enerjisini şebekeden alabilmektedir. FV sistem

boyutlandırması yapılırken FV sistem ve bataryanın yıllık toplam enerjileri eşitlenmeye çalışılmıştır. Bir sonraki bölümden yapılan analizlerde görüleceği üzere bu şarta göre belirlenen FV kapasitesi yılın bazı zamanlarında bataryanın enerji ihtiyacını karşılayamazken bazı zamanlarda fazla enerji ortaya çıkacaktır. Dolayısıyla fazla enerjinin olduğu zamanlarda FV sistemin ürettiği ve batarya için fazla olan enerji şebekeye aktarılırken batarya için yeterli enerjinin üretilmediği zamanlarda şebekeden bataryaya enerji aktarımı sağlanacaktır. Bu yıllık bazda mahsuplaşma yapıldığında şebekeye verilen ve alınan enerjinin eşitlenmesini sağlayarak net sıfır enerjinin dengesini sağlayacaktır.

Bu çalışmada aşağıdaki başlıklar ve konular ele alınmıştır. İlk olarak materyal ve yöntem bölümü sunulmuştur. Bu kapsamda ilk olarak FV sistem modeli için temel matematiksel altyapı verilmiştir. Analizler sırasında 2013 yılı için İzmir iline ait gerçek ortam verileri (ışınım, sıcaklık, rüzgar hızı) kullanılmıştır. Eğimli yüzeye gelen global ışınım verisinden analitik model kullanılarak eğimli yüzeye gelen ışınım verisi elde edilmiştir. Bu veriler MATLAB ortamında oluşturulan FV model için giriş verisi olarak kullanılmıştır. Model çıktıları ile gerçek ortam verileri karşılaştırılarak modelin doğrulanması gerçekleştirilmiştir. Ayrıca FV simülatör ile model sonuçlarının uyumluluğu olduğu da ortaya konulmuştur. Farklı eğim ve azimut açıları için bu FV model ve gerçek ortam verileri kullanılarak azimut açısı için -90° 'den $+90^{\circ}$ 'ye ve eğim açısı için 0° 'den 90° 'ye kadar analiz yapılmıştır. FV modelin önemi burada ortaya çıkmaktadır. Gerçek bir sistemde bu kadar açı için ölçümün alınması hem zaman hem de aynı koşullarda yapılabilmesi açısından imkansızdır. FV model bu durumda kısa sürede bu sonuçları bize sağlamıştır. Bu açı değerleri için FV sistemin kapasitesini belirlemek adına farklı panel sayıları için analizler yapılmıştır. Nissan leaf marka bir aracın 16,8 kWh'lık batarya kapasitesi göz önüne alınarak bir yıllık enerji ihtiyacının karşılanması için FV kapasite hesabı yapılmıştır. Son olarak sonuçlar bölümünde ise genel değerlendirme ve sonuçlar sunulmuştur.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Yapılan çalışmada, FV güç çıktısı doğruluğu kanıtlanmış bir FV model üzerinden elde edilmiştir (Ayaz vd., 2014). FV modeli için çevresel faktörler arasında bulunan ışınım, sıcaklık ve rüzgâr hızı giriş parametresi olarak kullanılmıştır. FV modelin çıktısı olarak FV panelin akım ve gerilim değerleri elde edilmiştir. İzmir iline ait yatay yüzeye gelen global ışınım eğimli yüzeye dönüştürülerek FV modelde kullanılmıştır.

2.1. Eğimli Yüzeye Gelen Global Işınım (Global Radiation on Tilt Surface)

Yatay yüzeye gelen toplam global ışınım (I) direk ışınım (I_b) yayınık ışınımın (I_d) toplamıdır (Benghanem vd., 2011). Bu da Eşitlik (1)'de verilmiştir.

$$I(t) = I_b(t) + I_d(t) \quad (1)$$

Yayınık ışınım miktarı, gökyüzü açıklık indeksi olan k_T değerine bağlı olarak değişim göstermektedir. Global ışınım ve atmosfer dışı ışınım (I_0) arasındaki oran ise açıklık indeksi olarak ifade edilmektedir. Yayınık ışınım ve açıklık indeksi sırasıyla (2) ve (3) nolu eşitlikler kullanılarak verilmiştir (Duffie vd., 2013).

$$\frac{I_d(t)}{I(t)} = \begin{cases} 1 - 0.09k_T(t), & k_T(t) \leq 0.22 \\ 0.9511 - 0.1604k_T(t) + 4.388k_T^2(t) - 16.638k_T^3(t) + 12.336k_T^4(t), & 0.22 \leq k_T(t) \leq 0.80 \\ 0.165, & k_T(t) > 0.80 \end{cases} \quad (2)$$

$$k_T(t) = \frac{I(t)}{I_0(t)} \quad (3)$$

Eğimli yüzeye gelen ışınım farklı bileşenlerin toplamından oluşmaktadır. Bu bileşenler, yüzeye gelen direk ışınım, yüzey yayınık ışınımı ve yatay düzlemde yansıtılarak gelen ışınımlardır. Eğimli yüzeye gelen toplam ışınım Eşitlik (4)'te verilmiştir (Liu vd., 1963).

$$G(t, \beta) = I_b(t)R_b(t, \beta) + I_d(t) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I(t)\rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (4)$$

bu eşitlikte; β yüzey eğim açısını, ρ yüzey yansıtma katsayısını (0,2) ve R_b ise eğimli yüzeydeki direk ışınımın global ışınımına oranını ifade etmektedir. R_b değerinin hesaplanması için gereken eşitlikler (5), (6) ve (7) ile verilmiştir (Duffie vd., 2013).

$$R(t, \beta) = \left(\frac{\cos \theta(t, \beta)}{\cos \theta_z(t)} \right) \quad (5)$$

$$\cos \theta(t, \beta) = \sin \delta(t) \sin \varphi \cos \beta - \sin \delta(t) \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta(t) \cos \varphi \cos \beta \cos \omega(t) + \cos \delta(t) \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega(t) + \cos \delta(t) \sin \beta \sin \gamma \sin \omega(t) \quad (6)$$

$$\cos \theta_z(t) = \cos \varphi \cos \delta(t) \cos \omega(t) + \sin \varphi \sin \delta(t) \quad (7)$$

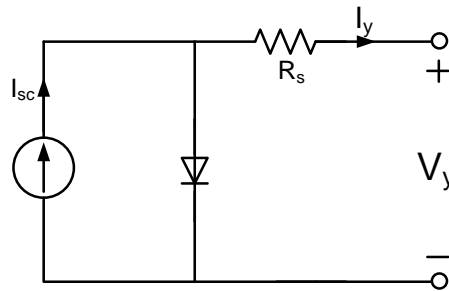
Burada;

γ yüzey azimut açısı	G eğimli yüzeye gelen toplam ışınım
φ enlem	I_b yatay yüzeye gelen direkt ışınım
δ deklinasyon açısı	I_d yatay yüzeye gelen yayınlık ışınım
ω saat açısı	I yatay yüzeye gelen toplam ışınım

Sabit bir açıda konumlandırılmış piranometreden alınan gerçek ışınım verileri ile matematiksel olarak hesaplanan ışınım verileri karşılaştırılmıştır. İki veri için aradaki fark 0 ile 126 W/m² arasında değişmektedir. Ölçülen ve hesaplanan değerler için hata (RMSE: Root Mean Square Error) değeri iki farklı durum için hesaplanmıştır. İlk durum ölçülen ve hesaplanan 113 adet verilerin tamamı kullanıldığında RMSE değeri 39,65 W/m² hesaplanmıştır. İkinci durumda ise ışınımın 0 (sıfır) olduğu anlardaki değerler çıkarılarak hesaplandığında (74 adet ölçülen ve hesaplanan veri için) RMSE değeri 48,99 W/m² olarak hesaplanmıştır. Her iki durumda dikkate alındığında model ve ölçülen değerlerin birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir. FV model ve ölçülen veriler kullanılarak eğimli yüzeydeki toplam ışınım değerleri aralarındaki farklar karşılaştırıldığında, model ve ölçülen ışınım değerleri arasındaki fark %0,6 olarak hesaplanmıştır.

2.2. FV Model (PV Model)

FV model için (Bellini vd., 2009)'de ile verilen çalışma göz önüne alınmıştır. Modelin basit olarak Şekil 2'de verilen basitleştirilmiş eşdeğer devre modeli üzerine kurulmuştur. Bu modelde FV'nin akımı gerilimin bir fonksiyonu olarak elde edilmiştir. Model için ışınım, sıcaklık ve rüzgâr hızı giriş parametrelerini oluştururken, FV akımı, gerilimi ve güç çıkış parametreleri arasında yer almaktadır.



Şekil 2. Basitleştirilmiş eşdeğer devre modeli (Simplified equivalent circuit model)

$$I_y = I_{SC} \cdot \left[1 - K_1 \cdot \left(e^{\left(\frac{V_y}{K_2 \cdot V_{OC}} \right)} - 1 \right) \right] \quad (8)$$

$$K_1 = \left(1 - \frac{I_{MP}}{I_{SC}} \right) \cdot e^{\left(\frac{-V_{MP}}{K_2 \cdot V_{OC}} \right)} \quad (9)$$

$$K_2 = \frac{\left(\frac{V_{MP}}{V_{OC}} - 1 \right)}{\ln \left(1 - \frac{I_{MP}}{I_{SC}} \right)} \quad (10)$$

Burada K_1 ve K_2 katsayıları aşağıdaki panel parametrelerine göre değişmektedir.

I_{SC} kısa devre akımı

I_{MP} maksimum güç noktasındaki akım

V_{OC} açık devre gerilimi

V_{MP} maksimum güç noktasındaki gerilim

Bu parametrelerin ışınım ve/veya sıcaklığa bağlı değişimleri aşağıda verilmiştir.

$$I_{SC}(G, T_C) = I_{SCS} \cdot \frac{G}{G_S} \cdot [1 + \alpha \cdot (T_C - T_S)] \quad (11)$$

$$I_{MP}(G, T_C) = I_{MPS} \cdot \frac{G}{G_S} \cdot [1 + \alpha \cdot (T_C - T_S)] \quad (12)$$

$$V_{OC}(T_C) = V_{OCS} + \beta \cdot (T_C - T_S) \quad (13)$$

$$V_{MP}(T_C) = V_{MPS} + \beta \cdot (T_C - T_S) \quad (14)$$

I_{SCS} , I_{MPS} , V_{OCS} ve V_{MPS} değerleri ürün teknik dökümanında üretici tarafından standart test koşulları altında elde edilen değerlerdir. G ve T_C sırasıyla ışınım ve hücre sıcaklığı olup standart test şartları olan $G_S=1000 \text{ W/m}^2$ ve $T_S=25 \text{ }^\circ\text{C}$ altında elde edilen değerlerdir. α akım sıcaklık katsayısını ifade ederken ve β gerilim sıcaklık katsayısını ifade etmektedir.

Hücre sıcaklığı ve dış ortam sıcaklığı arasında fark bulunmaktadır. Bu nedenle ışınım ve rüzgâr verileri göz önüne alınarak ortam sıcaklığından FV hücre sıcaklığı elde edilmiştir ve (15)'te verilmiştir.

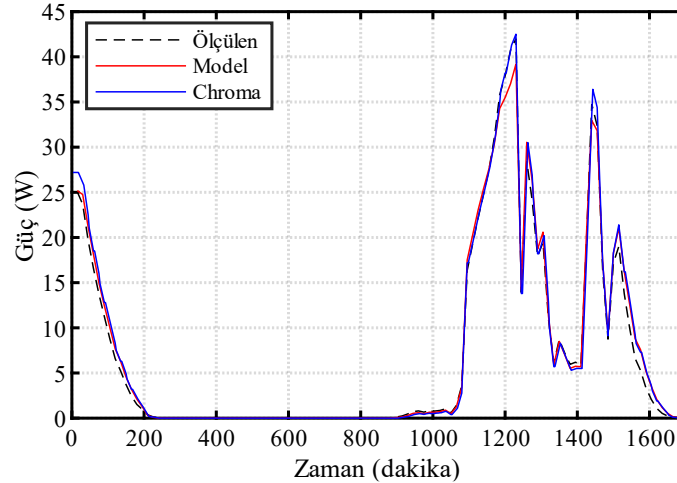
$$T_C = 1,14 \cdot (T - T_S) + 0,0175 \cdot (G - 300) - k_r \cdot w + 30 \quad (15)$$

Bu formülde T dış ortam sıcaklığı ($^\circ\text{C}$), w rüzgâr hızı (m/s), k_r katsayısı her bir FV teknolojisine bağlı bir katsayıdır. Yapılan çalışmada monokristal panel teknolojisi için $k_r=1,509$ olarak alınmıştır (Tamizhmani vd., 2003).

3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

3.1. FV Modelin Doğrulanması (PV Model Validation)

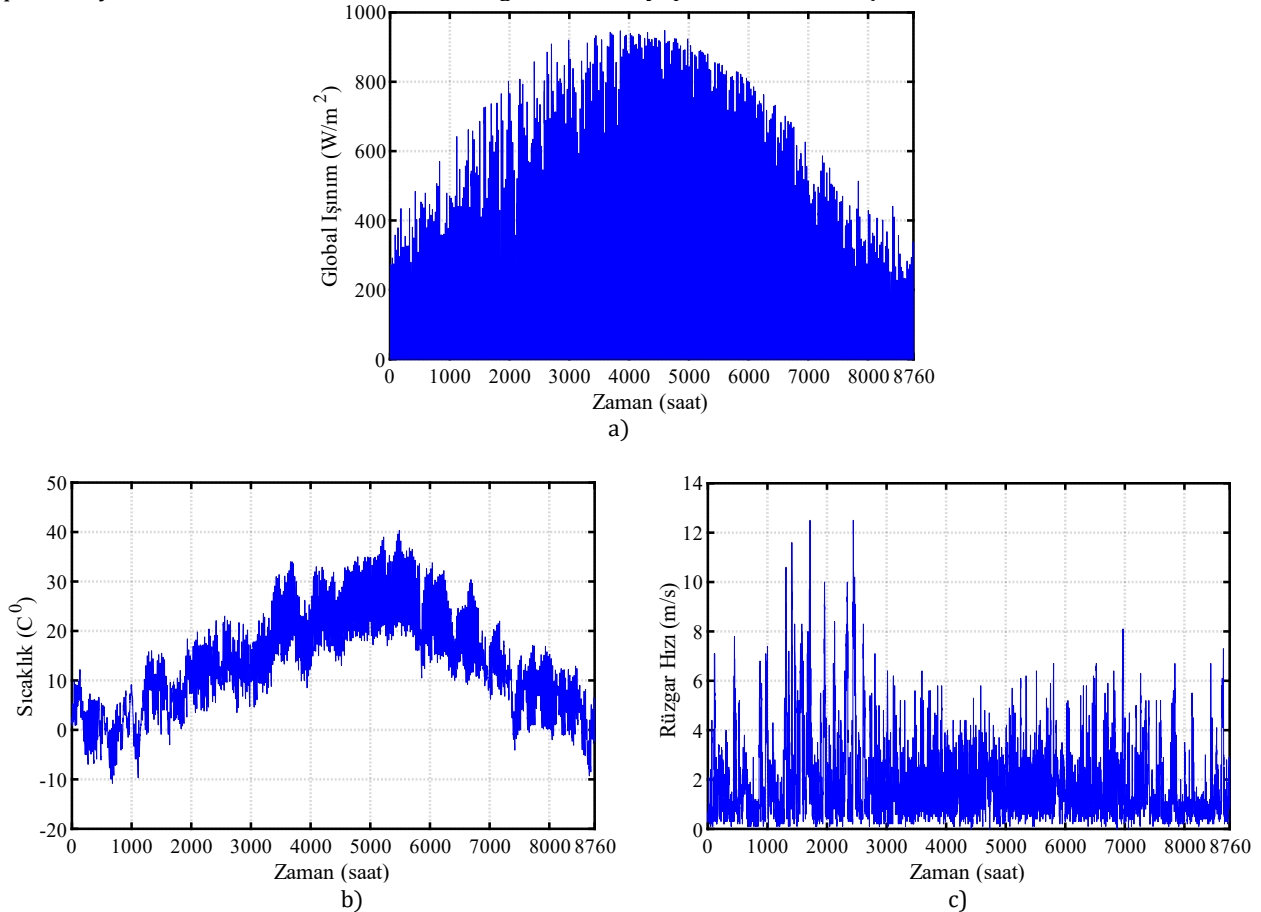
Gerçek ortam şartlarında belirli bir açıda konumlandırılan FV panellerin elde edilecek panel gerilimi ve akımı 15 dakika aralıklarla toplamda 1695 dakika boyunca ölçülmüş ve 113 adet veri kaydedilmiştir. Ölçülen ve matematiksel modelden elde edilen güç değerlerinin değişimleri karşılaştırılmış ve birbirleri ile uyumluluk gösterdiği görülmüştür. İki veri için aradaki fark 0 ile 3,72 W arasında değişmektedir. Ölçülen ve hesaplanan değerler için hata (RMSE: Root Mean Square Error) değeri iki farklı durum için hesaplanmıştır. İlk durum ölçülen ve hesaplanan 113 adet verilerin tamamı kullanıldığında RMSE değeri 0,95 W hesaplanmıştır. İkinci durumda ise ışınımın 0 (sıfır) olduğu anlardaki değerler çıkarılarak hesaplandığında (74 adet ölçülen ve hesaplanan veri için) RMSE değeri 1,17 W olarak hesaplanmıştır. Her iki durumda dikkate alındığında model ve ölçülen değerlerin birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir. FV model ve ölçülen veriler kullanılarak toplam enerji çıktıları aralarındaki farklar karşılaştırıldığında, model ve ölçülen enerji değerleri arasındaki fark %3,3 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca Chroma FV simülatörden elde edilen güç değerleri de ölçülen değerlerle karşılaştırılmış ve fark %4,7 olarak hesaplanmıştır. Ölçülen FV değerleri ile FV model ve Chroma FV simülatörden elde edilen güç değerleri Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Ölçülen, model ve FV simülatör çıktıları (Measured, model and FV simulator outputs)

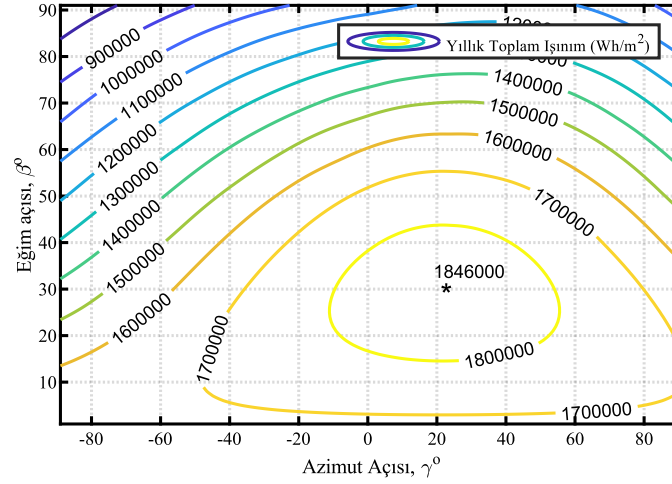
3.2. Optimum Eğim ve Azimut Açılarının Belirlenmesi (Determination of Optimum Tilt and Azimuth Angles)

Doğrulanmış ışınım ve FV panel modelleri, optimum eğim ve azimut açılarının hesaplanmasında kullanılmıştır. Modellerin giriş değerleri (ışınım, sıcaklık, rüzgar hızı, vb.) Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü'nden temin edilmiştir. Model giriş değerleri Şekil 4'te verilmiştir. Yatay yüzeye gelen global ışınım (Şekil 4a) yaklaşık 900 W/m^2 değerlerine çıktığı görülmüştür. Sıcaklık verilerine (Şekil 4b) bakıldığında ise -10°C ile 40°C arasında değiştiği, rüzgar hızı ise (Şekil 4c) maksimum 12 m/s 'ye ulaştığı görülmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde ışınım, sıcaklık ve rüzgâr hızı verileri yılın farklı zamanlarında farklı değerler almıştır. Bu nedenle hesaplamalar yapılırken yılın sadece bir kısmına bakarak değerlendirme yapmak hatalı sonuçlara neden olabilir.



Şekil 4. İzmir'e ait yıllık veriler a) global ışınım, b) sıcaklık ve c) rüzgar hızı (Annual data for Izmir a) global radiation, b) temperature and c) wind speed)

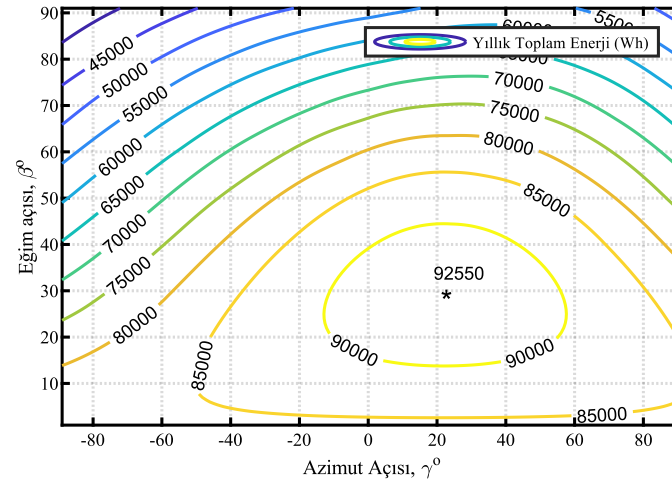
Optimum eğim ve azimut açılarının tespiti için iki farklı yol izlenmiştir. İlk olarak FV panel yüzeyine düşen yıllık toplam ışınımın maksimum olduğu eğim ve azimut açıları optimum konumlandırma açıları olarak seçilmiştir. Bu değerlerin tespiti için panel eğim açısı 1° 'er adımlarla minimum ve maksimum değerleri arasında değişimi ($0 \leq \beta \leq 90$) ve panel yüzey azimut açısının 1° 'er adımlarla minimum ve maksimum değerleri arasında değişimi ($-90 \leq \gamma \leq 90$) yapılarak panel yüzeyine düşen yıllık toplam ışınım değerleri tespit edilmiştir. FV panel yüzeyine düşen yıllık toplam ışınım değerlerinin farklı değerlerdeki eğim ve azimut açılara göre değişimi Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Yıllık toplam ışınlama göre optimum açılar (Optimum angles based on total annual radiation)

Yıllık toplam ışınlama maksimum olduğu eğim açısı $\beta=29^\circ$ ve azimut açısı ise $\gamma=21^\circ$ olarak tespit edilmiştir. Optimum eğim ve azimut açısı için eğimli yüzeye düşen toplam ışınlama değeri ise 1846000 Wh/m^2 olarak hesaplanmıştır.

Optimum eğim ve azimut açılarının tespiti için kullanılan ilk yöntemin, gerçek ortam şartları ve FV panellerin sıcaklık ve diğer ortam değişkenlerine göre güç çıktılarının değiştiği düşünüldüğünde optimum eğim ve azimut açılarının tespitinde yetersiz olduğu görülmektedir. İkinci ve ilkinin göre daha doğru bir yol olarak FV panel yıllık enerji üretiminin maksimum olduğu eğim ve azimut açıları optimum konumlandırma açıları olarak seçilmiştir. Bu değerlerin tespiti için panel eğim açısı 1° 'er adımlarla minimum ve maksimum değerleri arasında değişimi ($0 \leq \beta \leq 90$) ve panel yüzey azimut açısının 1° 'er adımlarla minimum ve maksimum değerleri arasında değişimi ($-90 \leq \gamma \leq 90$) yapılarak panel yıllık toplam enerji değerleri tespit edilmiştir. FV panel yıllık toplam enerji değerlerinin farklı değerlerdeki eğim ve azimut açılarına göre değişimi Şekil 6'da verilmiştir.



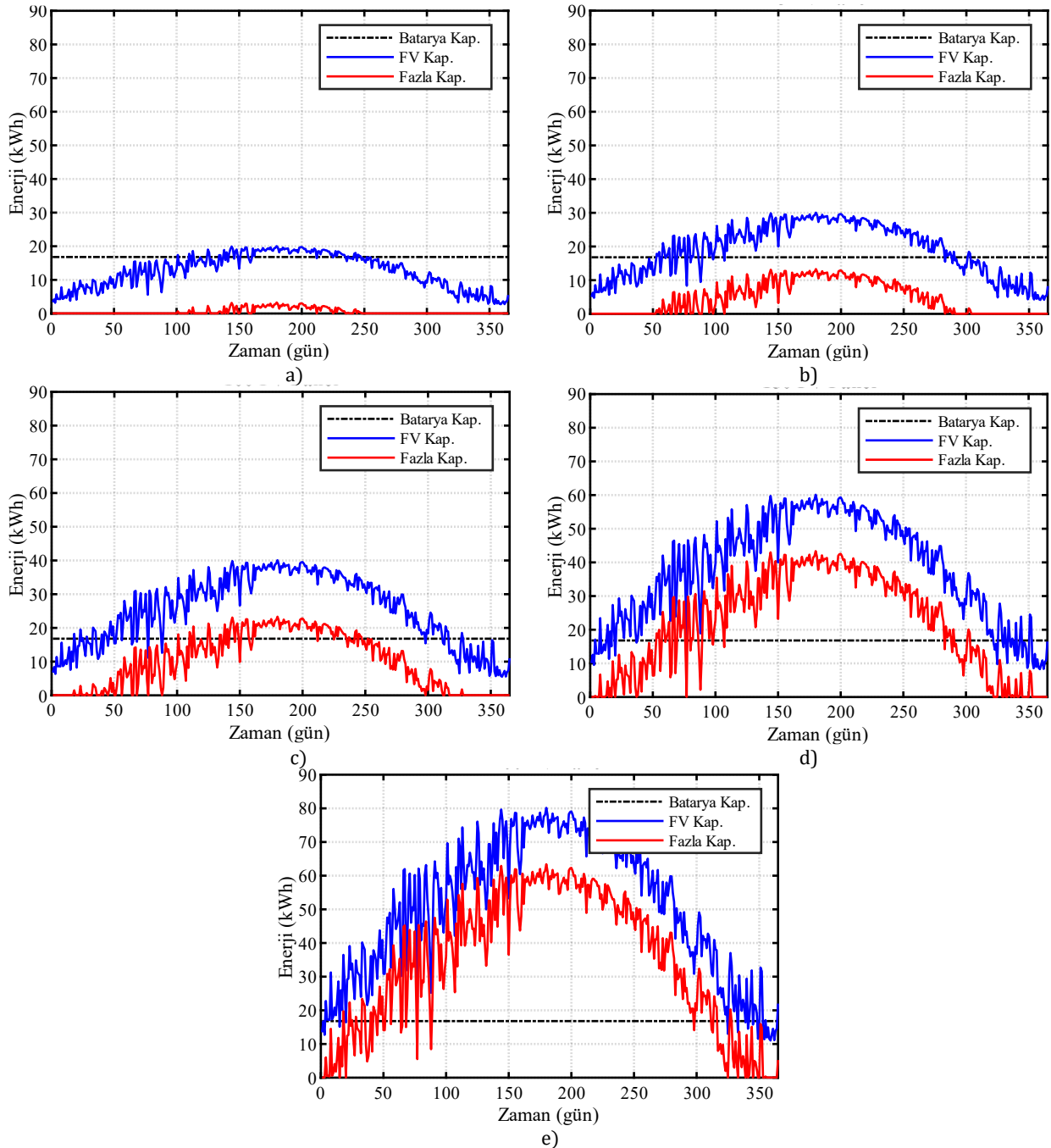
Şekil 6. Yıllık toplam enerji değerine göre optimum açılar (Optimum angles based on total annual energy)

Yıllık toplam enerji değerinin maksimum olduğu eğim açısı $\beta=28^\circ$ ve azimut açısı ise $\gamma=21^\circ$ olarak tespit edilmiştir. Optimum eğim ve azimut açısı FV panelin toplam enerji değeri ise 92550 Wh olarak hesaplanmıştır.

3.3. FV Sistem Boyutlandırması (PV System Sizing)

Ticari olarak üretilen elektrikli araç bataryaları incelendiğinde 16.5 kWh ve 90 kWh aralığında (Anon vd., 2020) batarya kapasiteleri bulunmaktadır (Bacherif vd., 2011). Proje kapsamında kullanılacak olan elektrikli araç batarya kapasitesi $16,8 \text{ kWh}$ olarak seçilmiştir. FV sistem için optimum eğim ve azimut açıları belirlendikten sonra FV boyutlandırması yapılmıştır. Optimum eğim ve azimut ($\beta=28^\circ, \gamma=21^\circ$) açılarında konumlandırılmış FV sistemin $16,8 \text{ kWh}$ kapasiteye sahip EV bataryasını şarj etme durumuna göre boyutlandırma yapılmıştır. EV bataryasının gün içerisinde şarj edildiği düşünülmüştür. EV bataryasını şarj etmek için şebeke ve FV olmak üzere iki alternatif bulunmaktadır. Proje kapsamında 10 kW çatı FV sistemi ve şebekenin EV bataryasını şarj etme durumu

planlanmıştır. Ancak FV sistemler dış ortam şartlarına bağlı olarak nominal gücünde güç çıktısını gün boyu verememektedir. FV boyutlandırması için iki alternatif dikkate alınmıştır. İlk durum EV bataryasının gün içerisinde olabildiğince FV sistem ile şarj olmasıdır. İkinci durum ise yıllık toplam EV şarj ihtiyacının FV sistemden karşılanmasıdır. İkinci durumda FV sistem yıllık enerji üretiminin batarya ihtiyacına eşit olacak bir boyutlandırma yapılmıştır. Her iki durumu da dikkate almak için 10 kW (200 adet FV panel) FV kurulu gücünden başlanarak kademeli olarak kurulu güç azaltılarak 7,5 kW (150 adet FV panel), 5 kW (100 adet FV panel), 3,75 kW (75 adet FV panel) ve 2,5 kW (50 adet FV panel) FV sistem için sonuçlar alınmıştır. Farklı kurulu güce sahip FV sistemler için gün içerisinde EV bataryasını şarj etme durumları ve bir yıllık süreçte batarya şarjı için gerekli olan enerji ihtiyacını karşılama durumları değerlendirilerek sonuçlar Şekil 7’de verilmiştir. Aşağıda grafiklerden görüldüğü üzere 16,8kW hedef güç değerinin karşılanma durumu hem kurulu güce hem de yılın hangi gününde olduğuna bağlı olarak değişmektedir. Örneğin, yılın ilk ve son günlerinde fazla kapasite değeri sıfır veya sıfıra yakın değer almıştır.



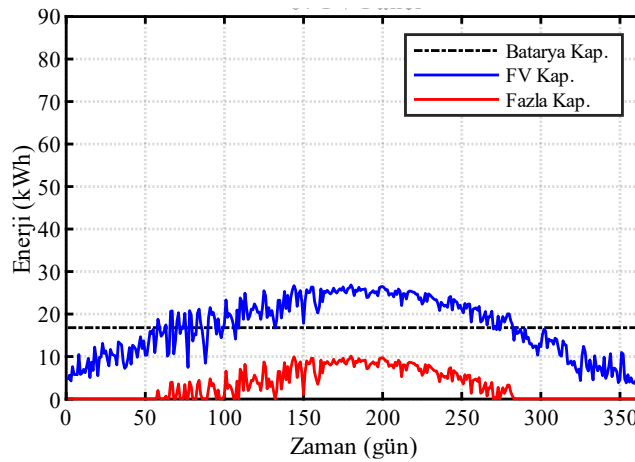
Şekil 7. a) 2,5kWp b) 3,75kWp c) 5kWp d) 7,5kWp ve e) 10kWp farklı FV kurulu gücüne sahip sistemlerin enerji üretimi, fazla enerji ve batarya kapasitesi (a) 2,5kWp b) 3,75kWp b) 5kWp c) 7,5kWp ve d)10kWp energy production, excess energy and battery capacity of systems with different PV installed power)

Her bir FV kurulu gücüne ait yıllık toplam enerji, EV batarya yıllık enerji ihtiyacı ve fazla enerji miktarlarını veren detaylar Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. FV kurulu gücüne göre yıllık enerji değerleri (Annual energy according to PV installed power)

FV kurulu gücü [kW]	Yıllık FV enerjisi [kWh]	EV batarya enerji ihtiyacı [kWh]	Fazla enerji [kWh]
10,00	18515,037	6132	12383,037
7,50	13886,278		7754,278
5,00	9257,518		3125,518
3,75	6943,139		811,139
2,50	4628,760		-1503,240

FV sistem boyutlarına göre batarya yıllık enerji ihtiyacını karşılamada 2,5 kW FV sistem haricindeki diğer boyutlandırmalar yeterli olmaktadır. Batarya yıllık enerji ihtiyacını karşılama durumu dikkate alındığında FV kapasitesinin 2,5 kW ile 3,75 kW aralığında değiştirilmesi durumunda 3,35 kW FV sistemin (67 adet FV panel) batarya yıllık enerji ihtiyacını karşılayacak boyuta sahip olduğu görülmektedir. Şekil 8'de 3,35 kW FV sistem için enerji üretimi, fazla enerji ve batarya kapasitesi değerleri verilmiştir. Yılın günlerine bağlı olarak fazla kapasite oluştuğu görülmektedir.



Şekil 8. 3,35 kW FV kurulu gücüne sahip sistem için FV enerji üretimi, fazla enerji ve batarya kapasitesi (Energy production, excess energy and battery capacity for a system with 3,35 kW PV installed power)

3,35 kW FV sistemin yıllık enerji üretimi 6202,538 kWh'tir. Batarya yıllık enerji ihtiyacı ise 6132 kWh'tir. Dolayısı ile 3,35 kW'lık FV sistem enerji üretiminin %1,137'lik kısmı EA bataryasına aktarılamamaktadır.

EV bataryasının gün içerisinde şarj olması durumu için yukarıda verilen sonuçlar değerlendirildiğinde, FV sistem boyutunun küçülmesi EV bataryasının gün içerisinde şarj edilemediği gün sayısını artırmaktadır. FV sistem boyutuna göre EV bataryasının şarj edilemediği gün sayıları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. FV kurulu gücüne göre EV bataryasının şarj edilemediği gün sayıları (Number of days EV battery cannot be charged according to PV installed power)

FV kurulu gücü [kW]	EV bataryasının şarj edilemediği gün sayısı
10,00	23
7,50	46
5,00	93
3,75	141
3,35	167
2,50	293

FV sistem boyutunun 10 kW olması durumunda ocak ve aralık aylarında toplam 23 gün EV bataryası gün içerisinde şarj edilememektedir. FV sistem boyutunun azalması durumlarında ise gün içerisinde EV bataryasının şarj edilemediği günler kasım ve şubat aylarına da kaymaktadır. FV sistem boyutunun daha düşürülmesi durumlarında ise sonbahar ve ilkbahar mevsimlerinde de EV bataryasının şarj edilmediği görülmektedir. FV sistem boyutunun 2,5 kW'a düşürülmesi durumunda ise yılın büyük çoğunluğunda EV bataryası gün içerisinde şarj edilememektedir.

EV bataryasının FV sistem tarafından şarj edilemediği durumlarda şebeke devreye girmekte ve EV bataryası şebeke üzerinden şarj olmaktadır. İlk durum için EV bataryasının gün içerisinde yıl boyunca şarj edilebilmesi için FV sistem boyunun 10 kW'ın üzerine çıkması gerektiği görülmektedir. Ancak bu durum sistemde kullanılacak güç elektroniği dönüştürücülerinin güçlerinin artmasına sebep olduğu için hem FV sistem açısından hem de devreler açısından sistem maliyetini arttıracaktır. Dolayısı ile ilk durum için yıl içerisinde, özellikle kış aylarında EV bataryasının gün içerisinde şarj olması durumu ihmal edilebilir olarak düşünülürse, FV sistem boyutunun 5 kW seviyelerinde tutulması yeterlidir. İkinci durum için ise EV bataryasının yıllık şarj ihtiyacının FV sistem tarafından karşılanması durumu için (şebeke ile yılsonu mahsuplaşma) 3,35 kW'lık bir FV sistem boyutu yeterli olacaktır.

4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Elektrikli araçların kullanımına paralel olarak şarj için gerekli enerjinin karşılanması için kaynak arayışı da giderek artmaktadır. Bu konuda yenilenebilir enerji kaynakları çözüm olarak ortaya çıkmaktadır. Özellikle kurulum kolaylığı ve düşük maliyetli altyapı gereksinimlerinden dolayı FV sistemler yaygın olarak kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarından bir tanesidir. FV sistemin ihtiyacı karşılayabilmesi için kurulumu yapılmadan önce bazı fizibilite çalışmaları yapılmalıdır. Bu kapsamda gerçek ortam koşullarına ait sıcaklık, rüzgâr hızı ve ışınım değerleri göz önüne alınarak bazı hesaplamalar yapılmalıdır. Bu hesaplamalar farklı paket programlar kullanılarak yapılabilmektedir. Bu çalışmada, FV sistem entegreli ve şebekeye bağlı bir elektrikli araç şarj istasyonunda optimum FV kapasitesinin belirlenmesi amacıyla yeni bir yaklaşım geliştirmiştir. Gerçek ortam koşulları altında MATLAB ortamında oluşturulan bir FV model kullanılarak aynı şartlar altında farklı açılar için hesaplamalar yapılmış ve İzmir ili için optimum eğim ve azimut açıları belirlenmiştir. Çalışmanın odak noktası, 16,8 kWh kapasiteli bir elektrikli araç bataryasının bir yıllık toplam enerjisi için gereken FV sistem kapasitesinin optimizasyonunu sağlamaktır. Matematiksel modelleme ve simülasyonlar yardımıyla elde edilen sonuçlar, önerilen 3,35 kW'lık FV kapasitesinin bir elektrikli aracın yıl boyunca ihtiyaç duyduğu enerjiyi karşılayabileceğini göstermektedir. Bu durum, FV sistemlerin elektrikli araç şarj sistemleri için optimum kapasitenin belirlenmesinde etkili bir yöntem sunmaktadır. Bu sonuçlar, fotovoltik sistemlerin elektrikli araç şarj istasyonlarında kullanımının enerji maliyetlerini azaltabileceğini ve çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunabileceğini göstermektedir. Sonuç olarak, bu çalışma, sürdürülebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik etmek ve elektrikli araçlar için etkin şarj altyapısı geliştirmek isteyen araştırmacılar ve endüstri paydaşları için önemli bir kılavuz niteliği taşımaktadır. Gelecekteki çalışmalar kapsamında, farklı coğrafi bölgelerde ve farklı elektrikli araç modelleri için benzer optimizasyon stratejileri incelenerek şarj enerjisinin karşılanmasında FV sistem entegrasyonu ve kullanılan devre topolojileri konusundaki bilgi birikimi genişletilebilir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 120E365 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Anon., 2020. BU-1003: Electric Vehicle (EV) – Battery University. Battery University. Retrieved March 6, 2024 (www.batteryuniversity.com).
- Arulvendhan, K., Srinivas, K. N., Rajamanickam, N., Alharbi, M., Seada, H., 2024. Hybrid Compensation Based Efficient Wireless Charging System Design with Solar Photovoltaic Interface Toward Sustainable Transportation. IEEE Access, 12, 87152-87166.
- Ayaz, R., Nakir, I., Tanrioven, M., 2014. An Improved Matlab-Simulink Model of PV Module Considering Ambient Conditions. International Journal of Photoenergy.
- Becherif, M., Ayad, M. Y., Hissel, D., Mkahl, R., 2011. Design and Sizing of a Stand-Alone Recharging Point for Battery Electrical Vehicles Using Photovoltaic Energy. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC.
- Bellini, A., Bifaretti, S., Iacovone, V., Cornaro, C., 2009. Simplified Model of A Photovoltaic Module. Applied Electronics.
- Benghanem, M. 2011. Optimization of Tilt Angle for Solar Panel: Case Study for Madinah, Saudi Arabia. Applied Energy 88(4),1427-33.
- Chen, Y., Cao, L., Wang, F., 2021. Research on Optimal Configuration Method of Devices for Integrated PV Storage and Charging Station. 5th IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration: Energy Internet for Carbon Neutrality, EI2 2021 1344-48.
- Das, S., Acharjee, P., Bhattacharya, A., 2021. Charging Scheduling of Electric Vehicle Incorporating Grid-to-Vehicle and Vehicle-to-Grid Technology Considering in Smart Grid. IEEE Transactions on Industry Applications 57(2),1688-1702.

- Duffie, J. A., Beckman, W. A., 2013. Solar Engineering of Thermal Processes: Fourth Edition. Solar Engineering of Thermal Processes: Fourth Edition.
- Gülkaya, B., Ateş, Y., 2021. Elektrikli Taşıtların Dağıtılmış Üretim Tabanlı Şebekeler Üzerindeki Etkilerinin Analizi Ve Çözüm Önerileri. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 9(4),1174–99.
- Güner, S., Yazıcı, S., 2022. Bir Güneş Enerji Sisteminin Dağıtım Sistemi Güvenilirliğine Etkilerinin İncelenmesi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 10(2),538–49.
- Heba, A., Gastli, A., Ben-Brahim, L., Semira, M., 2022. Planning and Optimizing Electric-Vehicle Charging Infrastructure Through System Dynamics. IEEE Access, 10, 17495–17514.
- John, S., Vincent. G., 2021. PV Fed Electric Vehicle Charging Station with Power Backup. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC 2021-November.
- Li, B., Sun, H., Lou, J., Sun, K., Zhang, Z., Sun, Y., 2024. An Integration Scheme for Highway Rest Area Integrating the Distributed Photovoltaic Generation and Energy Storage. IEEE Transactions on Industry Applications, 60(1), 1083–1092.
- Liu, B., Jordan, R., 1963. The Long-Term Average Performance of Flat-Plate Solar-Energy Collectors: With Design Data for the U.S., Its Outlying Possessions and Canada. Solar Energy 7(2),53–74.
- Mishra, D., Singh, B., Panigrahi, B. K., 2022. Sigma-Modified Power Control and Parametric Adaptation in a Grid-Integrated PV for EV Charging Architecture. IEEE Transactions on Energy Conversion, 37(3), 1965–1976.
- Mukherjee, J. C., Arobinda G., 2015. A Review of Charge Scheduling of Electric Vehicles in Smart Grid. IEEE Systems Journal 9(4),1541–53.
- Muttaqi, K. M., Rahman, O., Sutanto, D., Hossain Lipu, M. S., Abdolrasol, M. G. M., Hannan, M. A., 2022. High-Frequency Ripple Injection Signals for the Effective Utilization of Residential EV Storage in Future Power Grids With Rooftop PV System. IEEE Transactions on Industry Applications, 58(5), 6655–6665.
- Prajapati, S, and Fernandez, E., 2019. Rooftop Solar PV System for Commercial Office Buildings for EV Charging Load. 2019 IEEE 6th International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Application, ICSIMA 2019.
- Rangaraju, J., Gong X., 2020. Taking Charge of Electric Vehicles-Both in the Vehicle and on the Grid.
- Sekhar, K. S. R., Chaudhari, M. A., Khadkikar, V., 2023. Enhanced Hybrid Converter Topology for PV-Grid-EV Integration. IEEE Transactions on Energy Conversion, 38(4), 2634–2646.
- Tamizhmani, G., Ji, L., Tang, Y., Petacci L., 2003. Photovoltaic Module Thermal/Wind Performance: Long-Term Monitoring and Model Development for Energy Rating. NCPV and Solar Program Review Meeting, NREL.
- Yildizhan, D., Erenoğlu, A. K., Erdiç, O., 2022. Elektrikli Araç Entegrasyonunun Dağıtım Sistemine Etkilerinin İncelenmesi Ve Şarj İstasyonu Altyapısının Tayin Edilmesi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 10(4),1232–42.
- Xiao, L., Muttaqi, K. M., & Agalgaonkar, A. P., 2023. Improving Reliability of PV-Powered Highway with Electric Vehicle Charging Services. IEEE Transactions on Industry Applications, 60(2), 2002–2011.
- Yousuf, A. K. M., Wang, Z., Paranjape, R., Tang, Y., 2023. Electric Vehicle Charging Station Infrastructure: A Comprehensive Review of Technologies, Challenges, and Mitigation Strategies. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 588–92.
- Yüzer, E. Ö., Bozkurt, A., Barutçu, Ç., 2023. Fotovoltaik Sistem Çıkış Gücünün Yapay Sinir Ağları Ve Matlab/Simulink Modellerinin Entegrasyonu İle Belirlenmesi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 11(2),551–63.
- Zhang, S., James, J. Q. Y., 2022. Electric Vehicle Dynamic Wireless Charging System: Optimal Placement and Vehicle-to-Grid Scheduling. IEEE Internet of Things Journal 9(8),6047–57.
- Zhang, T., Wei C., Zhu, H., Zhigang, C., 2014. Charging Scheduling of Electric Vehicles with Local Renewable Energy under Uncertain Electric Vehicle Arrival and Grid Power Price. IEEE Transactions on Vehicular Technology 63(6),2600–2612.



CLASSIFICATION OF ACUTE LYMPHOBLASTIC LEUKEMIA CELLS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Ayşe Berika VAROL MALKOÇOĞLU¹, İsmail İŞERİ^{2*}

¹ Department of Computer Engineering, Istanbul University-Cerrahpasa, Istanbul, Türkiye

² Department of Computer Engineering, Ondokuz Mayıs University, Samsun, Türkiye

Keywords

Artificial Intelligence,
Machine Learning,
Cancer Detection.

Abstract

Due to the morphological similarity between immature lymphoblasts (cancerous cells) to lymphocytes (non-cancerous cells), detecting Acute Lymphoblastic Leukemia poses a significant challenge for pathologists. These cells, which exhibit a similar pattern, can lead to various errors during the diagnosis of the disease. In this study, the cancerous and non-cancerous cells were classified using 3 different artificial intelligence approaches. In the first approach, the classification process was carried out by training Convolutional Neural Networks in 4 different architectures. In the second approach, a hybrid approach was proposed by combining the convolution layer of the CNN model as the feature extractor with the Support Vector Machine, Naive Bayes and Random Forest algorithms as the classifier. The classification processes were carried out by training the proposed second approach. In the third approach, the classification process was performed using transfer learning process and ResNet50 and VGG16 networks. In all experiments, the effects of hyper-parameter and dataset changes on model performance were also examined. The results obtained by these three approaches were compared using the Accuracy, Precision, Recall, F-score, and AUC performance measures. It was determined that the most successful results were obtained with the 1st approach using the Dataset3.

AKUT LENFOBLASTİK LÖSEMİ HÜCRELERİNİN YAPAY ZEKA İLE SINIFLANDIRILMASI

Anahtar Kelimeler

Yapay Zeka,
Makine Öğrenimi,
Kanser Tespiti.

Öz

Olgunlaşmamış lenfoblastların (kanserli hücreler) lenfositlere (kanserli olmayan hücreler) morfolojik benzerliği Akut Lenfoblastik Lösemi kanserinin tespitinde patoloğlar için zorlu bir problemdir. Benzer bir desene sahip olan bu hücreler, hastalığın teşhisi sırasında çeşitli hatalara neden olabilmektedir. Bu sebepten çalışma kapsamında kanserli ve kanserli olmayan hücreler 3 farklı yapay zeka yaklaşımı kullanılarak tespit edilmiştir. İlk yaklaşımda Evrimsel Sinir Ağları 4 farklı mimaride eğitilerek sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. İkinci yaklaşımda, özellik çıkarıcı olarak CNN modelinin evrim katmanı, sınıflandırıcı olarak ise Destek Vektör Makinesi, Naive Bayes ve Rastgele Orman algoritmaları birleştirilerek hibrit bir yaklaşım sunulmuştur. Önerilen ikinci yaklaşım eğitilerek sınıflandırma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Üçüncü yaklaşımda ise transfer öğrenme süreci ile ResNet50 ve VGG16 ağları kullanılarak sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Tüm deneylerde modellerdeki hiperparametre ve veri setleri değişikliklerinin performans üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu üç yaklaşımla elde edilen sonuçlar Doğruluk, Kesinlik, Geri Çağırma, F-skor ve AUC performans ölçüleri kullanılarak karşılaştırılmış ve en başarılı sonuçların Dataset3 kullanılarak Yaklaşım1 ile elde edildiği tespit edilmiştir.

Alıntı / Cite

Varol Malkoçoğlu, A. B., İşeri, İ., (2024). Classification of Acute Lymphoblastic Leukemia Cells Using Artificial Intelligence, *Journal of Engineering Sciences and Design*, 12(3), 488-504.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

A. B. Varol Malkoçoğlu, 0000-0003-1856-9636
İ. İşeri, 0000-0002-0442-1406

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	08.04.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date	24.07.2024
Kabul Tarihi / Accepted Date	25.07.2024
Yayın Tarihi / Published Date	26.09.2024

* İlgili yazar / Corresponding author: ismail.iseri@omu.edu.tr, +90-362-312-1919

CLASSIFICATION OF ACUTE LYMPHOBLASTIC LEUKEMIA CELLS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Ayşe Berika VAROL MALKOÇOĞLU¹, İsmail İŞERİ^{2†}

Department of Computer Engineering, Istanbul University-Cerrahpasa, Istanbul, Turkiye

Department of Computer Engineering, Ondokuz Mayıs University, Samsun, Turkiye

Highlights

- Detection of cancer cells,
- Hybrid model proposal and comparison with other approaches
- Effects of different hyper-parameters on the models

Purpose and Scope

The purpose of the paper is to analyze the impact of hyper-parameters in different approaches on the result and to propose a helpful system for pathologists. The scope is the detection of ALL cancer with pathology images.

Design/methodology/approach

In the study, similar studies were analyzed through a literature review. A hybrid model is proposed by combining the convolution layers of CNN architecture with classical machine learning algorithms. Then, the performances of CNN architecture, hybrid model and transfer learning approaches are tested and compared for different hyper-parameters.

Findings

The performance of 3 approaches with different hyper-parameters on low quality data is analyzed. Accordingly, the proposed hybrid model (Approach 2) was found to perform better than the others. When the effect of different size datasets on the models is analyzed, it is seen that the dataset with synthetic and original data produces better results than the others. It is also observed that our model performs well even on low quality datasets.

Originality

The classification of cancerous cells with the proposed hybrid model (Approach 2) has not been previously observed in the literature. The performance of this approach is analyzed and compared with others, and it is shown that it can produce remarkable results for classification processes in healthcare and similar fields. Therefore, it is thought that the proposed model can be used as an auxiliary system for pathologists.

1. Introduction

Acute Lymphoblastic Leukemia (ALL) is a blood cancer where the uncontrolled growth of immature lymphoblast cells eventually leads to the accumulation of deadly numbers of leukemia cells. This type of cancer is usually seen in children. As shown in Figure 1, according to the research conducted by World Health Organization (WHO) in 2022, leukemia was detected in 31.9% of children with cancer aged 0-14 years (Global Cancer Observation, 2024; Uzunhan and Karakaş, 2012). This disease generally seen in children between the ages of 2 and 5, occurs as a result of overproduction of the white blood cells (lymphocytes) in the form of lymphoblast in the bone marrow, and can lead to rapid death if it is not detected and not treated (Pediatric Treatment Editorial Board, 2021; Inaba et al., 2013). Therefore, the detection of ALL is crucial. During the detection of the disease, various tests such as physical examination, blood count, chest X-Ray, chemical blood study, and bone marrow biopsy are performed. Apart from these tests, morphological examination method is also used. However, during detection carried out with this method, some difficulties are encountered. This is due to the fact that immature blood cells (lymphoblasts) and normal blood cells (lymphocytes) are morphologically similar.

To fulfill this challenging task, pathologists try to diagnose the diseased area using traditional methods. Samples taken from the disease site are examined under the microscope by pathologists to detect the molecular basis of the disease, and then the most appropriate diagnosis is determined and treatment begins (Madabhushi, 2009). However, undesired human-related errors may occur during the diagnosis because the procedures are performed by humans (Sipes & Li, 2018). In recent years, several digital systems have been developed to prevent such possible errors and help pathologists. These developments have gained momentum with the digitization of data. The data previously diagnosed by pathologists were digitized and the concept of "digital pathology" emerged. Thus, with the development of digital pathology, the number of artificial intelligence-based studies has increased

[†] Corresponding author: ismail.iseri@omu.edu.tr, +90-362-312-1919

in recent years. To achieve better results than existing conventional disease diagnosis methods, digital pathology images are provided as input to various artificial intelligence models. These models are trained and then digital pathology images are classified and analyzed using Machine Learning (ML) algorithms (Madabhushi, 2009; Heffner *et al.*, 2021). Therefore, with the artificial intelligence models developed, it is aimed to analyze the data obtained from patients more objectively and quickly.

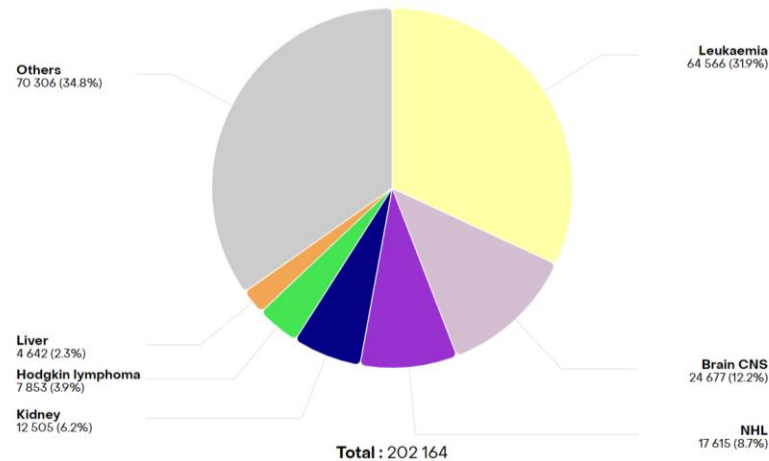


Figure 1. Cancer statistics of children between the ages of 0-14 in the World shared by WHO in 2022

In a study conducted by Selçuk and Özen (2015), 130 cancerous and 130 non-cancerous ALL cells were used. The researchers used image processing techniques on these data and classified the cells as cancerous or non-cancerous only with the Support Vector Machine (SVM) algorithm. In some other studies (Sipes & Li, 2018; Kumar *et al.*, 2018; Bhuiyan *et al.*, 2019), performance comparisons were carried out using multiple algorithms on ALL data. The common feature of the datasets they used was that the data were pre-classified as cancerous and non-cancerous. However, image scales and dataset size were different in each of these three studies. In the study conducted by Sipes and Li (2018), ALL-IDB and Cella Vision datasets were combined to classify all cancer types, and images were classified in Red Green Blue (RGB) color space with K-Nearest Neighbor (K-NN), Neural Network (NN), and Convolutional Neural Networks (CNN) algorithms. By separating the dataset, they used as 60% education, 20% validation, and 20% test, they assessed their performances. They achieved the best result by the CNN model with a 92% (± 3) accuracy rate. Similarly, K-NN and Naive Bayes (NB) algorithms were applied in the study carried out by Kumar *et al.* (2018), but their images were used in gray level color space. In this way, they observed that K-NN and NB produced 92.8% and 79% accuracy values, respectively. Bhuiyan *et al.* (2019) used microscopic images of resized 108 white blood cells and evaluated the classification performance by using Random Forest (RF), SVM, Logistics Regression (LR), and Decision Tree (DT) machine learning algorithms. Results showed that with an accuracy rate of 99.05%, the SVM algorithm was more successful than other algorithms. In another study using the ALL dataset (Duggal *et al.*, 2017), to obtain a large dataset, the image data was subjected to 180 degrees random and vertical rotation during the training phase and performance evaluations were carried out using AlexNet and T-CNN algorithms. However, the change of the hyper-parameters was not observed. In addition, this study also compared the performances of AlexNet and T-CNN algorithms by adding the SD layer, which analyzed the pixel density developed in the study, to these algorithms. As a result of this process, it was revealed that with 95.5% accuracy and 95.4% F-scoring rate, the best values were achieved with T-CNN-SD.

In the study of Zhao *et al.* (2017), where different pathology data were used, scholars utilized CNN and RF algorithms to detect 5 types of white blood cells. Jiang *et al.* (2018), examined 3 types of lymphoma and classified them with the SVM algorithm. In that study, the average accuracy performance value was calculated as 97.96%. In another study (Banik *et al.*, 2019), on the other hand, as in the study of Zhao *et al.* (2017), different blood cells were classified separately from each other. However, in this study (Banik *et al.*, 2019), scholars used data in RGB color space and benefited from the CNN algorithm. They similarly balanced the different unbalanced dataset by using a random data return method to eliminate unstable data, and they determined that the classification accuracy was over 90%. Perlberg & Kramer (2019) and Oliveira & Dantas (2021) used the same dataset as in this study. Perlberg & Kramer (2019) used ResNeXt to differentiate ALL-type cancerous cells from non-cancerous cells and used the Squeeze-and-Excitation module, which improves the channel dependencies of CNN models with almost no computation. This module was used by Hu *et al.* (2018) in the ImageNet competition, helping to improve the 2016 best result by approximately 25%. They performed an effective classification using the ResNeXt convolutional neural network with the Squeeze-and-Excitation module, and thus obtained an F1 score of 88.91%. Oliveira and Dantas (2021) classified cancerous and non-cancerous cells using the VGG16/VGG19 and Xception

model. By augmentation the data and running it on VGG16/VGG19 and Xception models, they obtained an F1-score value of 92.60% with the parameters they determined.

As observed in the literature, several machine learning studies have been examined for ALL cancer detection in biopsy images. In this study, different artificial intelligent approaches were examined. In the first approach, the performance of CNN models with different number of layers were analyzed. In the second approach, well-known machine learning methods (SVM, NB, RF) were used as classifiers instead of NN, and the convolutional feature extraction from the first approach was used as a feature extractor. In the third approach, the transfer learning-based study was carried out using the VGG16 and ResNet50 models. Briefly, the classification of the disease was carried out using digital pathology data and by artificial intelligence methods. Additionally, performances of the approaches under different hyper-parameters were examined and evaluated using experimental methods.

2. Materials and Methods

2.1. Description of The Problem

Leukemia occurs as a result of the decay of white blood cells in the maturation process. Figure 2 shows the functioning of normal white blood production in a body. Lymphoid stem cells produced from stem cells form lymphoblasts. With the maturation of these lymphoblasts, white blood cells, which are called B lymphocytes and T lymphocytes, are formed. However, during ALL disease, due to an unknown reason in the blood formation process, the lymphoblast stage hesitates and shows an uncontrolled increase here. Lymphoblasts, which accumulate in the blood, tissues, and bone marrow, inhibit the production of normal bone marrow cells. This inhibition leads to a deficiency of red blood cells, thrombocytes, and normal white blood cells, ultimately causing cancer (Uzunhan & Karakaş, 2012). Although this situation is detected by pathologists, the obtained results vary according to the skill of the pathologist and the quality of the blood sample. Therefore, it is aimed to design assistive systems for pathologists by detecting ALL cancer with artificial intelligence approaches. To detect ALL cancer using artificial intelligence applications, it is necessary to differentiate between lymphocytes and lymphoblasts. However, as shown in Figure 2, it is known that it is difficult to distinguish between lymphoblasts and lymphocytes due to the morphological similarities of the cells.

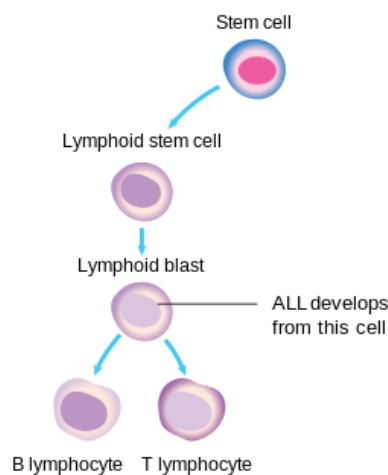
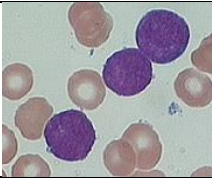
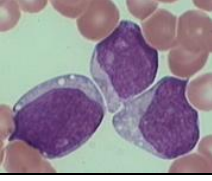
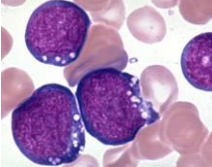


Figure 2. Formation diagram of white blood cells (Anonymous, 2023)

For this reason, it is essential to identify the types of cancerous cells. According to the FAB (French - American - British) classification technique, which is frequently used in the morphological differentiation of ALL, there are 3 types of disease forms consisting of L1, L2, and L3 whose explanations are given in Table 1. In this study, the classification was made using the data of L1 and L2 forms, which are the childhood types of ALL disease.

As it seems that, it is quite difficult to separate lymphoblasts in L1 form from lymphocytes. While lymphocytes have formally smooth edges and a single nucleus, lymphoblasts have similar sizes, small diameter homogeneous structure, few nucleoli, and narrow cytoplasm structure. Distinguishing between these two cell types by eye and detecting them objectively is a very challenging process. In this study, we aim to separate and successfully classify lymphocytes from immature lymphoblasts.

Table 1. ALL disease types

Disease Type	L1
<p>The diameters of cells are small, they are homogeneous, have narrow cytoplasm, and nucleole is too small to be seen. It is the type of ALL seen in children. It accounts for 85% of all ALL patients.</p>	
Disease Type	L2
<p>The diameters of cells are different, they are heterogeneous, and have prominent cytoplasm and nucleolus. It is the type of ALL seen in adults. It constitutes 14% of all ALL patients.</p>	
Disease Type	L3
<p>The diameters of cells are large, they are homogeneous, similar to Burkitt lymphoma and are caused by B lymphocytes. It is also known as the "starry sky" because of the points on it, and it accounts for 1% of ALL patients.</p>	

2.2. Dataset Preparation

An open-source dataset of ALL cancer type, prepared by the Cancer Imaging Archive was used in this study (Duggal *et al.*, 2017; Clark *et al.*, 2013; Duggal *et al.*, 2016a; Duggal *et al.*, 2016b; Karlik & Olgac, 2011; Mourya *et al.*, 2019). The selected dataset contains the pathology images of the most common cancer type diagnosed in childhood. This dataset consists of 10.661 labeled images at a resolution of 450x450 pixels in RGB format. Among these 3389 instances (Figure 3a) were labeled as non-cancerous and 7272 instances (Figure 3b) were labeled as cancerous cells.

In the machine learning phase, 3 different datasets containing samples with equal number of cancerous and non-cancerous labels were prepared by using the original data. In the first of these datasets, there were a total of 2532 samples (1266 cancerous and 1266 non-cancerous). In the second dataset there were a total of 5646 samples (2823 cancerous and 2823 non-cancerous). In the third dataset, there were a total of 12.140 samples (6070 cancerous and 6070 non-cancerous). While creating the third dataset, the data augmentation process described in section 2.3 was used, and this dataset contained both real and synthetic data. In addition to the different dataset sizes, the dimensions of the images used were also resized. The first set of images was reduced to 48x48 (Figure 3c and Figure 3d) and the second set of images was reduced to 32x32 (Figure 3e and Figure 3f). For the model, the obtained datasets were separated randomly as 70% training, 15% validation, and 15% test. In this way, the performance of the change in image sizes and different dataset sizes was also observed.

2.3. Data Augmentation

In the literature, various data augmentation processes are applied to increase the generalization ability of the models especially in deep learning and some machine learning studies. For this reason, considering that it would have a positive effect in our study, the data in the dataset was augmented by image processing methods and 12.140 sets were created. This augmented dataset contains both synthetic and real data and includes 6070 cancerous and 6070 non-cancerous samples.

During the data augmentation process, the total dataset was increased to 12.140 units by applying rotating, shearing, and polishing operations on the original images. New sample parts produced from the original image data because of the magnification process are shown in Figure 4. The parameters and values applied during the data augmentation process are as follow:

- rotation_range=30
- shear_range=0.2
- brightness_range= [0.1,1.0]

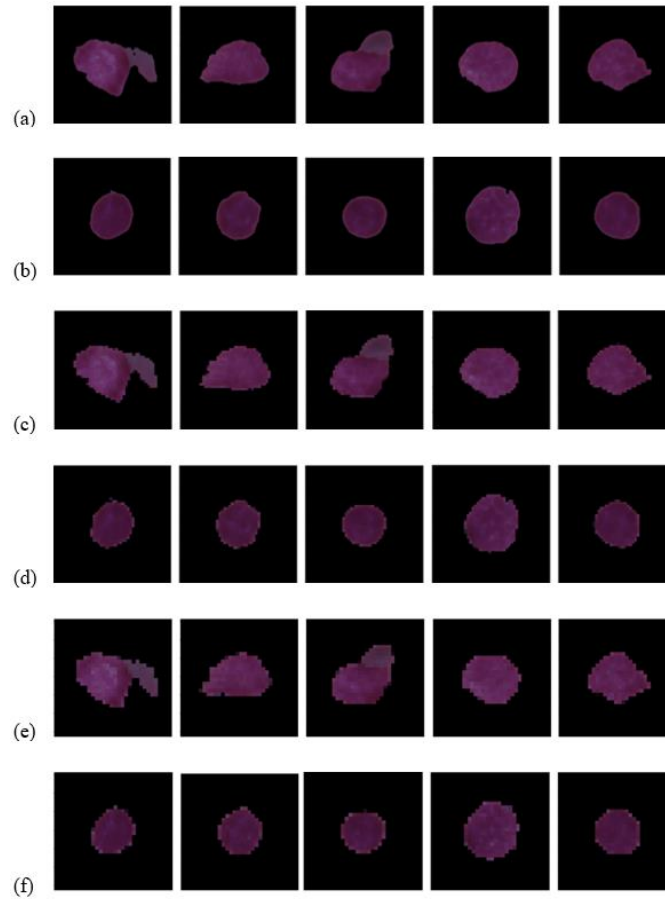


Figure 3. Cancerous (a) and non-cancerous (b) cells at 450x450 scale. Cancerous (c) and non-cancerous (d) cells at 32x32 scale. Cancerous (e) and non-cancerous (f) cells at 48x48 scale

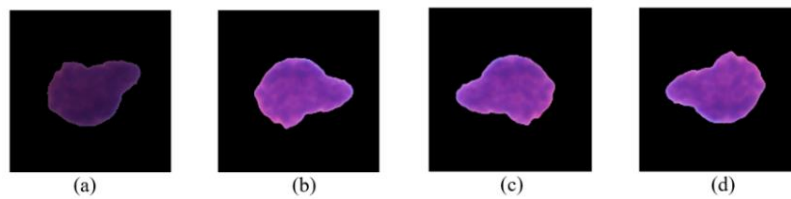


Figure 4. Increased view of cancerous cell Images of 450 x 450 scale. Original image (a), synthetic data (b), (c), (d)

2.4. Used Platforms and Libraries

In the experiments, a hardware with 12 GB RAM, 311 GB disk, and Tesla K 80 GPU features was used on the Google Colab platform. Applications developed using Python language were stored by Google Drive. Within the scope of this study, the following libraries were utilized:

- Keras and TensorFlow for deep learning,
- Scikit-learn for machine learning,
- Matplotlib for data visualization,
- NumPy for mathematical operations,
- OpenCV for image processing and image augmentation

2.5. Hyper-parameters

2.5.1. Activation Function

The main task of the activation function is to map a processed value to a specific range by limiting the output value of the neuron. If the learning of the network is carried out without the use of the activation function, it will have carried out limited learning (Karlik & Olgac, 2011). In this study, Rectified Linear Unit (ReLU) activation functions

were used in the outputs of the convolution layers and in the hidden layers of the fully connected layer. Sigmoid activation function was used in the output layer of the fully connected layer.

ReLU: It is an activation function that performs a thresholding operation for each input value (Eq. 1). It works faster than Sigmoid and Hyperbolic Tangent by reducing the cost of calculation. It is generally preferred in multilayer networks. However, when the majority of inputs consist of negative values, a lot of information is lost because their return will produce a value of zero, which prevents the network from learning (Si *et al.*, 2018; Strusa & Dolezel, 2019). This function is generally preferred in the convolution layer due to its low-cost load.

$$f(x) = \begin{cases} x & \text{if } x \geq 0 \\ 0 & \text{if } x < 0 \end{cases} \quad (1)$$

Sigmoid: It is an activation function (Eq. 2) that produces positive y output values between 0 and 1 values. It is commonly used in backpropagation algorithms (Sibi *et al.*, 2019). This function is preferred in the output layer and is particularly useful for binary classification tasks, where the result is either 0 or 1.

$$f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \quad (2)$$

2.5.2. Optimization Function

Optimization functions are used to find the most suitable solution for nonlinear problems. In this study, Adaptive Moment Estimation (ADAM), Stochastic Gradient Descent (SGD) and Root Mean Square Error Probability (RMSProp) were used. The features of these selected optimization functions are as follows:

ADAM: It is a stochastic-purpose optimization function that is a primary gradient of its functions and needs little memory. This function was created by combining the advantages of AdaGrad, which works well for sparse parameters, and RMSProp, which is effective for non-stationary objectives. The difference of it from the RMSProp function is that it directly estimates the parameter updates by calculating the first and second moment averages of the m_t in Eq. 3 and v_t gradients in Eq. 4. (Kingma & Ba, 2014). This dual moment estimation helps in achieving a more balanced and adaptive learning rate (Eq. 5.).

$$m_t = \frac{M_t}{1-\beta_1^t} \quad (3)$$

$$v_t = \frac{V_t}{1-\beta_2^t} \quad (4)$$

$$\theta_{t+1} = \theta_t - \frac{n}{\sqrt{v_t+\epsilon}} m_t \quad (5)$$

SGD: It is an optimization method that minimizes the cost function during parameter updates by employing the gradient descent technique. Initially, randomly determined parameters are updated in the opposite direction of the gradient each time. This update occurs for each individual training sample, allowing SGD to potentially reach the local minimum faster and work more efficiently than other methods (Yazan & Talu, 2017). In Equation 6, x^i and represent the features and labels of the samples, respectively. The learning rate is denoted by n and θ refers to the parameter applied for the entire training set.

$$\theta = \theta - n \nabla_{\theta} J(\theta; x^i; y^i) \quad (6)$$

RMSProp: It produces parameter updates using a scaled-up degree of momentum. It prevents the rapid decline of the learning rate in AdaGrad function, as with the AdaDelta function. Thanks to this function, by reducing oscillations, the algorithm is accelerated, and more accurate results are produced (Ruder, 2016). In this method, the learning rate is denoted by n . The sum of the squares of the previous gradients, represented as $[E[g^2]]_t$, is calculated to adaptively adjust the learning rate for each parameter.

$$\theta_{t+1} = \theta_t - \frac{n}{\sqrt{E[g^2]_t+\epsilon}} g_t \quad (7)$$

2.6. Approaches

2.6.1. Approach1: Convolutional Neural Network

CNNs are basically a special artificial neural network model that consist of convolution, pooling, flattening and fully connected layers. In recent years, it has come to the forefront with its classification successes especially on large datasets (Si *et al.*, 2018). This study aims to enhance the classification performance of models by different hyper-parameters used in the layer numbers, filter sizes, and training of CNN models. To achieve this goal, 4 different CNN models were designed within the scope of this study. In the designed CNN models, ReLU activation function was used in the convolution layers and Sigmoid activation function was used in the output layers. The general structure of the designed CNN models was transferred to the convolutional layer as shown in Figure5 and the feature map was resized by sending it to the pooling layer. The resized feature map was converted to one-dimensional vector in the flattening layer and transferred to the fully connected layer for classification. There were 4 different CNN models created in this approach. These models consisted of 3, 6, 9 and 10 convolution layers and were called CNN-1, CNN-2, CNN-3, and CNN-4, respectively. Each CNN model used filters of different sizes and different step numbers. With these models, the effect of the increase in the number of layers on performance was measured.

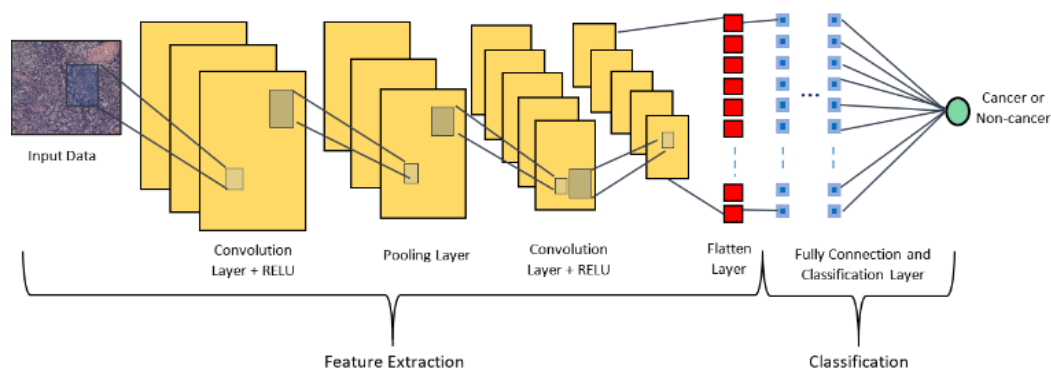


Figure 5. The structure of the convolutional neural network model

2.6.2. Approach2: Convolutional Feature Extraction and Machine Learning

Machine learning is an approach that can learn and predict using data and mathematical techniques. Feature extraction is made from data with the help of different mathematical techniques (Strusa and Dolezel, 2019). Classification, clustering or regression can be done by using these features obtained from data in various algorithms. In this approach, feature extraction was made using the convolution process and NB, RF and SVM classification algorithms were used instead of the fully connected layer. Feature vectors from the CNN-1, CNN-2, CNN-3, and CNN-4 models designed on Approach1 were used by NB, RF, and SVM classifiers for training and testing. The new feature extraction models were called Feature Extraction Model-1 (FEM-1), Feature Extraction Model-2 (FEM-2), Feature Extraction Model-3 (FEM-3), and Feature Extraction Model-4 (FEM-4), respectively. The vectors obtained from the created feature extraction models were given as inputs to NB (Sibi *et al.*, 2013), RF (Kingma & Ba, 2014) and SVM (Yazan & Talu, 2017) algorithms. With this approach, feature vectors were classified by other machine learning algorithms instead of NN algorithm. By comparing the performance results of these hybrid models, a comparison was made between the 4 models used for feature inference and the 3 classifiers. The basic structure of the established classification network is shown in Figure 6.

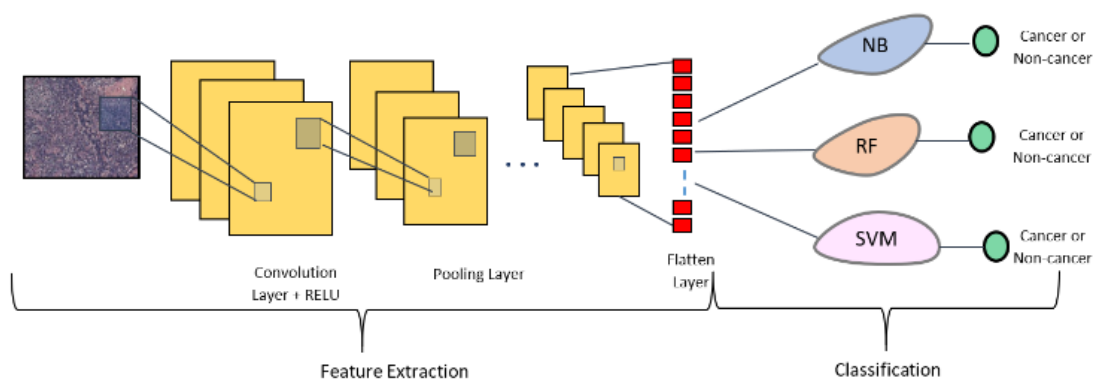


Figure 6. Classification of data extracted with CNN models with ML algorithms

2.6.3. Approach3: Transfer Learning

Transfer Learning (TL) is known as the ability of the system to transfer information learned from previous tasks to new tasks. It aims to reuse information from one or more sources for a new given task. Unlike traditional learning techniques, which start to learn things from scratch every time, it performs its learning by storing information (Ruder, 2016).

In this study, VGG16 and ResNet50 models, which are well-known classic deep learning models, were used for feature extraction through transfer learning. The VGG16 model is a model with 13 convolution layers, 5 maximum pooling layers and 3 full connection layers, resulting from improvements to the AlexNet model. It uses 11x11, 5x5, 3x3, and 1x1 filters in the convolution layers. The ResNet50 model, on the other hand, features a structure that feeds the values to the next layer. The first convolution layer consists of a 7x7 filter. After the 3x3 maximum pooling layer that follows, it has a structure known as learning now, consisting of 3 blocks and convolution layers with 1x1, 3x3, 1x1 filter, respectively. The convolution layers of the VGG16 and ResNet50 models with the specified structures were connected to the classification layer designed in the first approach. For the classification process, 2 fully connected layers and classifier layers with sigmoid function was used. This method used in the study is shown in Figure7.

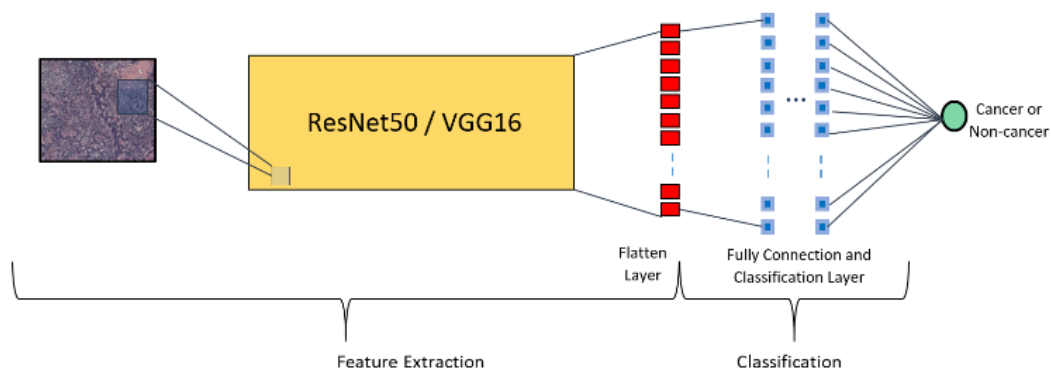


Figure 7. Combining the classification layer of CNN model created with the features obtained from VGG16 and ResNet50 models

3. Experimental Results

3 different approaches have been proposed to predict cancerous cells, and within each approach, models with different hyper-parameters have been developed. A series of extensive experiments were conducted to evaluate the performance of these models. This section is organized as follows:

- Description of our implementation details in all experiments conducted in this section.
- Each of the developed approaches was trained and tested with different hyperparameters.
- Performance analysis and comparison of the models included in the proposed approaches.
- Identifying the model that produces the best result.
- Performance analysis of the proposed model against recent studies done.

In this study, 3 different datasets containing labeled pathology images were used. Each dataset was randomly split, 70% for training, 15% for validation, and 15% for testing. The models trained sequentially with these datasets were compared using 2 different image scales in 32x32 and 48x48 sizes, 3 different optimization functions including Adam, SGD and RMSProp, and 3 different epochs as 25, 50, 100 values. In addition, the use of different classification algorithms within the approaches increased, the diversity in the experiments. In this way, when the determined hyper-parameters were applied to all the designed models, 324 different training-test processes were carried out. The results of the experiments carried out with 3 approaches and various hyper-parameters designed within the scope of the study are presented in the tables. Tables contain only the results of test data. These test results were evaluated using Accuracy, Precision, Recall, and F-score metrics. As seen in Table 2, training and testing processes were carried out with different hyper parameters using Dataset1. In experiments performed with this dataset, it was generally seen that more successful results were produced with the SGD function.

Table 2. Performance metrics of Approach1 and Approach2 on Dataset 1 containing 2352 data

Models	Hyper-parameters	Approach1		Approach2	
		NN (CNN)	RF	NB	SVM
FEM 1	Opt. Func.	SGD	SGD	Adam	SGD
	Image size	32x32	32x32	32x32	32x32
	Epoch	50	50	100	100
	Accuracy	0.817	0.690	0.790	0.815
	Precision	0.840	0.74	0.850	0.830
	Recall	0.820	0.690	0.790	0.820
	F-Score	0.810	0.670	0.780	0.810
FEM 2	Opt. Func.	SGD	SGD	SGD	SGD
	Image size	32x32	48X48	48X48	48X48
	Epoch	100	50	25	50
	Accuracy	0.818	0.656	0.741	0.803
	Precision	0.840	0.800	0.830	0.810
	Recall	0.820	0.660	0.740	0.800
	F-Score	0.820	0.610	0.720	0.800
FEM 3	Opt. Func.	SGD	Adam	SGD	SGD
	Image size	32x32	32x32	32x32	32x32
	Epoch	100	25	100	100
	Accuracy	0.812	0.630	0.781	0.821 [∇]
	Precision	0.840	0.73	0.850	0.850
	Recall	0.810	0.63	0.780	0.820
	F-Score	0.810	0.59	0.770	0.820
FEM 4	Opt. Func.	RMSProp	Adam	RMSProp	RMSProp
	Image size	48x48	32x32	48x48	48x48
	Epoch	25	100	25	25
	Accuracy	0.798	0.683	0.744	0.789
	Precision	0.860	0.780	0.830	0.850
	Recall	0.800	0.690	0.740	0.790
	F-Score	0.790	0.610	0.730	0.780

The symbol ([∇]) in the tables represents the highest accuracy value in each approach.

Training and testing processes were carried out with different hipperparameters using Dataset2, as shown in Table 3 and Dataset3, as shown in Table 4. Experiments conducted with both datasets generally produce more successful results with the Adam and RMSProp optimization function. The best results produced by the experiments carried out with the third approach are shown in Table 5. Models developed with this approach were trained and tested with all datasets, similar to the other approaches.

Table 3. Performance metrics of Approach1 and Approach2 on Dataset 2 containing 5646 data

Models	Approach1			Approach2	
	Hyper-parameters	NN (CNN)	RF	NB	SVM
FEM 1	Opt. Func.	RMSProp	RMSProp	Adam	Adam
	Image size	48x48	48x48	32x32	48x48
	Epoch	50	50	100	25
	Accuracy	0.827	0.690	0.820	0.838
	Precision	0.86	0.700	0.860	0.870
	Recall	0.83	0.650	0.820	0.840
	F-Score	0.82	0.670	0.820	0.830
FEM 2	Opt. Func.	Adam	Adam	Adam	SGD
	Image size	32x32	48X48	32x32	48X48
	Epoch	25	50	50	25
	Accuracy	0.810	0.626	0.741	0.794
	Precision	0.750	0.680	0.660	0.850
	Recall	0.940	0.630	0.740	0.790
	F-Score	0.830	0.600	0.790	0.790
FEM 3	Opt. Func.	Adam	SGD	Adam	SGD
	Image size	32x32	32x32	32x32	32x32
	Epoch	25	100	25	50
	Accuracy	0.780	0.652	0.730	0.810
	Precision	0.850	0.700	0.790	0.860
	Recall	0.780	0.650	0.730	0.810
	F-Score	0.770	0.630	0.710	0.800
FEM 4	Opt. Func.	RMSProp	Adam	RMSProp	RMSProp
	Image size	32x32	48x48	32x32	32x32
	Epoch	25	25	25	25
	Accuracy	0.843	0.780	0.828	0.849
	Precision	0.870	0.810	0.870	0.860
	Recall	0.840	0.780	0.830	0.850
	F-Score	0.840	0.780	0.820	0.850

Table 4. Performance metrics of Approach1 and Approach2 on Dataset 3 containing 12140 data

Models	Hyper-parameters	Approach1		Approach2	
		NN (CNN)	RF	NB	SVM
FEM 1	Opt. Func.	SGD	Adam	Adam	Adam
	Image size	48x48	32x32	32x32	32x32
	Epoch	50	50	25	25
	Accuracy	0.842	0.717	0.840	0.846
	Precision	0.870	0.720	0.870	0.870
	Recall	0.840	0.720	0.840	0.850
	F-Score	0.840	0.720	0.840	0.840
FEM 2	Opt. Func.	RMSProp	Adam	Adam	Adam
	Image size	48x48	32x32	32x32	32x32
	Epoch	25	25	25	25
	Accuracy	0.841	0.702	0.839	0.806
	Precision	0.860	0.640	0.770	0.850
	Recall	0.840	0.620	0.970	0.810
	F-Score	0.840	0.760	0.860	0.800
FEM 3	Opt. Func.	Adam	Adam	Adam	Adam
	Image size	32x32	32x32	32x32	32x32
	Epoch	50	50	50	50
	Accuracy	0.870 [∇]	0.747	0.851	0.859
	Precision	0.870	0.750	0.850	0.860
	Recall	0.870	0.750	0.850	0.860
	F-Score	0.870	0.750	0.850	0.860
FEM 4	Opt. Func.	Adam	RMSProp	RMSProp	RMSProp
	Image size	32x32	32x32	32x32	32x32
	Epoch	50	25	50	25
	Accuracy	0.854	0.834	0.829	0.845
	Precision	0.850	0.850	0.850	0.850
	Recall	0.850	0.830	0.830	0.800
	F-Score	0.850	0.830	0.830	0.790

Table 5. Performance metrics of Approach3 on all Dataset

Models	Hyper-parameters	Approach3		
		2352	5646	12140
ResNET50	Opt. Func.	Adam	Adam	SGD
	Image size	48x48	32x32	32x32
	Epoch	100	25	100
	Accuracy	0.786	0.794	0.819↗
	Precision	0.830	0.830	0.860
	Recall	0.790	0.790	0.820
	F-Score	0.77	0.790	0.810
VGG16	Opt. Func.	RMSProp	RMSProp	SGD
	Image size	48x48	48x48	32x32
	Epoch	100	100	25
	Accuracy	0.815↗	0.812↗	0.791
	Precision	0.840	0.830	0.840
	Recall	0.820	0.810	0.790
	F-Score	0.810	0.810	0.780

When the experimental results obtained are examined:

- The experimental results obtained in the third approach were lower compared to those in the first and second approaches. In contrast, there were common inferences.
- Considering all approaches, the best result was obtained with the dataset containing 12.140 pieces.
- In addition, it was seen that the decrease in image sizes did not adversely affect the test results. This situation, cost and time savings were ensured.
- Clear information could not be obtained with the optimization function and the number of epochs. However, when looking at the overall success, it can be stated that the Adam and RMSProp functions are more in the tables, so that good results can be produced with these optimization functions.

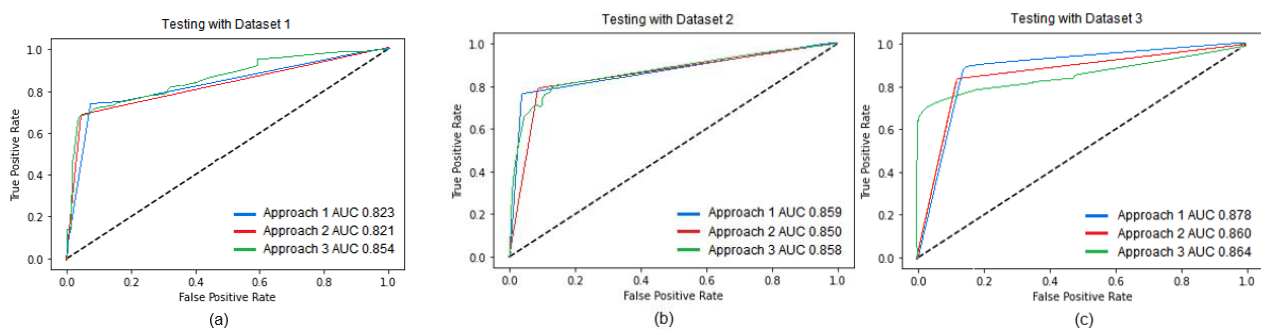
The best results produced by these 3 approaches were also evaluated in terms of other calculated metrics. Accordingly, it was determined that the Precision metric was around 85% for the best results in all 3 approaches. This value shows that models successfully perform accurate positive classifications. In other words, it demonstrates how reliable the data classified as cancerous cells is. When the Recall metric was examined, it was observed that the result produced in the first table was lower than the others. Although these results, which should not be underestimated, they indicate how many of the positive classes the model is able to capture accurately. While this situation is similar to the Precision metric, the Recall metric does not calculate whether negative samples are classified as positive incorrectly. When ensuring that an image is classified as positive, the results obtained from the Precision metric must be considered. The harmonic mean of these two metrics is obtained with the F-score metric. For the best Precision and Recall, the F-score metric is expected to converge to 1. It is seen that the values obtained in this study are very close to 1. The cost and running time of the models are as important as their performance. When looking at the vector lengths, which are one of the most important factors affecting these values, it is seen that the vector lengths produced by 4 different CNN / FEM (vector lengths are equal because of the same feature extraction) models vary by the image scale. This affects the different vector lengths in the convolution and image scale layers, as shown in Table 6. The vector length decreases as the image scale decreases and the number of layers increases. The reduction in vector length reduces model running time and saves time.

Table 6. Vector length in flattening layer of models in different convolution layers

Models	Conv. Layers	Image Scale	Vector lengths
1	3	32x32	1x50176
		48x48	1x123904
2	6	32x32	1x73728
		48x48	1x204800
3	9	32x32	1x1024
		48x48	1x4096
4	10	32x32	1x64
		48x48	1x576

Finally, these models were also evaluated in terms of AUC metrics. The ROC curve and AUC value of each approach that produces the best values for the 3 datasets are shown in Figure 8. Although the produced values were close to each other, the test results performed with the Dataset3, which contained synthetic and original data, were more successful. In general, it was observed that data augmentation in deep learning models positively affected the results of the model. As a result of the experiments, it was observed that the test performed with Dataset3 and Approach1 produced the most successful results. It was seen that with this model, cancerous cells were detected better than others. It was also understood through the result produced by the AUC metric that cancerous and non-cancerous cells were successfully separated from each other.

In the study, three different approaches were trained and tested with various hyper-parameters. The best result was obtained with the Approach1 trained with Dataset3. It was observed that the 32x32 scaled data used in this experiment and the Adam optimization function positively affected the results. Looking at the approaches in general, it was observed that data augmentation positively affected the performance and Approach1 performed better than other approaches. In addition, it was observed that the increase in the convolution layer in Approach1 decreased the vector size and thus saved the training time.

**Figure 8.** ROC curve and AUC value all approach. (a) for Dataset 1. (b) for Dataset 2. (c) for Dataset3

The results obtained from this study were compared with similar studies in the literature (Table 7). The dataset used in the study was previously developed by Duggal *et al.* (2017) using 2 different CNN models and they found that the stain layer they developed was close to the results obtained in this study. Oliveira and Dantas (2021) successfully predicted cancerous cells by improving the VGG16/VGG19 model with the same data set. However, in both studies, the quality of the images is quite high, which is far from reality. In our study, however, the image quality was deliberately reduced and the training-test success of a data in this situation was observed in different models.

Similarly, Perlberg and Kramer (2019) aimed to predict ALL cancer types with different datasets, and for this, they performed an effective classification using the Squeeze-and-Excitation module and the ResNeXt convolutional neural network. Although this module was not used in our study, an F1-score of 87.0% was obtained. This result is very close to the work of Perlberg and Kramer, although no extra optimization was used. When looking at other studies focusing on the same disease but using different datasets, it was seen that in Selçuk and Özen (2015), an accuracy rate of 93.91% was reached as a result of the training and testing process done with the SVM algorithm. Sipes *et al.* (2018) showed that by comparing the performance of different algorithms, as in this study, the most successful result was obtained with the CNN model. In Kumar *et al.* (2018), the performance of K-NN and NB models were compared and the K-NN algorithm was found to be more successful. In Bhuiyan *et al.* (2019), RF, SVM, LR, and DT models were compared and it was found that SVM algorithm was more successful. Additionally, in another study by Banik *et al.* (2019), it was shown that augmented data yielded successful results, as in this study.

Table 7. Classification of pathology data to the leukemia cancer

Studies	Work	ML Model	Success Rate (Accuracy)
Selcuk & Ozen	Classification of ALL cells	SVM	%93,91
Sipes & Li	Classification of ALL cancer and comparison of performance	KNN	%81(±5)
		NN	%85(±3)
		CNN	%92(±3)
Kumar <i>et al.</i>	Categorization of ALL data extracted by image segmentation with K-NN and NB	KNN NB	%92,8 %78-79
Bhuiyan <i>et al.</i>	Classification performance comparison of ALL blood cells with RF, SVM, LR and DT algorithms	RF	%98
		SVM	%99,05
		LR	%97,18
		DT	%98,18
Duggal <i>et al.</i>	Increasing the dataset of ALL cell and adding SD layer that determines the pixel density of AlexNet and T-CNN models and comparing the success rate	AlexNet	%87,9
		T-CNN	%92,4
		AlexNet+SD	%88
		T-CNN+SD (SVD)	%95,5
Zhao <i>et al.</i>	Automatic recognition system for automatic detection and classification of WBCs	CNN	-
Jiang <i>et al.</i>	Classification of CLL, FL and MCL lymph types	SVM	%97,96
Banik <i>et al.</i>	Classification of 4 different white blood cells with 8-layer CNN model	CNN	Neutrophil 90,55 Eosinophil 96,12 Monocyte 95,33 Lymphocyte 99,8
Perlberg & Kramer	ResNeXt to differentiate ALL-type cancerous cells from non-cancerous cells and used the Squeeze-and-Excitation module with same dataset	ResNeXt	-
Oliveira & Dantas	Classified cancerous and non-cancerous cells using the VGG16/VGG19 model with same dataset	VGG16	%92,48
		VGG19	%91,59
Varol Malkocoglu & İseri	Classification and performance comparison of ALL cells using 3 approaches and different parameters	Approach1 (CNN-3)	Accuracy %87,0 and AUC: %87,8 (with Dataset3)

The contributions of this study to the literature are as follows:

- The performance of models with different hyper-parameters on low-quality data was analyzed.
- The classification of cancerous cells by the proposed Approach2 has not been previously observed in the literature. The performance of this approach was examined and compared with others, and it was observed that it could produce remarkable results for classification processes in health and similar fields.
- The effect of data sets of different sizes on the models was examined. Accordingly, the data set with synthetic and original data produced more successful results than the others.
- It has been observed that our model performs well even on low-quality datasets. In low-quality datasets, the image scale is small, thus reducing the vector length. The reduction in vector length reduces model run time and saves time.
- Comparing with other studies were made, similarities differences are discussed.

4. Conclusion

In this study, applied research was conducted on the classification of digital pathology images related to ALL disease with deep learning, machine learning, and transfer learning approaches. Experimental studies were carried out on the Google Colab platform using a digital pathology images that contain patient information. These studies were performed on a dataset consisting of 10,661 previously labeled ALL images. After making the selected dataset more balanced compared to the lesser class (3389 non-cancerous), a new dataset containing 12.140 data was created by applying rotation to the images. In addition to this dataset, two more clusters consisting of 2352 and 5646 data were created with only the original data. 70% of each dataset was devoted to training, 15% to validation, and 15% to testing. On the created datasets, two different image scales with 32x32 and 48x48 dimensions were resized. Batch size value was determined as 32 and iteration values were determined as 25, 50, and 100. In addition, 4 different models were obtained by gradually increasing the number of layers. These models had 3, 6, 9, and 10 convolution layers, respectively. The ReLU activation function was used in hidden and fully connected layers, while the Sigmoid activation function was used in the output layer. The two fully connected layers used in the model consisted of 256 and 128 neurons, respectively.

When the results obtained with these developed approaches were examined, it was determined that using the dataset consisting of both synthetic and real data affected the success of the model positively. It was observed that the increase in convolution layers used for feature extraction and the Adam or RMSProp optimization functions used during the training of models positively affected the success of the model. The results produced by both the first approach and the second approach were quite close to each other and significant. However, when looking at the third approach in which the transfer learning method was used, it was found that the performance values were lower than the other two approaches.

When we look at similar studies in the literature, it is seen that different models and datasets are used. Although the models in this study were trained with low resolution pathology images, the model results were found to perform as well as the existing studies. This shows that similar performance can be achieved by designing more compact models. In this way, successful systems can be designed to save costs and profit from speed.

Consequently, when the performance values of the artificial intelligence approaches are taken into consideration, it can be said that, in terms of digital pathology, artificial intelligence-based methods can be used at the pathology departments of hospitals especially in the diagnosis phase. The use of a system to assist pathologists during cancer diagnosis is crucial in terms of time, diagnostic accuracy and workload. With this model, human error can be reduced and time can be saved, reducing the workload of pathologists. Additionally, this study measured the effect of changes in hyperparameters on the performance of the model. It is believed that the results of this evaluation will guide researchers in their hyperparameter choices. In the future, by using the holistic form of pathology data, regions of interest (RoI) will be detected and classified with our best approach.

Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.

References

- Anonymous. (2023, Nov. 10). Diagram showing the cell that ALL starts [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Acute_lymphoblastic_leukemia
- Banik, P. P., Saha, R. and Kim, K. D., 2019. Fused Convolutional Neural Network for White Blood Cell Image Classification, In 2019 International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication (ICAIIIC), pp. 238-240 , Okinawa, Japan.
- Bhuiyan, M. N. Q., Rahut, S. K., Tanvir, R. A. and Ripon, S., 2019. Automatic Acute Lymphoblastic Leukemia Detection and Comparative Analysis from Images In 2019 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), pp. 1144-1149, Paris, France, 2019.
- Clark, K. , Vendt, B. , Smith, K., Freymann, J., Kirby, J., Koppel, P., Moore, S., Phillips, S., Maffitt, D., Pringle, M., Tarbox, L. and Prior, F., 2013. The Cancer Imaging Archive (TCIA): Maintaining and Operating a Public Information Repository. *Journal of Digital Imaging*, vol. 26, no. 6, pp. 1045-1057.
- Duggal, R., Gupta, A. & Gupta, R., 2016b. Segmentation of overlapping/touching white blood cell nuclei using artificial neural networks, *CME Series on Hemato - Oncopathology*, All India Institute of Medical Sciences (AIIMS), New Delhi, India.
- Duggal, R., Gupta, A., Gupta, R. and Mallick, P., 2017. SD-layer: stain deconvolutional layer for CNNs in medical microscopic imaging, In *International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*, pp. 435-443, QC, Canada.

- Duggal, R., Gupta, A., Gupta, R., Wadhwa, M. & Ahuja, C., 2016a. Overlapping cell nuclei segmentation in microscopic images using deep belief networks, In Proceedings of the Tenth Indian Conference on Computer Vision, Graphics and Image Processing, Guwahati, India.
- Global Cancer Observation. (2024, Jan. 29). International Agency for Research on Cancer [Online]. Available: https://gco.iarc.fr/today/en/dataviz/pie?mode=cancer&group_populations=1&age_end=2
- Heffner, S., Colgan, O. and Doolan, C. Digital Patology, [Online]. Available: <https://www.leicabiosystems.com/pathologyleaders/digital-pathology/>, Accessed on: April 5, 2021
- Hu, J., Shen, L. & Sun, G., 2018. Squeeze-and-excitation networks. In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, pp. 7132-7141.
- Inaba, H., Greaves M. & Mullighan, C. G., 2013. Acute lymphoblastic leukaemia. The Lancet, vol. 381, no. 9881, pp. 1943-1955.
- Jiang, H., Li, Z., Li, S. and Zhou, F., 2018. An Effective Multi-Classification Method for NHL Pathological Images, In 2018 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), pp. 763-768, Miyazaki, Japan.
- Karlik, B., and Olgac, A. V., 2011. Performance analysis of various activation functions in generalized MLP architectures of neural networks. International Journal of Artificial Intelligence and Expert Systems, 1(4), 111-122.
- Kingma, D. P. and Ba, J., 2014. Adam: A method for stochastic optimization. arXiv preprint arXiv:1412.6980
- Kumar, S., Mishra, S. & Asthana, P., 2018. Advances in Computer and Computational Sciences (second edition), Springer, Singapore, pp. 655-670.
- Madabhushi, A. (2009) Digital pathology image analysis: opportunities and challenges. Imaging in medicine, vol. 1, no.1, pp. 7-10.
- Mourya S., Kant S., Kumar P., Gupta A., Gupta R. (2023, May. 5). ALL Challenge dataset of ISBI 2019 [Data set]. The Cancer Imaging Archive. [Online]. Available: <https://www.cancerimagingarchive.net/collection/c-nmc-2019/>
- Oliveira, J. E. M. & Dantas, D. O., 2021. Classification of Normal versus Leukemic Cells with Data Augmentation and Convolutional Neural Networks. In VISIGRAPP (4: VISAPP), pp. 685-692.
- PDQ® Pediatric Treatment Editorial Board PDQ Childhood Acute Lymphoblastic Leukemia Treatment. Bethesda, MD: National Cancer Institute, [Online]. Available: <https://www.cancer.gov/types/leukemia/patient/child-all-treatment-pdq>, Accessed on: April. 10, 2021
- Prellberg, J. & Kramer, O., 2019. Acute lymphoblastic leukemia classification from microscopic images using convolutional neural networks. In ISBI 2019 C-NMC Challenge: Classification in Cancer Cell Imaging, pp. 53-61, Springer, Singapore.
- Selçuk, O. and Özen, F., 2015. Acute lymphoblastic leukemia diagnosis using image processing techniques. In 2015 23rd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), pp. 803-806, Malatya, Turkey.
- Si, J., Harris, S. L. & Yfantis, E., 2018. A Dynamic ReLU on Neural Network. In 2018 IEEE 13th Dallas Circuits and Systems Conference (DCAS), pp. 1-6, IEEE.
- Sibi, P., Jones, S. A. and Siddarth, P., 2013. Analysis of different activation functions using back propagation neural networks. Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 47(3), 1264-1268.
- Sipes, R. and Li, D., 2018. Using Convolutional Neural Networks for Automated Fine-Grained Image Classification of Acute Lymphoblastic Leukemia. In 2018 3rd International Conference on Computational Intelligence and Applications (ICCIA), pp. 157-161, Hong Kong, China.
- Sipes, R. and Li, D., 2018. Using Convolutional Neural Networks for Automated Fine-Grained Image Classification of Acute Lymphoblastic Leukemia, In 2018 3rd International Conference on Computational Intelligence and Applications (ICCIA), pp. 157-161, Hong Kong, China.
- Stursa D. and Dolezel, P., 2019. Comparison of ReLU and linear saturated activation functions in neural network for universal approximation. In 2019 22nd International Conference on Process Control (PC19), pp. 146-151, IEEE.
- Uzunhan, T. A. and Karakaş, Z., 2012. Çocukluk Çağı Akut Lenfoblastik Lösemisi. Çocuk Dergisi, vol. 12, no. 1, pp. 6-15.
- Yazan, E. and Talu, M. F., 2017. Comparison of the stochastic gradient descent-based optimization techniques. In 2017 International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP). 1-5. IEEE.
- Yöntem, A. & Bayram, İ., 2018. Çocukluk Çağında Akut Lenfoblastik Lösemi. Arşiv Kaynak Tarama Dergisi, vol. 27, no. 4, pp. 483-499.
- Zhao, J., Zhang, M., Zhou, Z., Chu, J. and Cao, F. (2017) Automatic Detection and Classification of Leukocytes Using Convolutional Neural Networks, Medical & Biological Engineering & Computing, vol. 55, no. 8, pp. 1287-1301



CLASSIFICATION OF X-RAY AND CT IMAGES IN DIFFERENT COLOR SPACES USING ROBUST CNN

Nesrin AYDIN ATASOY^{1*}, İrem KURA²

¹Karabük University, Faculty of Engineering, Department of Computer Engineering, Karabük, Türkiye

²Karabük University, The Institute of Graduate Studies, Karabük, Türkiye

Keywords

*Convolutional
Neural Network,
Covid-19 Detection,
CT and X-ray Chest Image,
Pneumonia.*

Abstract

Since deep learning models have been successfully used in many fields, they have been used to identify sick and healthy people in X-ray or Computed Tomography (CT) chest radiology images. In this study, Covid-19 and pneumonia classification is performed on both X-ray and CT images using the robust Convolutional Neural Network (CNN). BGR, HSV, and CIE LAB color space transformations are applied to X-ray and CT images to show that the model performs a successful classification independent of dataset characteristics. The binary classification accuracy rates of Covid-19 and pneumonia for X-ray images and CT images are 98.7% and 98.4%, 97.6% and 99.4%, respectively. Precision, Recall, Specificity, F1 score, and Mean Squared Error metrics are calculated for each X-ray and CT dataset. In addition, 5-fold cross-validation proved accuracy of the model. Although X-ray and CT chest radiology images are transformed into different color spaces, the proposed model performed a successful classification. Thus, even if the image characteristics of the radiology device brands change, the computer-based system will be able to make successful disease diagnoses at low cost where expert personnel are insufficient.

FARKLI RENK UZAYLARINDAKİ X-RAY VE BT GÖRÜNTÜLERİNİN GÜÇLÜ ESA İLE SINIFLANDIRILMASI

Anahtar Kelimeler

*Evrışimli Sinir Ağı,
Covid-19 Tespiti,
BT and Röntgen
Göğüs Görüntüsü,
Zatürre.*

Öz

Derin öğrenme modelleri birçok alanda başarıyla kullanıldığından beri, X-ray veya Bilgisayarlı Tomografi göğüs radyolojisi görüntülerinde hasta ve sağlıklı kişileri tanılamak için kullanılmaktadır. Bu çalışmada, güçlü Evrışimsel Sinir Ağı (ESA) kullanılarak hem X-ray hem de BT görüntüleri üzerinde Covid-19 ve zatürre hastalığı sınıflandırması gerçekleştirilmektedir. BGR, HSV ve CIE LAB renk uzayı dönüşümleri; modelin veri kümesi özelliklerinden bağımsız olarak başarılı bir sınıflandırma gerçekleştirdiğini göstermek için X-ray ve BT görüntülerine uygulanmıştır. Röntgen ve BT görüntülerinin için Covid-19 ve zatürre olmak üzere ikili sınıflandırma doğruluk oranları sırasıyla %98,7 ve %98,4, %97,6 ve %99,4'tür. Her X-ray ve BT veri seti için Kesinlik, Geri Çağırma, Özgüllük, F1 puanı ve Ortalama Karesel Hata metrikleri hesaplanmıştır. Ayrıca, 5 kat çapraz doğrulama modelin doğruluğunu kanıtlamıştır. X-ray ve BT göğüs radyolojisi görüntüleri farklı renk uzaylarına dönüştürülmesine rağmen, önerilen model başarılı bir sınıflandırma gerçekleştirmiştir. Böylece radyoloji cihazı markalarının görüntü özellikleri değişse bile bilgisayar tabanlı sistem, uzman personelin yetersiz olduğu yerlerde düşük maliyetle başarılı hastalık teşhisleri yapabilecektir.

Alıntı / Cite

Aydın Atasoy, N., Kura, İ., (2024). Classification of X-ray and CT Images in Different Color Spaces Using Robust CNN, *Journal of Engineering Sciences and Design*, 12(3), 505-516.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

N. Aydın Atasoy, 0000-0002-7188-0020
İ. Kura, 0000-0002-3899-1167

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	08.01.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date	05.05.2024
Kabul Tarihi / Accepted Date	29.07.2024
Yayın Tarihi / Published Date	26.09.2024

* İlgili yazar/Corresponding author: nesrinaydin@karabuk.edu.tr, 0538-414-2745

CLASSIFICATION OF X-RAY AND CT IMAGES IN DIFFERENT COLOR SPACES USING ROBUST CNN

Nesrin AYDIN ATASOY^{1†}, İrem KURA²

Karabük University, Faculty of Engineering, Department of Computer Engineering, Karabük, Türkiye
Karabük University, The Institute of Graduate Studies, Karabük, Türkiye

Highlights

- The robust CNN model classifies both X-ray and CT chest radiology images in different color spaces as Covid-19 or pneumonia disease.
- It can be used as an auxiliary expert system for diagnosis in regions where the number of patients is high, and the number of physicians is low.
- This model is suitable for different medical imaging devices in any hospital.

Graphical Abstract

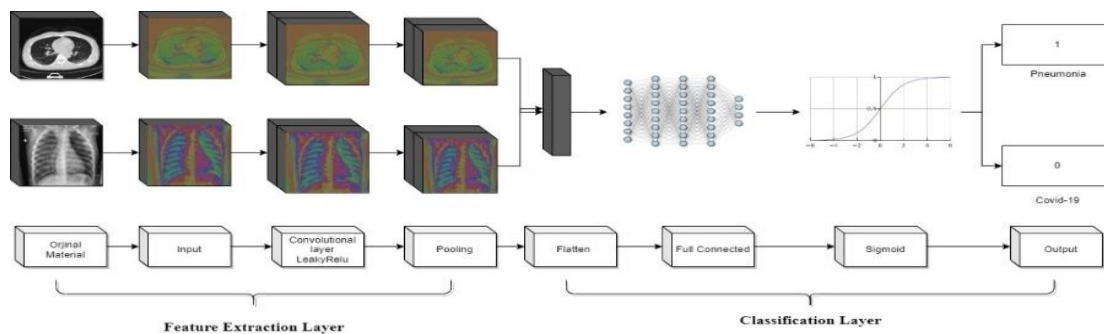


Figure. Architecture design of the proposed model.

Purpose and Scope

The motivation of this study is the rapid diagnosis of chest diseases with X-ray and CT images, the differences in features between X-ray and CT images, and different brands of imaging devices produce images with different image properties.

Design/methodology/approach

In this study, we aim to accurately classify four separate chest radiology image datasets created with different imaging techniques and color spaces with a single deep learning model CNN which has shown successful results in image-based applications. The success of this robust model is demonstrated by classifying both X-ray and CT chest radiology images as Covid-19 and pneumonia disease with a high success rate in BGR, HSV, and CIE LAB color spaces.

Findings

A low-cost computer-aided expert system is proposed according to the cost of RT-PCR testing. X-ray and CT image features can vary depending on the device model. In this study, original images, device-dependent BGR and HSV color space and device-independent CIE LAB color space transformations are performed, and it is shown that a model can perform successful classification using CNN even if the device feature and color space change.

Originality

The robust model with well-chosen learning rate, batch size, and epoch number produces better results than a combined model. Moreover, the model proposed in this study outperforms other works in the literature as it can achieve good results for both X-ray and CT images in different color spaces. The success of the study motivates the following study. It is aimed to realize a mobile application with a CNN-based transfer learning algorithm. Thus, a user-friendly system will be created with successful classification.

[†] Corresponding author: nesrinaydin@karabuk.edu.tr, 0538-414-2745

1. Introduction

Covid-19 virus emerged in 2019 as a new strain of severe acute respiratory syndrome (SARS). The highly contagious Covid-19 virus has spread rapidly among humans, causing many deaths (COVID Live, 2023). Diagnosis of the Covid-19 virus is often confused with pneumonia because of symptoms such as chest pain, shortness of breath, cough, and inflammation of the lung lobes (Toğaçar et al., 2009). Although medical images are used in the diagnosis of Covid-19 virus, the Reverse Transcriptase-Polymerase Chain Reaction (RT-PCR) test is accepted as the first (Yan et al., 2020). Reasons such as the lack of a high success rate of the RT-PCR test method, the time required for the test result, the supply of test kits, and the inability to evaluate the test kits in every hospital have led researchers to different diagnosis studies. Scientists propose various deep learning models to support doctors in the diagnosis and treatment of Covid-19 and pneumonia (Bozkurt, F. 2022; Mishra et al., 2020; Islam et al., 2020; Serener and Serte, 2020; Foyosal et al., 2020; Polsinelli et al., 2020; Nayak et al., 2021). As seen in these studies, imaging techniques such as X-ray and Computer Tomography (CT), which are currently used in hospitals, have a complementary role in the diagnosis of lung diseases. X-ray imaging uses tiny doses of ionizing radiation to create a black-and-white image. CT is an imaging method that uses special x-ray beams to create detailed pictures or scans of areas inside the body. It scans the relevant parts of the body in more detail than the X-ray imaging technique, creating a detailed and layered picture.

In this study, we aim to accurately classify four separate chest radiology image datasets created with different imaging techniques and color spaces with a single deep learning model Convolutional Neural Network (CNN) which has shown successful results in image-based applications (Taşdelen and Sen, 2021; Somuncu and Aydın Atasoy, 2021; Banerjee et al., 2022; Gilanie et al., 2021). The success of this robust model is demonstrated by classifying both X-ray and CT chest radiology images as Covid-19 and pneumonia disease with a high success rate in BGR, HSV, and CIE LAB color spaces. Thus, a low-cost expert system is proposed with a robust model independent of dataset differences, which saves the time needed to finalize the RT-PCR test for patients, reduces the cost spent on testing, and is independent of dataset differences. The contributions of this paper are as follows:

- With the proposed approach, a powerful model suitable for different medical imaging devices in hospitals is proposed.
- It can be used as an auxiliary expert system for diagnosis in areas with many patients and few doctors, as it successfully classifies Covid-19 and pneumonia disease using CNN despite different image features.
- Unlike similar works using the strengths of CNN architecture, classification is performed with a single network architecture on both X-ray and CT chest radiology images in different color spaces.

The following parts of the study are as follows: In Chapter 2, current literature studies on Covid-19 and pneumonia disease are examined. In Chapter 3, information about dataset properties, color spaces, and the CNN is given. In Chapter 4, the evaluation of the proposed model on the dataset and the success criteria of the model are examined. In Chapter 5, the results of the study are compared with other studies and future works are discussed.

2. Related Works

Deep learning algorithms are used in many fields, such as face recognition systems, the health sector (Kaya et al., 2019; Oğuz and Yağanoğlu, 2021; Aydın Atasoy, N., Faris Abdulla Al Rahhawi, A., 2024), voice recognition studies (Atasoy and Eltanashi, 2020), autonomous systems, image processing (Yıldız, 2019), prediction applications (Elhagaggagi, 2021), natural language processing, text, and character recognition studies (Somuncu and Aydın Atasoy, 2021), defense and security, object recognition, classification (Metin and Karasulu, 2021) and they produce successful results.

Polsinelli et al. (Polsinelli et al., 2020) propose a modified SqueezeNet model for detecting Covid-19 disease using a dataset (Yang et al., 2023) and Italian (COVID-19 DATABASE, 2023). They performed a study with Matlab Tools with nearly 2000 images in two different datasets. The modified model outperforms the plain SqueezeNet as it creates features better in the training phase. Hyperparameters are determined using a Bayesian approach. With the CNN-based modified model, an accuracy of 85.03% is achieved, and the classification time is sufficiently low. This study shows that CNN can analyze images even with limited hardware resources.

Nayak et al. (Nayak et al., 2021) propose a deep learning-based approach using X-ray chest images for early diagnosis of Covid-19 disease. They varied the parameters of batch size, learning rate, number of epochs, and type of optimizers to find the best model among AlexNet, VGG-16, GoogleNet, MobileNet-V2, SqueezeNet, ResNet-34, ResNet-50 and Inception-V3 deep learning models based on CNN architecture. Thus, they aim to realize an automatic system that classifies as Covid-19 or healthy. 286 images were used for training, and 120 images were used for testing. Among these models, ResNet-34 showed the best performance with a 98.33% accuracy rate.

However, according to the classification success of deep learning models, the dataset of this study needs to be bigger. Therefore, the success rates of the selected models are very close to each other.

Karim et al. (Karim et al., 2022) propose a computer-aided diagnosis system for Covid-19 disease detection. They combine CNN with Ant Lion Optimization Algorithm and Softmax, Support Vector Machines, K-Nearest Neighbours and Decision Tree, and Multiclass Naïve Bayes Classifier to classify lung X-ray images as sick and healthy. The study aims to determine the best classification algorithm compatible with CNN. They have used well-known datasets (COVID-19 Radiography Database, 2023; Cohen et al. 2020) for evaluating the performance of the proposed model. They have used AlexNet for data resize and feature extraction, Ant Lion Optimization Algorithm for feature selection, and Bayes Naïve classifier, which is the best model for classification. The accuracy, precision, and F1-score of the proposed model are respectively 98.31%, 100%, and 98.25%. Thus, they achieved very good classification performance. Similarly, Oğuz and Yağanoğlu (Oğuz Ç., Yağanoğlu M., 2022) propose a decision support system for Covid-19 disease diagnosis with Support Vector Machine (SVM), k Nearest Neighbor (kNN), Random Forest (RF), Decision Trees (DT), Naive Bayes (NB) classification methods after extracting features from 1345 CT images with different models such as ResNet-50, ResNet-101, AlexNet, Vgg-16, Vgg-19, GoogLeNet, SqueezeNet, Xception. While this system shortens the decision-making time of doctors, the best diagnosis model can be determined according to the success performances of different network models. Thus, unnecessary tests are prevented, and diagnosis is accelerated.

Thakur and Kumar (Thakur and Kumar, 2021) performed binary classification (BC) and multi-classification (MC) with different CNN models using X-ray and CT images. They classified Covid-19 and healthy for BC and Covid-19, healthy and pneumonia for multi classification. BC accuracy rate was 99,64%, and multi-classification accuracy rate was 98.28%. For both models, they used Stochastic Gradient Descent (SGD) as the optimizer method and a fixed learning rate of 0.02. The authors stated that they converted the original input dataset to the grayscale image in the first pre-processing step. However, X-ray and CT images are grayscale according to the way they are generated (CT scan, 2023; X-Ray, 2023). The original dataset characteristics and the reason for this conversion are not specified in the study. Another study that cares about feature selection, Rahimzadeh et al. (Rahimzadeh et al., 2021) propose a computer-based diagnostic system to detect Covid-19 disease from CT images. They used 15589 Covid-19 images and 48260 healthy images of 282 healthy persons and 95 Covid-19 patients. To reduce the time and false detection process, they first detected the infected regions in CT images using the Grad-Cam algorithm. They performed BC for Covid-19 disease detection with ResNet50V2, Xception, and their proposed model. Their proposed model performed the best classification with a 98.49% accuracy rate. The study yields successful results Grad-Cam is a technique used in deep learning, especially with CNN, to understand which regions of an input image are important for the network's prediction of a particular class.

Unlike studies that emphasize feature extraction such as SGD and Grad-Cam algorithm, Islam et al. (Islam et al., 2020) preferred a model that can learn long-term dependencies within the network propose a model for detecting Covid-19 disease by combining CNN and Long Short-Term Memory (LSTM) models using X-ray images. They used 1525 X-ray datasets balanced as Covid-19, healthy, and pneumonia. In this study, CNN is used for deep feature extraction, and LSTM is used for classification using the extracted feature. The proposed model classifies lung X-ray images as Covid-19, pneumonia, and healthy. Accuracy, AUC, specificity, sensitivity, and F1-Score values of the proposed model are 99.4%, 99.9%, 99.2%, 99.3%, and 98.9%, respectively. In this study, it is seen that the success of LSTM and CNN has increased compared to studies that attach importance to feature extraction.

Serener et al. (Serener and Serte, 2020) aim to reduce the diagnostic difficulty of Covid-19, mycoplasma pneumonia and typical viral pneumonia diseases. They performed BC with seven different architectures: ResNet-50, ResNet-18, MobileNet-V2, VGG, SqueezeNet, AlexNet, and DenseNet-121. ResNet-18 and MobileNet-v2 showed the best performance results. The dataset consists of 325 original and 1005 enhanced 224x224 CT chest images. The classification success of these deep learning models is 89% for Mycoplasma Pneumonia and Covid-19 detection and 76% for Mycoplasma Pneumonia and Typical Viral Pneumonia detection. The study needed to achieve more success compared to other studies in the literature. Increasing the dataset too much and inadequate model training significantly affect the success of the model. Unlike Serener et al. (Serener and Serte, 2020), Bozkurt (Bozkurt, 2021) obtained high accuracy as 97.17% using DenseNet121 model. This is because he implemented the DenseNet121 model architecture with the regularization effect of dense connectivity, considering its ability to reduce overlearning in training on not very large data.

As seen in the literature, many studies based on CNN have been successfully performed with small and large datasets using X-ray and CT chest images, and the success of the classification models is increased by combining several models. In this study, both X-ray and CT chest radiology images in different color spaces are classified as Covid-19 or pneumonia using single CNN architecture.

3. Material and Method

In this study, Covid-19 and pneumonia disease classification is performed with X-ray and CT chest radiology images indifferent color spaces using four different datasets. The procedures performed for a successful classification are shown in Figure 1, which shows the application steps for the successful classification of different chest radiology datasets from various imaging devices.

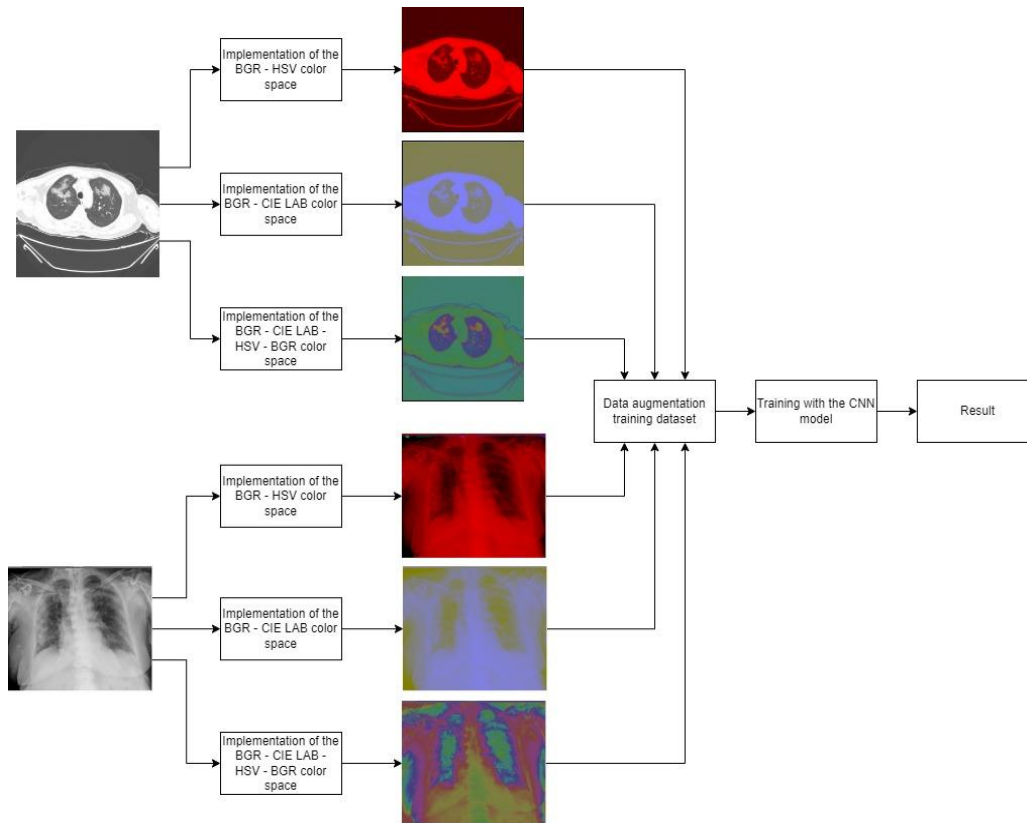


Figure 1. General scheme of the study

3.1. Dataset

This study is carried out with four different chest radiology datasets containing X-ray and CT images, as shown in Table 1. Due to the different image sizes in the datasets, all grayscale images are resized to 150 x 150 as the first pre-processing step. In Figure 2, sample images from the dataset are created by applying reflection, rotation, and scaling data augmentation operations.

Table 1. Dataset attributes

Dataset name	Covid-19 image count	Pneumonia image count	Original image dimensions
X-Ray1 (Chest X-ray, 2022)	576	4273	1982 x 1482, 2000 x 2000, 2563 x 1148, 951 x 727, 907 x 689
X-Ray2 (Pneumonia & COVID-19 Image Dataset, 2022)	980	4239	256 x 256, 331 x 331, 1980 x 2004, 1024 x 1024, 416 x 341
CT1 (COVID-19&Normal&Pneumonia_CT_Images, 2022)	2035	3390	512 x 512
CT2 (Yan, 2020; Yan, 2020)	41841	2700	512 x 512, 380 x 380

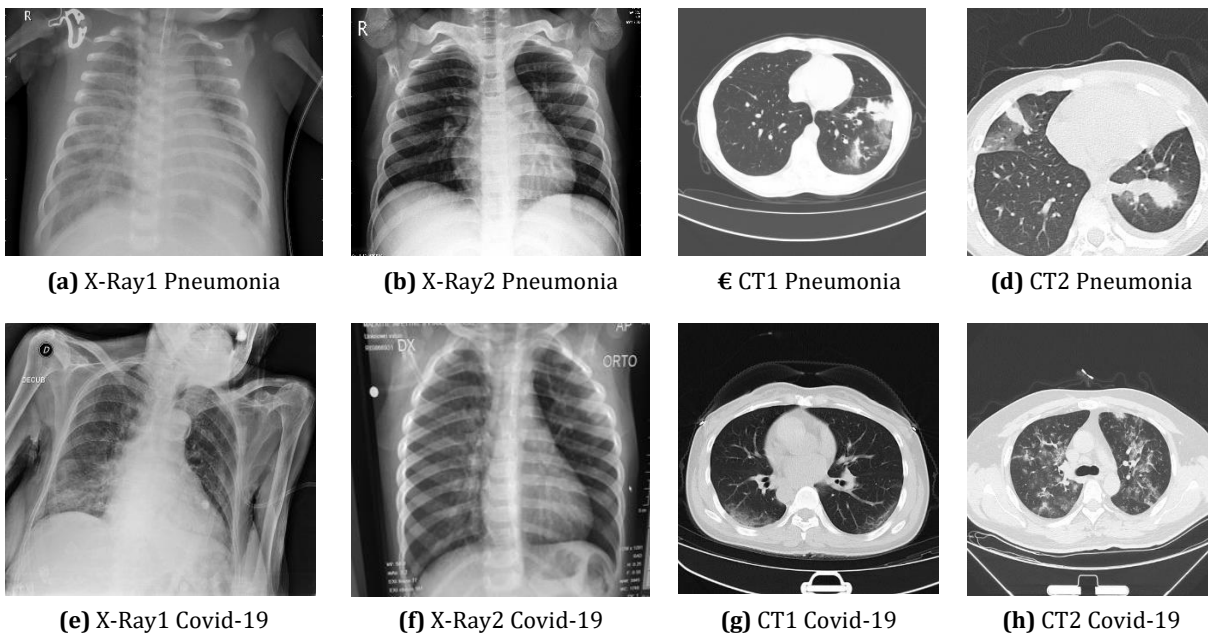


Figure 2. Original chest radiology images from each dataset

X-ray images are created by coloring them according to the retention of X-rays by tissue as they pass through air and gas, soft tissue, adipose tissue, and bone in the body. In air-containing formations such as the lung, the lung tissue appears black due to the low intensity of the beam, while bone and soft tissues of the same thickness appear whiter. In CT images, tissues are colored white, black, and gray according to the Hounsfield scale. Grayscale is the intensity information of each pixel value representing some amount of light. Therefore, the input data are grayscale images. Although X-ray and CT images are widely used in the diagnosis of chest diseases, the level of lesion detection in X-ray images is lower than in CT images (Gürsoy et al.,2022). In CT images, the body is visualized in thin slices, and the x-ray uptake rates of the tissues are directly measured. However, since not all healthcare facilities have CT imaging devices, the same model is used in this study to classify both X-ray and CT radiology images. However, since not all healthcare facilities have CT imaging devices, the same model is used in this study to classify both X-ray and CT radiology images.

The original grayscale images of each dataset are first converted to BGR color space (OpenCV reads images as BGR image format by default) and then to BGR-HSV, BGR-CIE LAB, and BGR-CIE LAB- HSV-BGR, color spaces. The input dataset created by completing the color space transformations after the dimensioning pre-processing is shown in Figure 3.

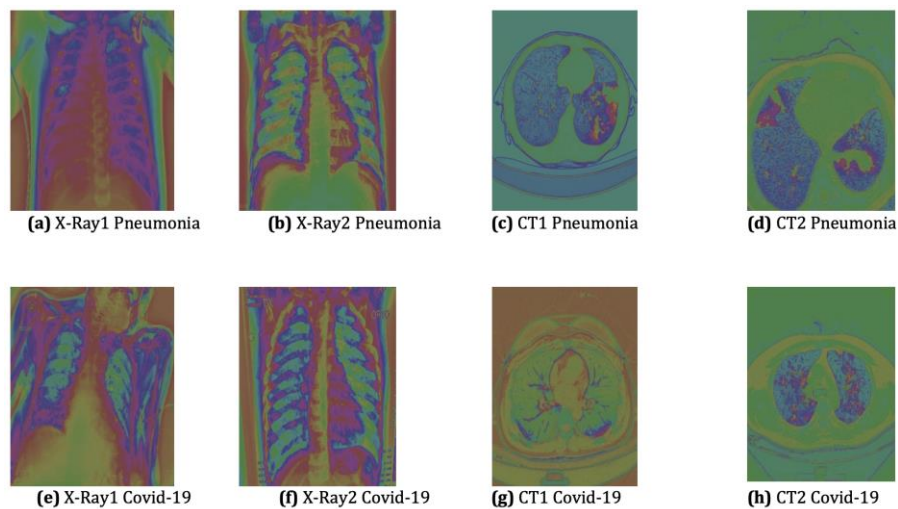


Figure 3. Sample input images with BGR-CIE LAB- HSV-BGR color space transformations for each dataset

The concept of color space emerged because of the need to group colors in a standard way due to the high color diversity in images. Color spaces are classified as device-dependent and device-independent (Bello-Cerezo et al., 2016). X-ray and CT image features may vary depending on the device model. In this study, original images, device-dependent BGR and HSV color space, and device-independent CIE LAB color space transformations are performed to show that a model performs successful classification even if the device feature and color space change.

3.2. Robust CNN Model

CNN, which is one of the most popular deep learning models used successfully in different problems (Liu et al., 2022; Steiniger et al., 2022), consists of three parts: convolution, pooling, and fully connected layers (Lecun et al., 2015). Since CNN produces successful results by detecting basic features with its layered structure, CNN is preferred in this study for classifying diseased chest radiology images.

An input layer, multiple hidden layers, and an output CNN, which is a multilayer artificial neural network consisting of two layers, basically includes two basic operations: convolution and pooling. CNN include hidden layers, convolutional layers, activation function layers, pooling layers, fully connected layers, and normalization layers. The convolution process using multiple filters can extract features (feature map) from the data set from which relevant spatial information can be preserved. The pooling, also called subsampling, is used to reduce the dimensionality of feature maps from the convolution process. Maximum pooling and average pooling are the most common pooling operations used in CNN.

Our proposed architecture is shown in the Table 2. The convolution layer size of our proposed model is set as 32, 64, 128, 128 and a kernel with a small size of 3x3 is used to avoid information loss. The activation function comes after the convolution layers and is also known as the activation layer. In this study, it is aimed to prevent the dead neuron problem by using the LeakyRelu activation function. Pooling is usually placed after the activation layer. Its main purpose is to reduce the input size for the next convolution layer. The decrease in size because of this layer leads to information loss. Such loss is beneficial to the network for two reasons. First, it creates less computational overhead for subsequent network layers. Secondly, it prevents the system from memorizing. Just like the convolution process performed in the first step, certain filters are defined in the pooling layer. These filters are moved over the image according to a certain stepping value to achieve maximum pooling of the pixels in the image. The pooling process is performed for all images as many as the filters formed because of the convolution layer, and the pooling layer is optional in CNN. and the optimization function Adaptive Moment Estimation (Adam) are preferred to prevent the derivative from being zero for negative values. Because adaptive algorithms learn the learning rate by themselves and are dynamic. Since the learning rate affects the learning performance of the model, the choice of this hyperparameter is critical. Also, EarlyStopping is used to stop the model at the right time. In the fully connected layers, the dropout value in the connection layer of the proposed model is chosen as 0.4 since the dilution of nodes below a particular threshold value increases the performance. Sigmoid activation function is preferred in the output layer of the network because it is preferred both in binary classification (Covid-19 and pneumonia) and because it can easily update the threshold value. Sigmoid activation function was preferred in the output layer of the network because it is preferred both in binary classification (Covid-19 and pneumonia) and because it can easily update the threshold value.

Table 2. Architecture layer of proposed model

Layer Type	Filter Size	Number of Filter	Output Shape	Number of parameters to train
Input	-	64	150x150x3	0
Convolution	3x3	32	148x148x32	896
Leaky ReLU	-	-	148x148x32	0
Max Pooling	2x2	-	74x74x32	0
Dropout	-	-	74x74x32	0
Convolution	3x3	64	72x72x64	18496
Leaky ReLU	-	-	72x72x64	0
Max Pooling	2x2	-	36x36x64	0
Convolution	3x3	64	34x34x128	73856
Leaky ReLU	-	-	34x34x128	0
Max Pooling	2x2	-	17x17x128	0
Convolution	3x3	128	15x15x128	147584
Leaky ReLU	-	-	15x15x128	0
Max Pooling	2x2	-	7x7x128	0
Flatten	-	-	6272	0
Dense	-	-	256	1605888
ReLU	-	-	256	0
Dropout	-	-	256	0
Dense	-	-	2	514
Sigmoid	-	-	2	0

Total Parameters: 1847314

4. Experimental Results

The computer and library information for which the model is designed are as follows: Intel Core i5-11600K 3.90 GHz CPU and Nvidia Geforce Gtx 1060 6GB Graphics Card, Spyder, TensorFlow, Keras, Numpy, Pandas, Matplotlib and OpenCV library is used for the conversion between color spaces.

X-Ray1, X-Ray2, CT1, and CT2 datasets are determined as 80% training and 20% as validation datasets. Figure 4 shows the graphs of the model accuracy and loss values for the best 35 epoch.

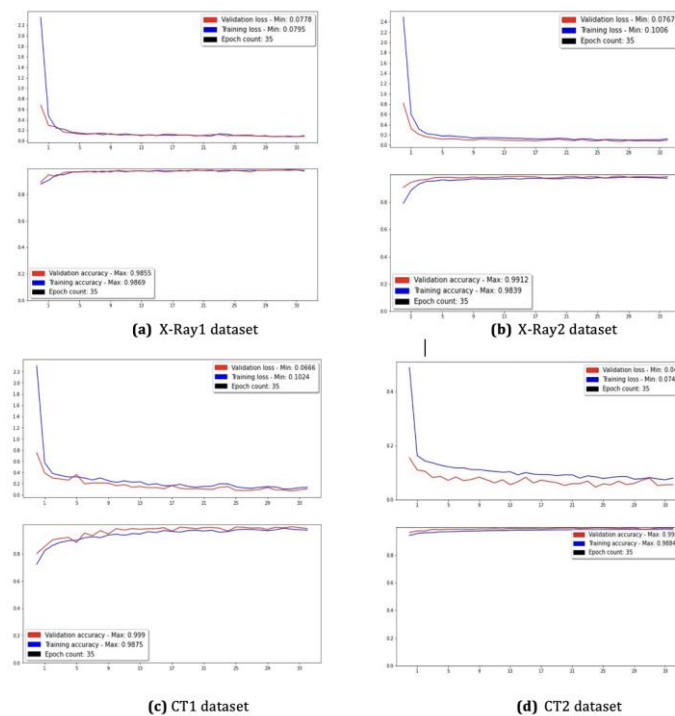


Figure 4. Model accuracy and loss graphics for every dataset

Accuracy value (Acc) is calculated using the formula in Equation 1. In the equation, the “True Positive (TP)” prediction is correct, and the feature is correct; The “True Negative (TN)” prediction is incorrect, but the feature is in the right place; “False Positive (FP)” means the prediction is correct but the feature is wrong, and “False Negative (FN)” is the prediction and feature are wrong.

$$Acc = \frac{TP+TF}{TP+TF+FP+FN} \tag{1}$$

The performance of the proposed model in this study is measured using Recall (R), Precision (P), Specificity (S), and F1score metrics. The formulas for these metrics are given for class n in Equation 2 - 5.

$$P(n) = \frac{TP}{TP+FP} \tag{2}$$

$$R(n) = \frac{TP}{TP+FN} \tag{3}$$

$$S(n) = \frac{TN}{FP+TN} \tag{4}$$

$$F1_{Score(n)} = 2 * \frac{P(n)*R(n)}{P(n)+R(n)} \tag{5}$$

K-fold cross-validation allows us to see if the high performance of the model is random. This method shows both whether we are facing an overfitting problem and the quality of the model. A 5-fold cross-validation method is used to increase the validity of the created model, and the confusion matrices shown in Figure 5 are created for each dataset. As seen in Figure 6, the number of misclassified Covid-19 samples in the proposed model CT1 dataset is higher than that of pneumonia. The reason for this is that the only weakness of the CT image compared to the X-ray is the lack of anatomical integrity, as the images are cross-sectional.

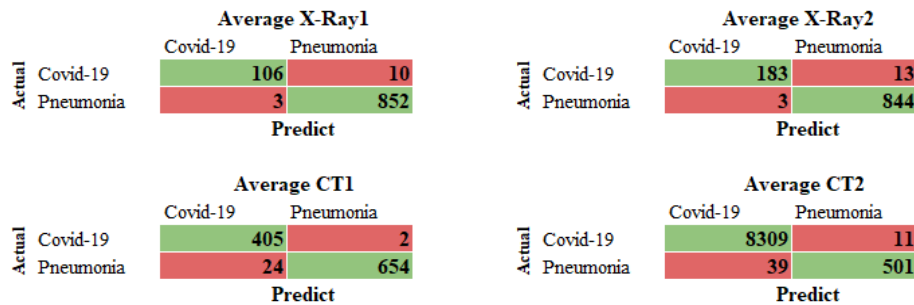


Figure 5. Confusion matrix for every dataset for 5-fold cross-validation

In addition, to observe the robustness of the model when subjected to noisy or exaggerated inputs, the Mean Squared Error (MSE) loss function value is calculated using Equation 6. MSE gives a loss value between 0 and infinity and allows the depreciation of the significant errors of the trained model by quadratic calculation. This is because smaller values indicate better accuracy. Model performance metrics for all datasets and MSE value calculated for all N samples are shown in Table 3.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_i^N (y_i^{real} - y_i^{predict})^2 \tag{6}$$

Table 3. Average performance results of the 5-fold cross-validation for each dataset

	Acc	F1score(n)	P(n)	R(n)	S(n)	MSE
X-Ray1	0.987	0.993	0.972	0.914	0.996	0.013
X-Ray2	0.984	0.99	0.984	0.934	0.996	0.016
CT1	0.976	0.98	0.944	0.995	0.965	0.024
CT2	0.994	0.953	0.995	0.999	0.928	0.006

When Table 3 is analysed, the highest loss value is observed in the CT1 dataset. If the image in Figure 3 (g) is examined, it is seen that there is significant distortion in the image after the color space transformation. This is due to both the anatomy distortion due to the slice-by-slice rendering of the original CT image and the conversion of the grayscale image to another color space. However, when we look at the whole of Table 3, we see that successful results are obtained.

5. Result and Discussion

The comparison of the proposed model with other studies in the literature is shown in Table 4. Different architectures of the CNN network were used for the detection of Covid-19 and pneumonia diseases in X-ray and CT images. They proposed CNN-based ResNet-50, MobileNet-v2, VGG, AlexNet, and LSTM architectures for image feature extraction and classification, and the results were successful in many models using X-ray or CT images. Thakur and Kumar achieved a 98.28% success rate for multi-classification with both X-ray and CT data. The proposed model and Thakur and Kumar's model and dataset type selection were similar. However, Thakur and Kumar performed median filtering, normalization, and shuffling pre-processing steps to improve the dataset image quality. The authors used SGD as the optimization function and a constant learning rate of 0.02. In the model proposed in this study, the Adam function, whose optimization function is better than SGD, and adaptive determination of the learning rate are preferred. In addition, the model shows successful results even though X-ray and CT images are converted to other color spaces.

Table 4. Performance comparison with other studies in the literature

References	Method	Dataset	Acc
Toğacar et al. (Toğacar et al., 2009)	AlexNet	X-ray	BC (Pneumonia and healthy): 94%
Nayak et al. (Nayak et al., 2009)	ResNet-50, ResNet-34, MobileNet-v2, VGG-16, SqueezeNet, AlexNet, Inception-V3, GoogleNet	X-ray	BC (Covid-19 and healthy): 98%
Foysal Haque et al. (Foysal Haque et al., 2020)	ResNet-50, InceptionV3, Inception-ResNetV2	X-ray	BC (Covid-19 and healthy): 97%
Islam et al. (Islam et al., 2020)	CNN-LSTM	X-ray	MC (Covid-19, pneumonia and healthy): 99.4%
Rahimzadeh et al. (Rahimzadeh et al., 2021)	Xception ResNet50V2	CT	BC (Covid-19 and healthy): 98.49%
Öztürk et al. (Öztürk et al., 2020)	DarkNet	X-ray	BC (Covid-19 and healthy): 98.08% BC (Covid-19, pneumonia and healthy): 87.02%
Thakur and Kumar (Thakur and Kumar, 2021)	CNN	X-ray CT	BC (Covid-19 and healthy): 99.64% MC (Covid-19, pneumonia and healthy): 98.28%
Bozkurt (Bozkurt, 2021)	Shallow-CNN	X-ray	Multi-classification (Covid-19, pneumonia and healthy): 94.73%
Proposed model	CNN	X-Ray1 X-Ray2 CT1 CT2	BC X-ray (Covid-19 and pneumonia): 98.7%, 98.4% BC CT (Covid-19 and pneumonia): 97.6%, 99.4%

Uçar et al. (2021) is the closest work in the literature as it performs color space transformation on the input dataset. Therefore, the performance of these two studies is evaluated in Table 5. Uçar et al. propose a model that classifies Covid-19 and pneumonia disease with X-ray images in RGB, CIE Lab, and RGB CIE color spaces. The study aims to examine the effect of different color spaces on feature extraction and model performance. DenseNet121 and EfficientNet B0 pre-trained models are used to detect the images of sick individuals. Then, using the Bi-LSTM network and Gradient Boosting, Random Forest, and Extreme Gradient Boosting, Covid-19 and pneumonia disease detection was performed with an accuracy of 92.489%.

Table 5. Performance comparison with the closest study in the literature

Dataset Name	Acc	F1score(n)	P(n)	R(n)	S(n)
X-Ray1	0.987	0.993	0.972	0.914	0.996
X-Ray2	0.984	0.99	0.984	0.934	0.996
CT1	0.976	0.98	0.944	0.995	0.965
CT2	0.994	0.953	0.995	0.999	0.928
X-Ray (Uçar et al.2021)	0.924	0.8879	0.888	0.889	0.943

As seen in Table 5, a robust model with well-chosen hyperparameters, optimization algorithm, learning rate, batch size, and epoch number produces better results than a combined model. Moreover, the model proposed in this study outperforms other works in the literature as it can achieve good results for both X-ray and CT images in different color spaces.

Low-cost and rapid detection of Covid-19, which causes much damage to the body, is essential for the health of patients, but PCR test results can be obtained within a few hours to a day. Contact of the sick individual with different individuals until the test result is available also increases the spread. Therefore, to reduce the spread rate with fast detection, chest imaging methods are preferred as a treatment method in hospitals. Covid-19 and pneumonia are successfully detected with input data transformed into color spaces. Thus, it can be preferred as a computer-based expert system in health institutions where radiology specialists are missing or insufficient. The success of the study motivates the following study. It is aimed to realize a mobile application with a CNN-based transfer learning algorithm. Thus, a user-friendly system will be created with successful classification. Additionally, hybrid solutions with different deep learning techniques studies on these methods are planned.

Conflict of interest

No conflict of interest was declared by the authors.

References

- Atasoy F., Eltanashi S., 2020. A Proposed Speaker Recognition Model Using Optimized Feed Forward Neural Network and Hybrid Time-Mel Speech Feature. International Conference on Advanced Technologiess Computer Engineering and Science (ICATCES 2020), pp. 130–140, Jun.
- Aydin Atasoy, N., Faris Abdulla Al Rahhawi, A., 2024. Examining the classification performance of pre-trained capsule networks on imbalanced bone marrow cell dataset, International Journal of Imaging Systems and Technology,34(3);<https://doi.org/10.1002/ima.23067>.
- Banerjee A., Sarkar A., Roy S., Singh P. K., Sarkar R., 2022. COVID-19 chest X-ray detection through blending ensemble of CNN snapshots. Biomed Signal Process Control. 78:104000. doi: 10.1016/J.BSPC.2022.104000.
- Bello-Cerezo R., Bianconi F., Fernández A., González E., di Maria F., 2016. Experimental comparison of color spaces for material classification. J Electron Imaging. 25(6). doi: 10.1117/1.jei.25.6.061406.
- Bozkurt F. ,2021. Derin Öğrenme Tekniklerini Kullanarak Akciğer X-Ray Görüntülerinden COVID-19 Tespiti. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (24), 149-156.
- Bozkurt F. ,2022. A deep and handcrafted features-based framework for diagnosis of COVID-19 from chest x-ray images. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 34(5), e6725.
- Chest X-ray (Covid-19 & Pneumonia) | Kaggle, 2022. <https://www.kaggle.com/prashant268/chest-xray-covid19-pneumonia> Accessed Jan. 07.
- Cohen J. P., Morrison P., Dao .L et al. 2020. COVID-19 Image Data Collection: Prospective Predictions Are the Future. Journal of Machine Learning for Biomedical Imaging. doi: 10.48550/arxiv.2006.11988.
- COVID Live - Coronavirus Statistics - Worldometer. <https://www.worldometers.info/coronavirus/> Accessed Jan. 07, 2023.
- COVID-19 DATABASE – SIRM. <https://sirm.org/category/senza-categoria/covid-19/> Accessed Jan. 10, 2023.
- COVID-19, Radiography Database | Kaggle. <https://www.kaggle.com/datasets/tawsifurrahman/covid19-radiography-database> Accessed Jan. 10, 2023.
- COVID-19, Normal&Pneumonia_CT_ImagesKaggle(2022).<https://www.kaggle.com/anaselmasry/covid19normalpneumonia-ct-images> Accessed Jan. 07.
- CT scan – Wikipedia ,2023. https://en.wikipedia.org/wiki/CT_scan Accessed Jan. 10, 2023.
- Elhagaggagi Emad Ba Attoch A., 2021. Thyroid Disorder Prediction Using Advance Deep Learning Paradigms: A Comparative Approach. Karabük University, The Institute of Graduate Studies.
- Foysal Haque K., Farhan Haque F., Gandy L., Abdelgawad A., 2020. Automatic Detection of COVID-19 from Chest X-ray Images with Convolutional Neural Networks. 2020 International Conference on Computing, Electronics and Communications Engineering, pp. 125–130. doi: 10.1109/iCCECE49321.2020.9231235.
- Gilanie G. et al., 2021. Coronavirus (COVID-19) detection from chest radiology images using convolutional neural networks. Biomed Signal Process Control, 66:102490. doi: 10.1016/J.BSPC.2021.102490.
- Gürsoy C., Tapan Ö., Doğan E. et al., 2022. Comparison of prone position effectiveness with percentage of injured lung area in awake non - intubated COVID-19 patients. Health Sciences Medicine 5(2): 417–422.

- Islam M. Z., Islam M. M., Asraf A. 2020. A combined deep CNN-LSTM network for the detection of novel coronavirus (COVID-19) using X-ray images. *Inform Med Unlocked*, 20:100412. doi: 10.1016/j.imu.2020.100412.
- Karim A. M., Kaya H., Alcan V., Sen B., Hadimlioglu I. A., 2022. New Optimized Deep Learning Application for COVID-19 Detection in Chest X-ray Images. *Symmetry*, 14(5):1003, doi: 10.3390/SYM14051003.
- Kaya A., Keceli A. S., Can A. B., 2019. Examination of various classification strategies in classification of lung nodule characteristics. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34(2):709–725. doi: 10.17341/gazimmfd.416530.
- Lecun Y., Bengio Y., Hinton G., 2015. Deep learning. *Nature*, 521(7553):436–444. doi: 10.1038/nature14539.
- Liu F., Chen D., Zhou J., Xu F., 2022. A review of driver fatigue detection and its advances on the use of RGB-D camera and deep learning. *Eng Appl Artif Intell.*, 116:105399. doi: 10.1016/J.ENGAPPAL.2022.105399.
- Metin İ. A., Karasulu B., 2021. A novel dataset of human daily activities: Its benchmarking results for classification performance via using deep learning techniques. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36(2):759–777. doi: 10.17341/gazimmfd.772849.
- Mishra M., Parashar V., Shimpi R., 2020. Development and evaluation of an AI System for early detection of Covid-19 pneumonia using X-ray. 2020 IEEE 6th International Conference on Multimedia Big Data, pp. 292–296. doi: 10.1109/BigMM50055.2020.00051.
- Nayak S. R., Nayak D. R., Sinha U., Arora V., Pachori R. B., 2021. Application of deep learning techniques for detection of COVID-19 cases using chest X-ray images: A comprehensive study. *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 64. doi: 10.1016/j.bspc.2020.102365.
- Oğuz Ç., Yağanoğlu M., 2021. Determination of Covid-19 Possible Cases by Using Deep Learning Techniques. *Sakarya University Journal of Science*, 25(1),1-11, DOI: <https://doi.org/10.16984/saufenbilder.774435>
- Oğuz Ç., Yağanoğlu M., 2022. Detection of COVID-19 using deep learning techniques and classification methods. *Inf Process Manag.* 59(5):103025. doi: 10.1016/j.ipm.2022.103025. Epub 2022 Jul 8. PMID: 35821878; PMCID: PMC9263717.
- Öztürk T., Talo M., Yildirim E. A. et al., 2020. Automated detection of COVID-19 cases using deep neural networks with X-ray images. *Comput Biol Med*, 121:103792. doi: 10.1016/J.COMPBIOMED.2020.103792.
- Pneumonia & COVID-19 Image Dataset | Kaggle (2022). <https://www.kaggle.com/gibi13/pneumonia-covid19-image-dataset> Accessed Jan. 07.
- Polsinelli M., Cinque L., Placidi G., 2020. A light CNN for detecting COVID-19 from CT scans of the chest. *Pattern Recognit Lett*, 140:95–100. doi: 10.1016/j.patrec.2020.10.001.
- Rahimzadeh M., Attar A., Sakhaei S. M., 2021. A fully automated deep learning-based network for detecting COVID-19 from a new and large lung CT scan dataset. *Biomed Signal Process Control*, 68:102588. doi: 10.1016/J.BSPC.2021.102588.
- Serener A., Serte S., 2020. Deep learning for mycoplasma pneumonia discrimination from pneumonias like COVID-19. 4th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, ISMSIT 2020 - Proceedings, pp. 1–5. doi: 10.1109/ISMSIT50672.2020.9254561.
- Somuncu E., Aydın Atasoy N., 2021. Evrişimli tekrarlayan sinir ağı ile metin görüntüleri üzerinde karakter tanıma uygulaması Gerçekleştirilmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 37:17–28. doi: 10.17341/GAZIMMFD.866552.
- Steiniger Y., Kraus D., Meisen T., 2022. Survey on deep learning-based computer vision for sonar imagery. *Eng Appl Artif Intell.*, 114:105157. doi: 10.1016/J.ENGAPPAL.2022.105157.
- Taşdelen A., Şen B., 2021. A hybrid CNN-LSTM model for pre-miRNA classification. *Scientific Reports*, 11:1-9. doi: 10.1038/s41598-021-93656-0.
- Thakur S., Kumar A., 2021. X-ray and CT-scan-based automated detection and classification of covid-19 using convolutional neural networks (CNN). *Biomed Signal Process Control*, 69:102920. doi: 10.1016/J.BSPC.2021.102920.
- Toğaçar M., Ergen B., Sertkaya M. E., 2009. Zatürre Hastalığının Derin Öğrenme Modeli ile Tespiti. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 31(1): 223–230.
- Uçar E., Atila Ü., Uçar M., Akyol K., 2021. Automated detection of Covid-19 disease using deep fused features from chest radiography images. *Biomed Signal Process Control*, 69:102862. doi: 10.1016/J.BSPC.2021.102862.
- X-ray - Wikipedia, 2023. <https://en.wikipedia.org/wiki/X-ray> Accessed Jan. 10, 2023.
- Yan T., 2020 COVID-19 and Common Pneumonia Chest CT dataset (416 COVID-19 positive CT scans) doi: 10.17632/3Y55VGCKG6.2 Accessed June 20.
- Yan T., Wong P. K., Ren H., Wang H., Wang J., and Li Y., 2020. Automatic distinction between COVID-19 and common pneumonia using multi-scale convolutional neural network on chest CT scans. *Chaos Solitons Fractals*, 140:110153. doi: 10.1016/j.chaos.2020.110153.
- Yan, T., 2020. COVID-19 and Common Pneumonia Chest CT Dataset (412 Common Pneumonia CT Scans). <https://doi.org/10.17632/ygvkdbmvt.1> Accessed June 20.
- Yang X., San Diego U., Zhao J. et al., 2023. COVID-CT-Dataset: A CT Image Dataset about COVID-19. https://www.researchgate.net/publication/340331511_COVID-CT-Dataset_A_CT_Scan_Dataset_about_COVID-19#fullTextFileContent Accessed April 07, 2022.
- Yıldız O., 2019. Melanoma detection from dermoscopy images with deep learning methods: A comprehensive study, *Journal Of The Faculty Of Engineering And Architecture Of Gazi University*, vol. 34(4): 2241–2260. doi: 10.17341/GAZIMMFD.435217.



DEEP LEARNING BASED NETWORK INTRUSION DETECTION

Güneş HARMAN^{1*}, Emine CENGİZ¹

¹ Department of Computer Engineering, Yalova University, Yalova, Turkey

Keywords

Deep Learning,
Convolutional Neural
Network,
Intrusion Detection,
NF-BoT-IoT,
Cyber Security.

Abstract

As a direct consequence of the unrelenting march of technological innovation, the use of the Internet has become an unavoidable condition for the life of modern humans. The Internet has increased both the quantity and range of situations in which information products can be useful or non-useful. It's no surprise that as the number of different systems and users has grown, so have the number of different ways to exploit those systems. A security issue has arisen with such diversity and growth. Its diversity and increase in quantity introduce new system weaknesses and thus new attack strategies. Methods for detecting both internal and external attacks are suggested as a solution to this issue. The purpose of this research, a Convolutional Neural Network was utilized to identify intrusions, also known as attacks for the imbalanced class distribution in the NF-BoT-IoT data set, Synthetic Minority Over Sampling Technique, Random Over Sampling and Random Under Sampling methods were used. K-Fold Cross Validation, one of the strategies for splitting the data set, was utilized to evaluate the performance of classification models and to train the developed model. The model's performance was evaluated using the accuracy, precision, recall, and F1-score performance criteria.

DERİN ÖĞRENME TABANLI AĞ SALDIRI TESPİTİ

Anahtar Kelimeler

Derin Öğrenme,
Evrişimsel Sinir Ağları,
Saldırı Tespiti,
NF-BoT-IoT,
Siber Güvenlik.

Öz

Teknolojik yeniliklerin amansız ilerleyişinin doğrudan bir sonucu olarak, İnternet kullanımı modern insanın yaşamı için kaçınılmaz bir koşul haline gelmiştir. İnternet, bilgi ürünlerinin yararlı ya da yararsız olabileceği durumların hem miktarını hem de çeşitliliğini artırmıştır. Farklı sistemlerin ve kullanıcıların sayısı arttıkça, bu sistemleri istismar etmenin farklı yollarının sayısının da artması şaşırtıcı değildir. Bu çeşitlilik ve büyümeyle birlikte bir güvenlik sorunu ortaya çıkmıştır. Çeşitlilik ve miktar artışı yeni sistem zayıflıklarını ve dolayısıyla yeni saldırı stratejilerini beraberinde getirmektedir. Bu soruna çözüm olarak hem iç hem de dış saldırıları tespit etmek için yöntemler önerilmektedir. Bu araştırmanın amacı, NF-BoT-IoT veri setindeki dengesiz sınıf dağılımına yönelik saldırı olarak da bilinen izinsiz girişleri tespit etmek için bir Evrişimsel Sinir Ağı kullanılmış, Sentetik Azınlık Örneklemme Tekniği, Rastgele Aşırı Örneklemme ve Rastgele Alt Örneklemme yöntemleri kullanılmıştır. Sınıflandırma modellerinin performansını değerlendirmek ve geliştirilen modeli eğitmek için veri setini bölme stratejilerinden biri olan K-Fold Cross Validation kullanılmıştır. Modelin performansı doğruluk, kesinlik, duyarlılık ve F1-skor performans kriterleri kullanılarak değerlendirilmiştir.

Alıntı / Cite

Harman, G., Cengiz, E., (2024). Deep Learning Based Network Intrusion Detection, Journal of Engineering Sciences and Design, 12(3), 517-530.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

G. Harman, 0000-0001-5413-124X
E. Cengiz, 0000-0002-6695-9500

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	11.01.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date	25.07.2024
Kabul Tarihi / Accepted Date	06.08.2024
Yayın Tarihi / Published Date	26.09.2024

* İlgili yazar / Corresponding author: guenes.guclu@yalova.edu.tr, +90-226-815-5336

DEEP LEARNING BASED NETWORK INTRUSION DETECTION

Güneş HARMAN^{1†}, Emine CENGİZ¹

¹ Department of Computer Engineering, Yalova University, Yalova, Turkey

Highlights

- Imbalanced Dataset Handling
 - Investigating the influence of resampling methods and varying K values on model.
 - Network threats using deep learning (DL) techniques, specifically focusing on the NF-BoT-IoT dataset.
-

Purpose and Scope

Due to relentless technological innovation, the Internet has become an indispensable aspect of modern human life, expanding the scope of situations where information products are either beneficial or not. The growing number of systems and users has led to increased vulnerabilities and various ways to exploit them. This diversity poses security challenges, prompting the need for methods to detect internal and external attacks. The purpose of this study is to explore the use of Convolutional Neural Network (CNN), a deep learning (DL) method, for suggesting Intrusion Detection Systems (IDS). The study specifically focuses on utilizing the NF-BoT-IoT dataset. The study aims to contribute to the field of intrusion detection by investigating the use of CNN with a specific focus on the NF-BoT-IoT dataset. The exploration of re-sampling techniques and K-Fold cross validation provides insights into the robustness and generalization capabilities of the proposed IDS approach.

Design/methodology/approach

The study employs the NF-BoT-IoT dataset, suggesting a focus on IoT related network traffic and potential botnet activities. Before using the dataset for training a CNN model, the data undergoes preprocessing. This includes tasks such as data cleaning, normalization, and re-sampling. Various re-sampling techniques are applied to address potential imbalances in the dataset. The techniques mentioned include Synthetic Minority Over Sampling Technique (SMOTE), Random Over Sampling, and Random Under Sampling. These techniques aim to handle imbalanced class distributions, which is common in intrusion detection datasets. The CNN model is trained using the preprocessed and resampled data. K-Fold cross validation is employed for model training. K-Fold cross validation involves dividing the dataset into K subsets and using each subset as a testing set while the K-1 remaining subsets are used for training. The study explores different values of K (5, 7, and 10) in this process. The study assesses the performance of the CNN model considering the influence of both resampling techniques and the choice of K value in the K-Fold cross validation. Performance metrics like accuracy, precision, recall, and F1 score might be used to evaluate the effectiveness of the proposed approach.

Findings

In this study, the impact of resampling methods and different K values on model performance was examined. The findings revealed a consistent 77% accuracy across three distinct K values for both SMOTE and Random Over Sampling methods. For Random Under Sampling, a 77% accuracy was achieved for K values of 5 and 7, while a 76% accuracy was observed for K value 10.

Various metrics, including accuracy, precision, recall, and F1-score, were employed to evaluate the developed models, and it was noted that these metrics yielded identical results. A comparison was made with a prior study on the NF-BoT-IoT dataset (Cengiz and Harman, 2022), where Random Forest (RF), K-Nearest Neighbor (KNN), Support Vector Machines (SVM), and Artificial Neural Network (ANN) were used for binary classification. In that research, RF achieved 99.4% accuracy, KNN achieved 82.7%, SVM achieved 96.7%, and ANN achieved 60.7%. Notably, in this current investigation, the CNN model outperformed ANN, attaining a higher accuracy of 77%.

Originality

This study is important in terms of evaluating the results obtained by using deep learning and applying different resampling techniques on a dataset with unbalanced class distribution.

[†] Corresponding author: gunes.guclu@yalova.edu.tr, +90-226-815-5336

1. Introduction

The Internet is a communication network that enables the sending and receiving of data and information via computers and other intelligent devices using a suitable internet protocol (TCP/IP) (Sarkar et al., 2015). Due to the pandemic (Covid19) that began in 2020, internet usage is highly popular and continues to grow. The usage of social networking sites, online meetings, and several applications has become an everyday occurrence. As financial issues, such as money transfers and electronic commerce are added it has become imperative to implement security measures in all networks that receive services over the internet network, give services over the internet network, or contact the internet network.

The widespread adoption of internet technology has simplified many aspects of people's life. Nonetheless, this circumstance has resulted in major risks over time. There are developments in security technologies with the increase in the number and types of security related threats (Mandal and Kösesoy, 2023). Its primary target is software such as authentication and access control, which prevents an unauthorized person from getting or altering their access information by either preventing access to the information altogether or by limiting who may receive it.

By developing firewalls and anti virus software, material and moral damages are drastically avoided. But, when threats increase, this software is insufficient. Intrusion Detection Systems (IDS) are real time software tools used to safeguard device communication and detect network intrusions (Vishwakarma and Kesswani, 2022). IDS enhances the environment's security by monitoring network activity and analyzing network traffic for the detection of attacks and threats. IDSs are divided into two categories: Anomaly based and signature based. Anomaly based IDS attempts to identify normal and abnormal activity on the data and alerts network management (Butun et al., 2013). Signature based IDSs, on the other hand, attempt to detect the attack by comparing the information collected from the incoming connection to the signature database (Otoum and Nayak, 2021).

Machine Learning (ML) and Artificial Intelligence (AI) are used a lot in IDS (Altunay and Albayrak, 2021). The detection accuracy of IDS has been greatly enhanced by these approaches (Mijalkovic and Spognardi, 2022). Yet, it has several drawbacks and restrictions. The processing of data, in particular, needs human interaction and specialized expertise (Shone et al., 2018). Another unfavorable feature is that as network complexity rises, learning activities decline. ML methods in IDS are typically used for applications with insufficient data (Dina and Manivannan, 2021). With the rise in data volume, techniques like Deep Learning (DL) have been employed to identify attacks. DL is a sub branch of ML (Priyadarshini and Barik, 2022). The primary objective of employing DL techniques in IDS is to detect, prevent or mitigate network defined attacks (Behera et al., 2022).

The main contributions of this study are summarized as follows:

1. In this study, we propose a Convolutional Neural Network (CNN) model using the NF-BoT-IoT dataset and explore how deep learning methods can be used to detect network attacks.
2. To address data imbalance, we employed various resampling techniques (SMOTE, Random Over Sampling, Random Under Sampling) and evaluated their impact on the performance of the CNN model. These techniques contribute to a more effective management of imbalanced class distributions.
3. We tested the generalization capability of the model by using the K-fold cross-validation method. We examined the impact of different K values (5, 7, and 10) on model performance and evaluated the role of this method in improving model accuracy.
4. In this study, we compared the performance of the CNN model with other machine learning models previously applied to the NF-BoT-IoT dataset, and demonstrated that the CNN performed better under certain conditions. This emphasizes the effectiveness and advantages of the CNN model.

2. Literature Review

In the past few years, many studies have been done on IDSs using DL algorithms. These investigations are intended to detect potential network or system attacks.

Altunay and Albayrak (2021) used CNN to make an attack detection application based on feature selection to prevent cyber-attacks in their studies. The CSE-CIC-IDS2018 dataset was utilized in their research. Using SMOTE approach to detect intrusions by generating synthetic data. The categorization success rates were 98.7% for Brute Force, 98.5% for DoS, 98.9% for Botnet, and 99.0% for SQL Injection as determined by the research.

Idrissi et al. (2021) employed DL techniques to identify network attacks in IoT systems using the Bot-IoT dataset and compared them. They utilized CNN, Recurrent Neural Networks (RNN), Long Short Term Memory (LSTM) and Gated Recurrent Unit (GRU) as DL techniques. Using CNN, they attained the greatest success rate (99.94%) for IDS.

Vishwakarma and Kesswani (2022) proposed a Deep Neural Network-based IDS (DIDS) for the IoT environment. They used Neflow-based NIDS (NF-BoT-IoT, NF- ToN-IoT, NF-CSE CIC IDS2018, NF-UNSW NB15) datasets and the NF-UQ NIDSdataset, which is a combination of these four datasets. They compared the performance of the proposed DIDS model in multiclassification and binary classification. In binary classification, the highest accuracy was obtained with 99.21% in the NF-CSE CIC IDS2018 dataset, and in multiclassification with 97.48% in the NF-UNSW NB15 dataset.

Kim et al. (2029) the CNN and RNN DL models were utilized to detect DoS attacks. In their research, they utilized the CSE-CIC-IDS2018 and KDD CUP99 datasets to conduct binary and multiple classifications. At the conclusion of the study, the CNN model on the KDD CUP99 dataset obtained 99% accuracy in binary and multiclass classification, whereas the RNN model obtained 99% accuracy in binary classification and 93% accuracy in multiclassification. For the CSE-CIC-IDS 2018 dataset, the CNN model obtained an average accuracy of 91.5% while the RNN model achieved an average accuracy of 65%.

Sun et al. (2020) suggested hybrid research that utilized both CNN and LSTM. They developed a model that extracts the temporal and spatial properties of network traffic using the CICIDS 2017 dataset. This model achieved 98.67% performance in multiclassification.

Yang and Wang (2019) developed an enhanced CNN model for the NSL-KDD data set. After feature selection methods, they employed a total of 21 characteristics to detect four distinct types of attacks in their study. Accuracy, True Positive Rate (TPR), and False Positive Rate (FPR) were utilized to evaluate the suggested model. By the conclusion of the research, their accuracy was 95.36 percent.

Naveed et al. (2022) suggested a hybrid feature selection and Deep Neural Network (DNN) based classifier strategy for IDS. Methods of Principal Component Analysis, Chi-square and Analysis of Variance (ANOVA) were employed to produce a subset of characteristics that could be utilized for categorization The NSL-KDD dataset was utilized for the research. The suggested technique achieved 99.73% accuracy, 99.75% precision and 99.72% F1-score.

Table 1 provides a comparison of the studies that have been published.

Table 1 Comparative analysis of literature referenced studies

Reference	Dataset	Method	Attack Type	Results
Altunay and Albayrak (2021)	CSE-CIC-IDS2018	CNN+SMOTE	Botnet,	PRE: 99.5%
			SQ Injection,	REC: 98.1%
			Brute Force, DoS	ACC: 98.8%
Idrissi et al. (2021)	Bot-IoT	CNN,	Botnet	CNN: 99.94%
		RNN,		RNN: 99.42%
		LSTM,		LSTM:99.74%
		GRU		GRU:99.43%
Vishwakarma and Kesswani (2022)		DIDS	Various types of IoT network attacks	Binary Classification
				<u>NF-BoT-IoT</u>
				ACC:99.08%
				PRE:99.03%
				REC:99.08%
				FSC: 99.02%
<u>NF-ToN-IoT</u>				
ACC:99.48%				
PRE:99.48%				

				REC:99.48%
	NF-BoT-IoT,			FSC: 99.48%
	NF-ToN-IoT, NF-			<u>NF-CSE CIC IDS2018</u>
	CSE CIC IDS2018,			ACC:99.21%
	NF-UNSW NB15			PRE:99.21%
	NF-UQ NIDS			REC:99.21%
				FSC: 99.20%
				<u>NF-UNSW NB15</u>
				ACC:98.72%
				PRE:98.69%
				REC:98.72%
				FSC: 98.70%
				<u>NF-UQ NIDS</u>
				ACC:98.23%
				PRE:98.23%
				REC:98.23%
				FSC: 98.22%
<hr/>				
				Binary Classification
				<u>KDDCUP99/CNN</u> ACC:99%
				<u>KDD CUP99/RNN</u> ACC:99%
				Multi Classification
				<u>KDDCUP99/CNN</u> ACC:99%
				<u>KDD CUP99/RNN</u> ACC:93%
				<u>CSE-CIC-IDS 2018 CNN</u> : average 91,5%
				<u>CSE-CIC-IDS 2018RNN</u> : average 65%
<hr/>				
			FTP-Patator,	
			SSH-Patator,	
			DoS,	ACC: 98.67%
			Heartblee,	REC:97.21%
			Web Attack,	PRE:0.47%
			Infiltration,	FSC:93.32%
			Botnet,	
			DDoS	
<hr/>				
			Probe,DoS	ACC:%95.36
			R2L	PRE:%0.76
			U2R	REC:%95.55
<hr/>				
				ACC=%99,73
			Normal	PRE=%99,75
			Anomaly	REC=%99,73
				FSC=%99,72

Note: ACC = Accuracy, PRE = Precision, REC = Recall, FSC = F1-Score

3. Material and Method

3.1 Dataset

This study utilized a NetFlow based structure of the BoT-IoT dataset to create the NF-BoT-IoT dataset (Sarhan et al., 2020). Cisco developed NetFlow in 1996, and it has been used to describe network flows. There are 600,100 samples in all. This includes 586,241 (97.69%) attack patterns and 13,859 (2.31%) normal flow patterns (benign). The dataset has twelve characteristics (Sarhan et al., 2020). Table 2 shows the characteristics of this data set.

Table 2 Characteristics of NF-BoT-IoT data set.

Characteristic Description	Characteristic Description
IPV4_SRC_ADDR	IPv4 source address
IPV4_DST_ADDR	IPv4 destination address
L4_SRC_PORT	IPv4 source port number
L4_DST_PORT	IPv4 destination port number
PROTOCOL	IP protocol identifier byte
TCP_FLAGS	Cumulative of all TCP flags
L7_PROTO	Layer 7 protocol
IN_BYTES	Incoming number of bytes
OUT_BYTES	Outgoing number of bytes
IN_PKTS	Incoming number of packets
OUT_PKTS	Outgoing number of packets
FLOW_DURATION_MILLISECONDS	Flow duration in milliseconds

3.2 Preprocessing

One of the most crucial factors determining how well DL models function is whether the data sets utilized are valuable and presented in a certain style (Tsimenidis et al., 2022). Data preprocessing or preparation is the transformation of data into a more usable format by employing techniques such as filling in missing values, finding, and cleaning outliers, eliminating duplicate data, combining data, and reducing the dimension data. This data's preprocessing in other words data preparation consisted of three phases. These phases are data cleaning, normalization and resampling.

Data cleaning is based on identifying missing, incorrect, or irrelevant parts of the data, and then replacing or deleting these parts (Chu et al., 2016). During the data cleaning phase of this research, four characteristics (Soderstrom, 2021; Wang et al., 2021) that were found ineffective for identifying network attacks were removed from all dataset entries, namely IPV4 SRC ADDR, L4 SRC PORT, IPV4 DST ADDR, and L4 DST PORT.

The second step of preprocessing involves data normalization, which is a technique used to standardize diverse data qualities (Aldallal, 2022). This involves rescaling the data within the range of 0 to 1. In this investigation, the normalization process was performed using the minimum-maximum formula described in Equation 1.

$$x_s = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (1)$$

In Equation 1, x_{max} and x_{min} represent the maximum and minimum values of the variable, respectively. When x equals the minimum value of the variable, the numerator becomes 0, so X_s equals 0. On the other hand, when x equals the maximum value of the variable, the numerator becomes equal to the denominator, resulting in X_s equaling 1. However, if x is between the minimum and maximum values, X_s takes a value between 0 and 1.

The third step of preprocessing is resampling. Class imbalance is a significant factor that affects the quality of classification performance, but it is often overlooked (Cengiz and Harman, 2022). Many justifications for using classification techniques only consider well balanced training sets, but this default balanced distribution may not exist in many datasets. One class may have very few instances, while the other may have a lot, leading to possible complications during the categorization phase. This can cause problems during the classification stage, as models may make erroneous predictions when presented with samples that have little label information due to inadequate training (Bedi et al., 2021). To mitigate the negative impact of training on imbalance datasets, three main methods are commonly used. These methods are oversampling, undersampling and synthetic data generation.

Oversampling involves duplicating samples from a randomly selected portion of the data belonging to the minority class until an even class distribution is obtained. However, this can increase the probability of overfitting because

it copies examples from the minority class. Undersampling, on the other hand, aims to rebalance the dataset by deleting a randomly selected portion of the samples from the majority class until the class distributions are equal. The SMOTE method is an oversampling process that enables the production of synthetic data by generating new minority class instances through certain operations between instances of the minority class. Synthetic samples are produced as follows:

1. A random sample is selected from the minority class and its k-nearest neighbor is found.
2. The difference value between the randomly selected sample and its k-nearest neighbor from the minority class is calculated.
3. The calculated difference value is multiplied by a random number (δ) between 0 and 1.
4. New samples are created according to Equation 2.

$$E_{new} = E_0 + (E_1 - E_0) \times \delta \quad (2)$$

5. For each new data point, the first four steps are repeated.

Table 3 presents the distributions of attack and benign flow classes in the dataset before and after resampling.

Table 3 Distributions of attack and benign flow classes in the dataset

	Total number of data flows	Number of attack flows	Number of normal flows
Data distribution of the dataset	600.100	586.241	13.859
Data distribution after SMOTE	1.172.482	586,241	586,241
Data distribution after random over sampling	1.172.482	586,241	586,241
Data distribution after random undersampling	27.718	13.859	13.859

3.3 Convolutional Neural Network

Convolutional Neural Networks (CNN) are a DL method developed by LeCun in the LeNet architecture in 1998 (LeCun et al., 1998). CNNs are commonly used for analyzing visual information, such as image recognition and classification, natural language processing, medical image analysis, and speech analysis. The CNN model consists of three main layers: Convolutional layer, pooling layer and fully connected layer. The convolutional layer is the first layer in CNN algorithms. In this layer, the input data is passed through a filter to create a feature map. The second layer after the convolutional layer is the pooling layer, which is typically applied to the feature matrices created by the convolutional layer. Like the convolutional layer, the pooling layer aims to reduce dimensionality (Çetiner, 2021). This reduces the required computational power and focuses on more important features by ignoring unnecessary ones. The fully connected layer works on an input where each entry is connected to all neurons. This layer is typically found towards the end of the CNN architecture and is used to optimize goals such as class scores. The CNN structure used in this study is shown in Figure 1.

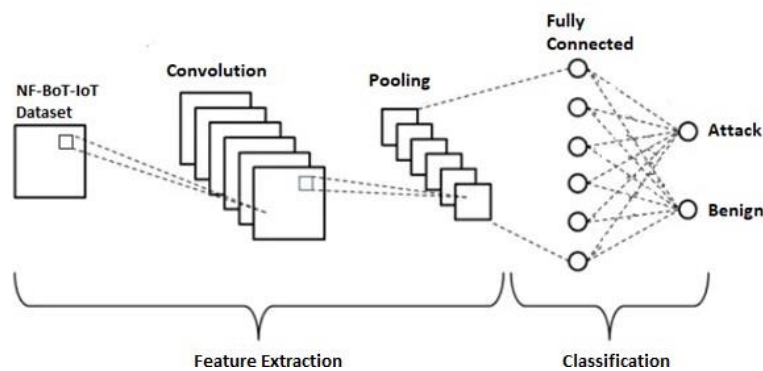


Figure 1 CNN structure

The variables whose values vary depending on the nature of the problem and the dataset in question are referred to as hyperparameters. How to construct a multi interactive Artificial Neural Network (ANN), as

well as the hyperparameter values utilized in the developed or created model, is a crucial aspect to consider when trying to find a solution to a problem using DL methods. The learning rate, number of neurons, epoch number, batch size, dropout, activation and optimization function usage are the hyper parameters that are often included in CNN constructions.

The hyperparameter values selected for training are given in Table 4.

Table 4 Hyper parameter values

Hyperparameter	Values
Learning rate	0.001
Activation Function	Relu
Optimization Method	Adam
Epoch number	10
Dropout	0.5
Number of neurons	32

The recommended flowchart for this model is given in Figure 2.

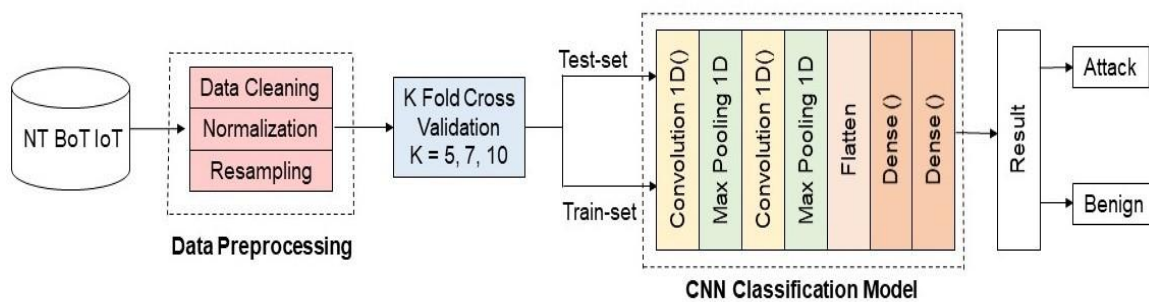


Figure 2 Flow chart of the proposed model

In this flow diagram, we demonstrate the data preprocessing and classification process using a CNN model. Initially, data were obtained from the NF BoT IoT dataset, which contains information related to IoT network traffic. The preprocessing stage consisted of three steps: data cleaning, normalization, and resampling. Data cleaning ensured that the dataset was free from inconsistencies or irrelevant information. With normalization, we scaled the data to a standard range to enhance the performance and convergence of the model. Resampling techniques were applied to address class imbalances in the dataset. After preprocessing, the dataset underwent K-fold cross validation with K values of 5, 7, and 10. This method divides the data into K subsets, where, in each iteration, one subset is used as the test set, and the remaining subsets are used as the training set. This allowed for a comprehensive evaluation of the generalization ability of the model. The pre processed and validated data were then fed into the CNN classification model. This model consists of two one dimensional convolution layers followed by max pooling layers. These layers extract fundamental features from the data and perform downsampling. The resulting feature maps were flattened and passed through two dense (fully connected) layers that facilitated the learning of complex patterns and decision boundaries. The output from the dense layers classifies the network traffic into two categories: 'Attack' and 'Benign.' Our study provides a classification that distinguishes between malicious and normal network activities, aiding the identification and mitigation of potential IoT security threats.

4. Experiment

4.1 Evaluation Metrics

The study investigates the implications of the algorithm’s performance by selecting the K value to be either 5, 7, or 10. To prevent an imbalanced distribution of classes within the dataset, the SMOTE, Random Under Sampling, and Random Over Sampling approaches were utilized. The performance results were analyzed by applying various K values to each of these approaches and comparing the outcomes. To assess the efficacy of the classification models, a confusion matrix was used as a comparison tool between the

estimated values of the target characteristic and the actual values. The confusion matrix is shown in Table 5.

Table 5 Confusion Matrix

		Predicted	
		Negative	Positive
Actual	Negative	True Negative (TN)	False Positive (FP)
	Positive	False Negative (FN)	True Positive (TP)

True Positive (TP): The situation where an attack instance is correctly classified as an attack.

False Positive (FP): The situation where a benign is incorrectly classified as an attack instance.

False Negative (FN): False Negative (FN): The situation where an attack instance is incorrectly classified as benign.

True Negative (TN): The situation where a benign is correctly classified as a benign.

To evaluate the performance of the models, accuracy, sensitivity, precision, and F1-score metrics were used. These values are calculated according to Equations [3-6].

Accuracy: The percentage of positive classified examples.

$$\text{Accuracy} = \frac{\text{TP} + \text{TN}}{\text{TP} + \text{FP} + \text{TN} + \text{FN}} \quad (3)$$

Precision: The proportion of true positives among the samples predicted as positive.

$$\text{Precision} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FP}} \quad (4)$$

Recall (sensitivity): A metric that shows how many of the positive values that we should have predicted as positive have actually been predicted as positive.

$$\text{Recall} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FN}} \quad (5)$$

F1 score: The harmonic mean of precision and recall values.

$$F_1 = 2 * \frac{\text{precision} * \text{recall}}{\text{precision} + \text{recall}} \quad (6)$$

4.2 Experimental Results

In this section, the confusion matrix and performance results are provided and discussed. Table 6 presents the confusion matrix obtained according to the resampling methods and K values.

Table 6 Confusion matrix obtained according to the resampling methods and K values.

Confusion Matrix for SMOTE

K=5		Prediction Value	
		negative	positive
Actual Value	negative	69068	48180
	positive	5014	112234

K=7		Prediction Value	
		negative	positive
Actual Value	negative	49262	34486
	positive	3534	80215

K=10		Prediction Value	
		negative	positive
Actual Value	negative	34087	24537
	positive	2501	56123

Confusion Matrix for Random Over Sampling

K=5		Prediction Value	
		negative	positive
Actual Value	negative	68983	48265
	positive	5014	112234

K=7		Prediction Value	
		negative	positive
Actual Value	negative	49274	34474
	positive	3534	80215

K=10		Prediction Value	
		negative	positive
Actual Value	negative	34438	24186
	positive	2501	56123

Confusion Matrix for Random Under Sampling

K=5		Prediction Value	
		negative	positive
Actual Value	negative	1625	1146
	positive	127	2645

K=7		Prediction Value	
		negative	positive
Actual Value	negative	1166	813
	positive	84	1896

K=10		Prediction Value	
		negative	positive
Actual Value	negative	799	586
	positive	71	1315

As shown in Table 6, when the SMOTE technique was applied, the TP and TN were high for K=5, K=7, and K=10. The highest TP and TN values were obtained for K=5, indicating that the model generally performed better. For K=7 and K=10, we observed an increase in the FP and FN values, indicating that the performance of the model decreased slightly as the K value increased. For the random oversampling technique, the TP and TN values for K=5, K=7, and K=10 were quite similar to those obtained with SMOTE. The highest TP and TN values were observed at K=5, indicating that this method performed the best at K=5. We observed an increase in the FP and FN values for K=7 and K=10, indicating that the performance of the model decreased as the K value increased. Random undersampling reduces this imbalance by decreasing the number of examples in the majority class. The results showed that the TP and TN values for K=5, K=7, and K=10 were quite low, indicating that the dataset was significantly reduced and information loss occurred. Although the TP and TN values were obtained with K=5, these values were quite low compared those with of the other methods. For K=7 and K=10, we observed a slight increase in the FP and FN values, indicating that the performance of the model decreased further as the K value increased. Table 7 displays the accuracy and performance metrics of the CNN method applied to the dataset.

Table 7 Performance metrics of the CNN method**SMOTE**

K Fold Cross Validation	Precision	Recall	F1-Score	Accuracy
K=5	0.70	0.96	0.81	0.77
K=7	0.70	0.96	0.81	0.77
K=10	0.70	0.96	0.81	0.77

Random Over Sampling

K=5	0.70	0.96	0.81	0.77
K=7	0.70	0.96	0.81	0.77
K=10	0.70	0.96	0.81	0.77

Random Under Sampling

K=5	0.70	0.95	0.81	0.77
K=7	0.70	0.96	0.81	0.77
K=10	0.69	0.95	0.80	0.76

Table 7 presents the performance results obtained using K-Fold Cross-validation for SMOTE, random oversampling, and random undersampling methods. We analyzed the precision, recall, F1-score, and accuracy for each method with K values of 5, 7, and 10. SMOTE and random oversampling methods yielded the same results for all three K values: a precision value of 0.70, a recall value of 0.96, an F1-score of 0.81, and an accuracy of 0.77. This indicates that both methods work similarly and provide a balanced performance. For the random under-sampling method, the precision value was 0.70, the recall value was 0.95 or 0.96, the F1-score was 0.81, and the accuracy was 0.77 for K=5 and K=7. However, for K=10, the precision value dropped to 0.69, recall value was 0.95, F1-score was 0.80, and accuracy was 0.76. These results suggest that the performance of the random undersampling method slightly decreases for K=10. Overall, it was observed that SMOTE and Random Over Sampling methods provide more consistent and reliable results, while the performance of the Random Under Sampling method varies depending on the K value.

Accuracy, precision, recall, and F1-score were some of the metrics used to assess the quality of the developed models. It was observed that these parameters produced identical outcomes. In our prior research on the NF-BoT-IoT dataset (Cengiz and Harman, 2022), using Random Forest (RF), K-Nearest Neighbor (KNN), Support Vector Machines (SVM), and ANN binary classification was performed. In this investigation, an accuracy of 99.4 percent was achieved with RF, 82.7 percent with KNN, 96.7 percent with SVM, and 60.7 percent with ANN. When comparing the two experiments, it was shown that ANN had a higher accuracy. Figure 3, Figure 4 and Figure 5 shows the performance metrics of the CNN methods.

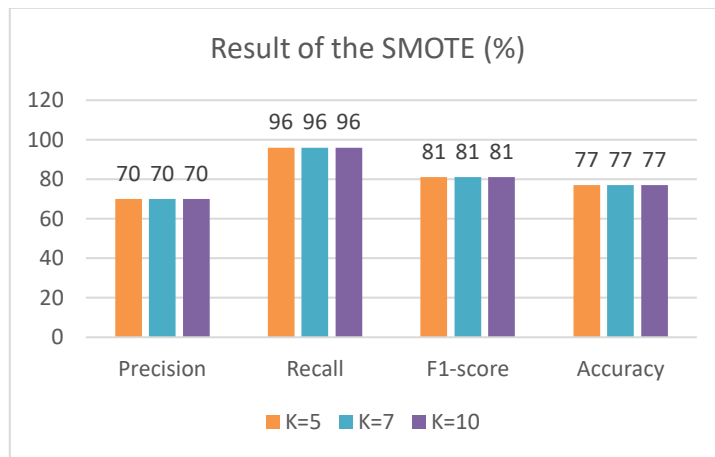


Figure 3. Performance metrics of the SMOTE.

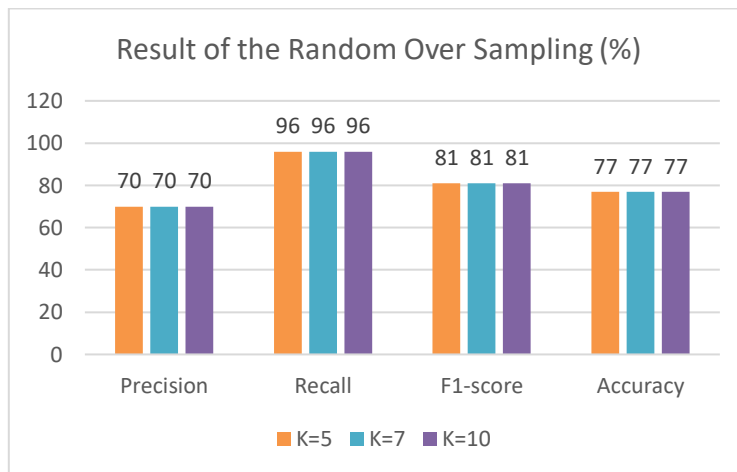


Figure 4. Performance metrics of the Random Over Sampling.

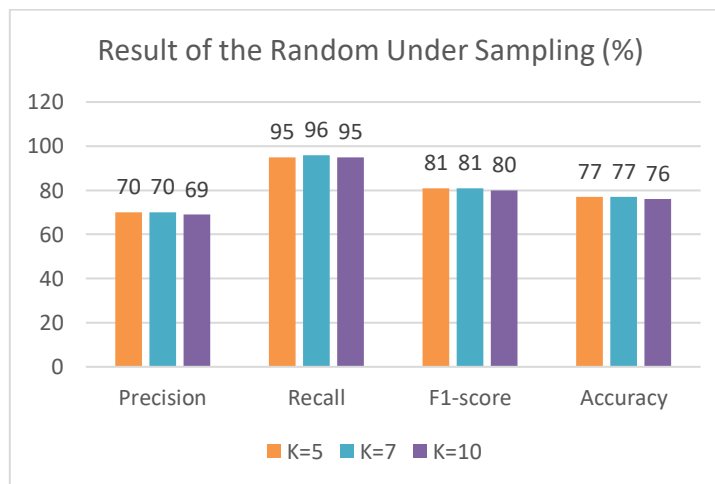


Figure 5. Performance metrics of the Random Under Sampling.

5. Conclusion

TCP/IP sends and receives data over the Internet for computers and other smart devices. Social media, online meetings, and applications are common. As financial difficulties like money transfers and electronic commerce are included all networks that receive, give, or engage the internet network must contain security. Internet technology simplifies many parts of life. Nonetheless, this situation has created huge risks. As security risks grow, so do security technology. Authentication and access control software stop unauthorized users from accessing or changing their access information by restricting access or prohibiting access entirely. Firewalls and anti-virus

software greatly reduce material and moral damages. Threats break this software. Real-time IDS protects device connectivity and detects network attacks. Network traffic and activity alert IDS to threats. Signature and anomaly-based IDSs exist. Anomaly based IDS informs network management. Signature-based IDS detects attacks by comparing connection data to the signature database. In this particular study, the objective is to identify network threats using the DL technique. The NF-BoT-IoT dataset has a skewed distribution of classes. To improve the model's performance, the imbalance ratio was decreased using SMOTE, Random Over Sampling, and Random Under Sampling techniques. The K Fold Cross Validation method was used to determine the success of the implemented procedures, with K values of 5, 7, and 10. The purpose of this research is to analyze how resampling and K-value affects output performance. The research found that both the SMOTE and Random Over Sampling techniques achieved accuracy within 77% across a range of K values. For K=5, 7, and 10, the Random Under Sampling technique achieved an accuracy of 77% and 76%. The outcomes were consistent across resampling strategies and K values. This means that as the K value for the NF-BoT-IoT dataset increases, so do the associated costs and time requirements.

Declarations

Ethical Approval The work follows appropriate ethical standards in conducting research and writing the manuscript. This work presents computational models trained with publicly available data, for which no ethical approval was required.

Competing interests The authors declare that they have no competing interests.

Authors contribution statement: The authors confirm their contribution to the paper as follows: study conception and design: Harman and Cengiz; data collection: Cengiz; analysis and interpretation of results: Harman and Cengiz; draft manuscript preparation: Harman and Cengiz. All authors reviewed the results and approved the final version of the manuscript.

Data availability and access The public dataset https://staff.itee.uq.edu.au/marius/NIDS_datasets/

References

- Aldallal, A., 2022 Toward efficient intrusion detection system using hybrid deep learning approach. *Symmetry*, 14(9), 1916. <https://doi.org/10.3390/sym14091916>
- Altunay, H.C., Albayrak, Z., 2021. Network intrusion detection approach based on convolutional neural network. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (26), 22–29. <https://doi.org/10.31590/ejosat.954966>
- Baykan, N.A., Khorram, T., 2021. Network intrusion detection using optimized machine learning algorithms. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (25), 463–474. <https://doi.org/10.31590/ejosat.849723>
- Baykara, M., Resul, D., 2019. Saldırı tespit ve engelleme araçlarının incelenmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 10(1), 57–75. <https://doi.org/10.24012/dumf.449059>
- Bedi, P., Gupta, N., Jindal, V., 2021. I-siamids: an improved siam-ids for handling class imbalance in network-based intrusion detection systems. *Applied Intelligence*, 51, 1133–1151. <https://doi.org/10.1007/s10489-020-01886-y>
- Behera, S., Pradhan, A., Dash, R., 2018. Deep neural network architecture for anomaly based intrusion detection system. In: 2018 5th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN), pp. 270–274. <https://doi.org/10.1109/SPIN.2018.8474162>
- Butun, I., Morgera, S.D., Sankar, R., 2013. A survey of intrusion detection systems in wireless sensor networks. *IEEE communications surveys & tutorials*, 16(1), 266–282. <https://doi.org/10.1109/SURV.2013.050113.00191>
- Cengiz, E., Harman, G., 2022 Dengesiz ml-tabanlı nids veri setlerinin sınıflandırma performanslarının karşılaştırılması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (41), 349–356. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1157441>
- Çetiner, H., 2021. Classification of apple leaf diseases using the proposed convolution neural network approach. *Mühendislik Bilimleri Ve Tasarım Dergisi*, 9(4), 1130–1140. <https://doi.org/10.21923/jesd.980629>
- Gülcü A., Kuş, Z., 2019. A survey of hyper-parameter optimization methods in convolutional neural networks. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(2), 503–522. <https://doi.org/10.29109/gujsc.514483>
- Idrissi, I., Boukabous, M., Azizi, M., Moussaoui, O., El Fadili, H., 2021. Toward a deep learning-based intrusion detection system for iot against botnet attacks. *IAES International Journal of Artificial Intelligence*, 10(1), 110. <https://doi.org/10.11591/ijai.v10.i1.pp110-120>
- Ilyas, I.F., Chu, X., 2019. Data Cleaning. Morgan Claypool.
- Kim, J., Kim, J., Kim, H., Shim, M., Choi, E., 2020. Cnn-based network intrusion detection against denial-of-service attacks. *Electronics*, 9(6), 916. <https://doi.org/10.3390/electronics9060916>
- Kingma, D.P., Ba, J., 2014. Adam: A method for stochastic optimization. *arXiv preprint arXiv:1412.6980* <https://doi.org/10.48550/arXiv.1412.6980>

- LeCun, Y., Bottou, L., Bengio, Y., Haffner, P., 1998. Gradient-based learning applied to document recognition. *Proceedings of the IEEE*, 86(11), 2278–2324. <https://doi.org/10.1109/5.726791>
- Mandal, D., Kösesoy, İ., 2023. Prediction of Software Security Vulnerabilities from Source Code Using Machine Learning Methods. In 2023 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU), pp. 1-6, IEEE. <https://doi.org/10.1109/ASYU58738.2023.10296747>
- Mijalkovic, J., Spognardi, A., 2022. Reducing the false negative rate in deep learningbased network intrusion detection systems. *Algorithms*, 15(8), 258. <https://doi.org/10.3390/a15080258>
- Naveed, M., Arif, F., Usman, S.M., Anwar, A., Hadjouni, M., Elmannai, H., Hussain, S., Ullah, S.S., Umar, F., 2022. A deep learning-based framework for feature extraction and classification of intrusion detection in networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/2215852>
- Otoun, Y., Nayak, A., 2021. As-ids: Anomaly and signature based ids for the internet of things. *Journal of Network and Systems Management*, 29, 1–26.
- Priyadarshini, R., Barik, R.K., 2022. A deep learning based intelligent framework to mitigate ddos attack in fog environment. *Journal of King Saud University- Computer and Information Sciences*, 34(3), 825–831 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2019.04.010>
- Söderström, A., 2021. Anomaly-based Intrusion Detection Using Convolutional Neural Networks for IoT Devices.
- Sarhan, M., Layeghy, S., Moustafa, N., Portmann, M., 2020. Netflow datasets for machine learning-based network intrusion detection systems. In: *Big Data Technologies and Applications: 10th EAI International Conference, BDTA 2020, and 13th EAI International Conference on Wireless Internet, WiCON 2020, Virtual Event, December 11, 2020, Proceedings 10*, pp. 117–135. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72802-1_9
- Sarkar, S., Chatterjee, S., Misra, S., 2015. Assessment of the suitability of fog computing in the context of internet of things. *IEEE Transactions on Cloud Computing*, 6(1), 46–5. <https://doi.org/10.1109/TCC.2015.2485206>
- Shone, N., Ngoc, T.N., Phai, V.D., Shi, Q., 2018. A deep learning approach to network intrusion detection. *IEEE transactions on emerging topics in computational intelligence*, 2(1), 41–50. <https://doi.org/10.1109/TETCI.2017.2772792>
- Sun, P., Liu, P., Li, Q., Liu, C., Lu, X., Hao, R., Chen, J., 2020. Dl-ids: Extracting features using cnn-lstm hybrid network for intrusion detection system. *Security and communication networks*, 2020, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2020/8890306>
- Tsimenidis, S., Lagkas, T., Rantos, K., 2022. Deep learning in iot intrusion detection. *Journal of network and systems management*, 30, 1–40.
- Vishwakarma, M., Kesswani, N., 2022. Dids: A deep neural network based real-time intrusion detection system for iot. *Decision Analytics Journal*, 5, 100142. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2022.100142>
- Vishwakarma, M., Kesswani, N., 2022. Dids: A deep neural network based real-time intrusion detection system for iot. *Decision Analytics Journal*, 5, 100142. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2022.100142>
- Wang, C., Wang, B., Sun, Y., Wei, Y., Wang, K., Zhang, H., Liu, H., 2021. Intrusion detection for industrial control systems based on open set artificial neural network. *Security and Communication Networks*, 2021, 1–14. <https://doi.org/10.1155/2021/4027900>
- Yang, H., Wang, F., 2019. Wireless network intrusion detection based on improved convolutional neural network. *Ieee Access*, 7, 64366–64374. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2917299>



GÜNEY MARMARA HAVZASI'NDA SWAT+ MODELİ İLE HİDROLOJİK MODELLEME

Halil Emre Kışlıoğlu^{1*}, Şehnaz Şule Kaplan Bekaroğlu¹, Filiz Dadaser-Celik²

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

² Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye

Anahtar Kelimeler Öz

Hidroloji,
SWAT+,
Marmara,
Modelleme,
Akım.

Bu çalışmada, SWAT+ hidrolojik modelinin ve SWAT+ Toolbox yazılımının Güney Marmara Havzası'ndaki performansı araştırılmaktadır. Hidrolojik modeller, hidrolojik döngüyü ve ilgili süreçleri analiz etmek için karmaşık havza yapılarını basitleştiren, su havzalarında etkili yönetim için kullanılan önemli araçlardır. Hidrolojik modeller, su yönetiminden hidrolojik araştırmalara kadar geniş bir uygulama alanına sahiptir. Hidrolojik modellerin özellikle son yıllarda kuraklık, taşkın, iklim değişikliği ve arazi kullanım değişikliği gibi nehir akımları ve diğer hidrolojik parametreler üzerindeki etkileşimini inceleyen çalışmalarda sıklıkla kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışmada SWAT modelinin gelişmiş versiyonu olan SWAT+ ve SWAT+ Toolbox Türkiye özelinde uygulanmıştır; temel SWAT modeli Türkiye'de yaygın olarak kullanılsa da Swat+ modeli Türkiye'de henüz uygulanmamıştır. Bu araştırmanın temel amacı, SWAT+ ve SWAT+ Toolbox'ın Güney Marmara Havzası'ndaki performansını istatistiksel göstergeler kullanarak değerlendirmektir. Meteoroloji, toprak özellikleri, topoğrafya ve arazi kullanımı gibi havzadaki çeşitli faktörler hakkında ayrıntılı veri gerektiren SWAT+ hidrolojik modeli Güney Marmara havzasında başarıyla uygulanmıştır. SWAT+ modeli, SWAT modeline göre daha gelişmiş ve esnek olacak şekilde tasarlanmış olup, model dosyalarında herhangi bir ek değişiklik yapmadan kalibrasyon işleminin entegre bir şekilde yürütülmesine olanak sağlayan SWAT+ Toolbox'ın, model kurulumunda önemli avantajlar sağladığını görülmüştür. Araştırmada, modelin performansının hem kalibrasyon döneminde (NSE 0,596) hem de doğrulama döneminde (NSE 0,516) kabul edilebilir seviyenin üzerinde olduğunu, PBIAS değerlerine göre ise kalibrasyon döneminde modelin hafif yüksek tahmine (PBIAS %1,74) ve doğrulama döneminde düşük tahmine (PBIAS %-9,64) işaret ettiğini görülmektedir. Bu çalışma, Türkiye'de SWAT+ modelinin ve SWAT+ Toolbox'ın temel SWAT modeline benzer başarısını ortaya koyan ilk çalışmadır. SWAT+ modelinin sağladığı esneklik ve ek işlevler, Türkiye'deki hidrolojik modelleme çalışmalarına katkı sağlayacaktır. Bulgular, SWAT+ modelinin Türkiye'deki hidrolojik çalışmalarda başarıyla kullanılabileceğini göstermektedir.

HYDROLOGICAL MODELLING IN THE SOUTHERN MARMARA BASIN USING SWAT+

Keywords

Hydrology,
SWAT+,
Marmara,
Modelling,
Flow.

Abstract

This study investigates the performance of the SWAT+ hydrological model and the SWAT+ Toolbox in the South Marmara Basin. Hydrological models are crucial tools for effective management in water basins, simplifying complex basin structures to analyze the hydrological cycle and related processes. Hydrological models have application range from water resource planning to hydrological research. Especially in recent years hydrological models are frequently used in studies examining the interaction of drought, flood, and climate change and land use change on flow rates and other hydrological parameters. This research investigates the application of the advanced version of the SWAT model, SWAT+, and the SWAT+ Toolbox in Türkiye, despite the widespread use of the basic SWAT model, Swat+ model has not been utilized in Türkiye. The primary aim of this research is to evaluate the performance of SWAT+ and SWAT+ Toolbox in the South Marmara Basin using performance indicators. SWAT+ hydrological model successfully implemented in the South Marmara basin, which requires detailed data on various factors in the basin such as meteorology, soil properties, topography, and land use. SWAT+ model is designed to be more advanced and flexible than the SWAT model, and we found that SWAT+ Toolbox, which allows the calibration process to be run in an integrated manner without making any additional changes in the model files, provide significant advantages in model setup and operation. Our findings indicate that the performance of the model is above the acceptable level in both the calibration period (NSE 0.596) and the validation period (NSE 0.516), with PBIAS values indicating slight overestimation (PBIAS 1.74%) during calibration and underestimation (PBIAS -9.64%) during validation. This study is the first to demonstrate the similar success of the SWAT+ model and the SWAT+ Toolbox to the basic SWAT model in Türkiye. The flexibility and additional functions provided by the SWAT+ model will contribute to hydrological modeling studies in Türkiye finding indicates that the SWAT+ model can be successfully used in hydrological studies in Türkiye.

* İlgili yazar / Corresponding author: halilemre.kislioglu@tarimorman.gov.tr, +90-246-211-1267

Alıntı / Cite

Kışhoğlu, H.E., Kaplan Bekaroğlu, ŞŞ., Dadaser-Celik, F., (2024). Güney Marmara Havzası'nda SWAT+ Modeli ile Hidrolojik Modelleme, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 12(3), 531-543.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

Halil Emre Kışhoğlu, 0000-0002-1852-6970
Şehnaz Şule Kaplan Bekaroğlu, 0000-0003-0917-7219
Filiz Dadaser-Celik, 0000-0003-3623-7723

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	26.04.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date	19.07.2024
Kabul Tarihi / Accepted Date	10.08.2024
Yayın Tarihi / Published Date	26.09.2024

HYDROLOGICAL MODELLING IN THE SOUTHERN MARMARA BASIN USING SWAT+

Halil Emre KİŞLİOĞLU[†], Şehnaz Şule Kaplan BEKAROĞLU¹, Filiz Dadaser-CELİK²

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

² Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye

Highlights

- This study uses SWAT+ and Toolbox in Türkiye, an advanced version of the widely used SWAT model
- The model shows satisfactory performance with a NSE higher than 0.5.
- SWAT+ and Toolbox, found to be successful as SWAT, offer flexibility and functions for hydrological studies in Türkiye.

Purpose and Scope

The main aim of the research is to evaluate the performance of the SWAT+ model and the SWAT+ Toolbox in the Southern Marmara Basin using statistical performance indicators. This research also aims to provide a foundation for future academic studies in Türkiye by evaluating the SWAT+ model and the SWAT+ Toolbox.

Design/methodology/approach

The objectives are achieved by setting up the SWAT+ hydrological model for the Southern Marmara Basin. The calibration process is performed using the SWAT+ Toolbox v0.7.6 by using the Dynamically Dimensioned Search (DDS) algorithm. The theoretical scope of the paper involves hydrological modeling and the practical application of the SWAT+ model and SWAT+ Toolbox.

Findings

Our findings indicate that the SWAT+ model and the SWAT+ Toolbox performed as well as the basic version of the SWAT model. The SWAT+ model provides more flexibility and various functions that will contribute to hydrological modeling studies in Türkiye. The model outputs were evaluated using statistical indicators, and it was found that the model successfully simulated flow.

Research limitations/implications

This research is limited to the Southern Marmara Basin and utilizes available data. Future research could potentially use novel data sources such as global reanalysis data.

Practical implications

Our research shows that the SWAT+ model and the SWAT+ Toolbox can be successfully used in Türkiye, given the data availability and sufficient performance. The flexibility and additional functions provided by the SWAT+ model would enhance modeling in different scenarios. We suggest that the use of the SWAT+ model and SWAT+ Toolbox should be considered in future hydrological modeling studies in Türkiye.

Social Implications (if applicable)

Hydrological modeling tools could support more effective water resource management, which could potentially improve the quality of life for people dependent on these water resources.

Originality

This research utilizes the SWAT+ model coupled with the SWAT+ Toolbox for hydrological modeling in the Southern Marmara Basin. This is the first time that these tools have been used in Türkiye. The paper demonstrates that these tools can provide results comparable to the basic version of the SWAT model, which has been widely used in the country. Our research provides a foundation for future academic studies using the SWAT+ model and the SWAT+ Toolbox.

[†] Corresponding author: halilemre.kislioglu@tarimorman.gov.tr, +90-246-211-1267

1. Giriş (Introduction)

Su havzalarında etkili bir yönetim için toprak, su ve atmosfer arasındaki karmaşık etkileşimin anlaşılması gerekmektedir (Fıstıkoğlu, 1999). Hidrolojik modeller, karmaşık havza yapısını basitleştirerek, hidrolojik döngüyü ve ilgili süreçleri analiz etmekte kullanılan önemli araçlardır (Singh ve Woolhiser, 2002). Havzalardaki temel hidrolojik değişkenlerin analiz edilebilmesi için 19. yüzyılda geliştirilen rasyonel metot; (Mulvaney, 1850) zamanla gelişen bilgisayar teknolojisi ile, havzanın matematiksel ifadeler ile temsil edilebildiği Stanford Watershed Model (Crawford ve Linsley, 1966) modeline bir gelişim süreci göstermiştir (Peker ve Cüceloğlu, 2022). Günümüzde ise birçok farklı hidrolojik modeller geliştirilmiş olup, bu modeller genel çerçevede üç ana sınıfta incelenebilir: yağış-akış ilişkisinin ampirik olarak incelendiği metrik modeller, yağış-akış ilişkisinin matematiksel olarak kavramsallaştırıldığı ve her bir hidrolojik model biriminin bu akış ilişkisine göre ayarlandığı kavramsal modeller ve model simülasyonunun fizik yasaları, enerji ve su bilançosu hesaplamalarına göre yapıldığı fiziksel modeller (Duygu, 2021). Son yıllardaki hidrolojik modellerdeki bu gelişmeyi bilim insanları "Hidrolojik Model Bolluğu (Plethora of hydrological models)" olarak tanımlamaktadır (Clark vd., 2011). Bu model çeşitliliği doğal sistemlerdeki heterojenliklerin ölçülmesi ve temsil edilebilmesindeki zorluklara bağlanabilen, havza ölçeğindeki çevresel dinamiklerle ilgili yetersiz bilimsel kavrayışın bir belirtisidir (Clark vd., 2011). Modellerin bu çeşitliliği, kullanım alanlarındaki farklılıklardan ve bu kullanım alanlarındaki özel gereksinimlerden de kaynaklanmaktadır. Hamalainen (2015) buna paralel olarak her ihtiyacı karşılayabilecek tek bir geçerli model olmadığını vurgulamaktadır.

Hidrolojik modeller su kaynaklarının planlanmasından hidrolojik araştırmalara uzanan geniş bir kullanım alanına sahiptir. Son yıllarda havzalardaki değişimlerin, kuraklık, taşkın ve iklim değişikliğinin akış ve diğer hidrolojik parametrelere olan etkileşiminin incelendiği çalışmalarda hidrolojik modeller sıklıkla kullanılmaktadır (Zang vd., 2017). SWAT (Soil and Water Assessment Tool – Toprak ve Su Değerlendirme Aracı) modeli, nehir havzası ölçeğinde kullanılan fiziksel bir hidrolojik modeldir. Havzadaki meteorolojik, toprak özellikleri, topografya, arazi kullanımı gibi çeşitli faktörler hakkında ayrıntılı veriler gerektiren bu model, disiplinler arası havza modellenmesi için uluslararası ve ulusal düzeyde yaygın olarak kullanılan, kabul görmüş bir modeldir (Swalih ve Kayha, 2020; Peker ve Cüceloğlu, 2022). Öte yandan, Peker ve Cüceloğlu'nun 2022 yılındaki çalışmasında SWAT modelinin, açık kaynak yapısı, kapsamlı destek kaynakları ve CBS ortamlarıyla entegrasyonu nedeniyle ülkemizdeki araştırmacılar tarafından yaygın olarak tercih edildiği ortaya konulmuştur. SWAT modeli son yıllarda detaylı bir revizyon süreci geçirmiş ve SWAT+ adında yeni bir versiyon ortaya çıkmıştır (Biergen vd., 2016). SWAT+ su kaynakları yönetimindeki mevcut ve gelecekteki zorlukları ele almayı ve kodlamayı geliştirmeyi, veri analizini ve görselleştirmeyi desteklemeyi ve havzalar içindeki mekânsal temsili geliştirmeyi amaçlamaktadır. Aynı zamanda, SWAT'a kıyasla yönetim programlarını tanımlama, bileşenleri öteleme ve yönetilen akış sistemlerini doğal akış ağına bağlama ve mekânsal temsil konusunda daha fazla esneklik sunmaktadır (Biergen vd., 2016).

SWAT+ modeli, belirsizliklerin azaltılması ve model etkinliğinin sağlanması için gerekli olan parametre kalibrasyonu, hassasiyet ve belirsizlik analizi gibi karmaşık süreçleri içerir. Kalibrasyon süreci, gözlemlenen verileri kullanarak parametreleri ayarlarken, doğrulama süreci bu parametreleri değiştirmeden model sonuçlarını gözlemlerle karşılaştırır. Bu çalışmalar, uzmanlık ve zaman gerektirir ve manuel olarak veya optimum parametre değerlerini bulmak için optimizasyon algoritmaları kullanılarak otomatik olarak yapılabilir. SWAT+ ve SWAT modellerinin kalibre edilmesi ve doğrulanması için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir (Harifidy vd., 2024). Günümüzde SWAT modelini kalibre etmek ve doğrulamak için SWAT-CUP (Abbaspour vd., 2007), IPEAT+ (Yen vd., 2019), R-SWAT (SWAT için R ortamı) (Nguyen vd., 2022), SWAT+ Editor (Bieger vd., 2017) ve SWAT + Toolbox (Chawanda, 2021) gibi yazılımlar ve/veya araçlar geliştirilmiştir.

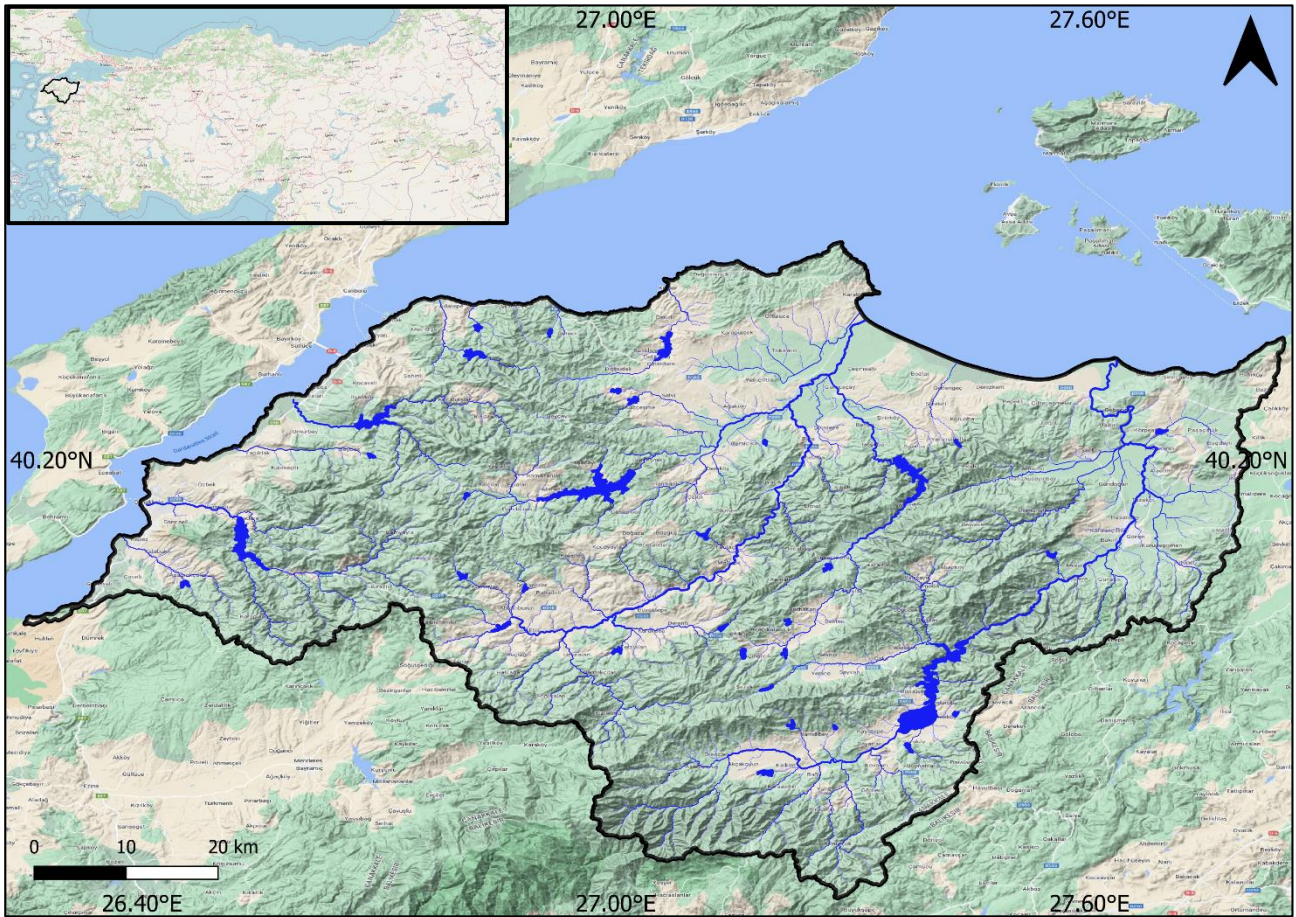
Peker ve Cüceloğlu (2022) çalışmalarında, Türkiye'de SWAT modelinin kullanıldığı çalışmaları incelemiş ve kalibrasyon ve doğrulama sonuçlarının genellikle tatmin edici eşiği aştığını belirtmiş (R^2 ve NSE değerleri 0,5'in üstünde) ve SWAT modelinin Türkiye'de incelenen havzalar için kabul edilebilir sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur. Güncel çalışmalar incelendiğinde, Türkiye'de SWAT modeli çeşitli havzalarda başarıyla uygulandığı görülmektedir. Oruç ve diğerleri (2022), Saz-Çayırova havzasında toprak verisi kalitesinin SWAT modeli akış tahmin performansı üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur. Keleş Özgenç (2024) ise Gala Gölü Havzası'nda arazi kullanımı ve arazi örtüsü değişikliklerinin hidrolojik süreçler üzerindeki etkilerini SWAT modeli ile değerlendirmiştir. Jauma ve Dadaser-Celik, 2021 yılında yaptıkları çalışmada, Swat modelini yarı kurak iklimde sahip ve akışların üzerinde insan müdahalesi olan kapalı bir havzada kullanarak SWAT modelinin tatmin edici sonuçlar verdiğini değerlendirmiştir. Bu çalışmalar, SWAT modelinin Türkiye'deki çeşitli hidrolojik ve çevresel süreçleri modellemede etkinliğini ortaya koymaktadır. Ülkemizde SWAT modeli genel olarak başarılı sonuçlar elde edilmiş olsa da SWAT modelinin gelişmiş versiyonu olan SWAT+ modelinin yapılan literatür aramasında henüz ülkemizde uygulanmadığı görülmektedir. Buna ek olarak, SWAT modeli Güney Marmara Havzası'nda daha önce uygulanmamıştır. Literatür incelendiğinde SWAT+ Toolbox yazılımının da ülkemizdeki çalışmalarda henüz kullanılmadığı görülmüştür. Bu kapsamda bu çalışmanın temel amacı; SWAT+ ve SWAT+ Toolbox yazılımının

Güney Marmara Havzası'ndaki performansının literatürdeki performans göstergeleri kullanılarak değerlendirilmesidir. Buna paralel olarak bu çalışmadaki ana araştırma sorusu, "Güney Marmara Havzası'ndaki akarsu akışının simüle edilmesinde SWAT+ modeli ve SWAT+ Toolbox yazılımının performansı hangi düzeydedir?" olarak belirlenmiştir. SWAT+ modelinin SWAT modeline göre daha gelişmiş ve esnek olması ve modelleme çalışmalarının en karmaşık noktalarından biri olan kalibrasyon aşamasının SWAT+ ile tam uyumlu SWAT+ Toolbox ile model dosyalarında ek bir değişiklik yapılmadan bütünleşik bir biçimde çalıştırılabilir olması model kurulumunda ve çalıştırılmasında ciddi avantajlar sağlamaktadır. Bu bağlamda, ülkemizde SWAT+ modelinin ve SWAT+ Toolbox yazılımının değerlendirilmesi gelecekteki akademik çalışmalar için bir altlık olacaktır.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

2.1. Çalışma Alanı (Study Area)

Güney Marmara Havzası Türkiye'nin kuzeybatısında bulunur (Şekil 1). Havza Çanakkale ve Balıkesir illerinin bir kısmını kapsamaktadır. Güney Marmara havzasındaki başlıca akarsular; Gönen Çayı, Biga Çayı, Umurbey Çayı, Çanakkale Çayı'dır. Havzada aktif olarak kullanılan 40'tan fazla depolama tesisi mevcuttur. Bu depolama tesislerinden en önemlileri, Bakacak Barajı, Taşoluk Barajı, Atikhisar Barajı, Umurbey Barajı, Bayramdere Barajı, Kaynarca Barajı ve Gönen Barajı'dır. Hidrolojik modelleme çalışması 5541 km²'lik bir alanda yürütülmüştür. Havzadaki uzun yıllar ortalama yağış 615 mm ve en yağışlı aylar Kasım, Aralık ve Ocak aylarıdır.



Şekil 1. Çalışma Alanı (Güney Marmara Havzası) (Study Area (South Marmara Basin))

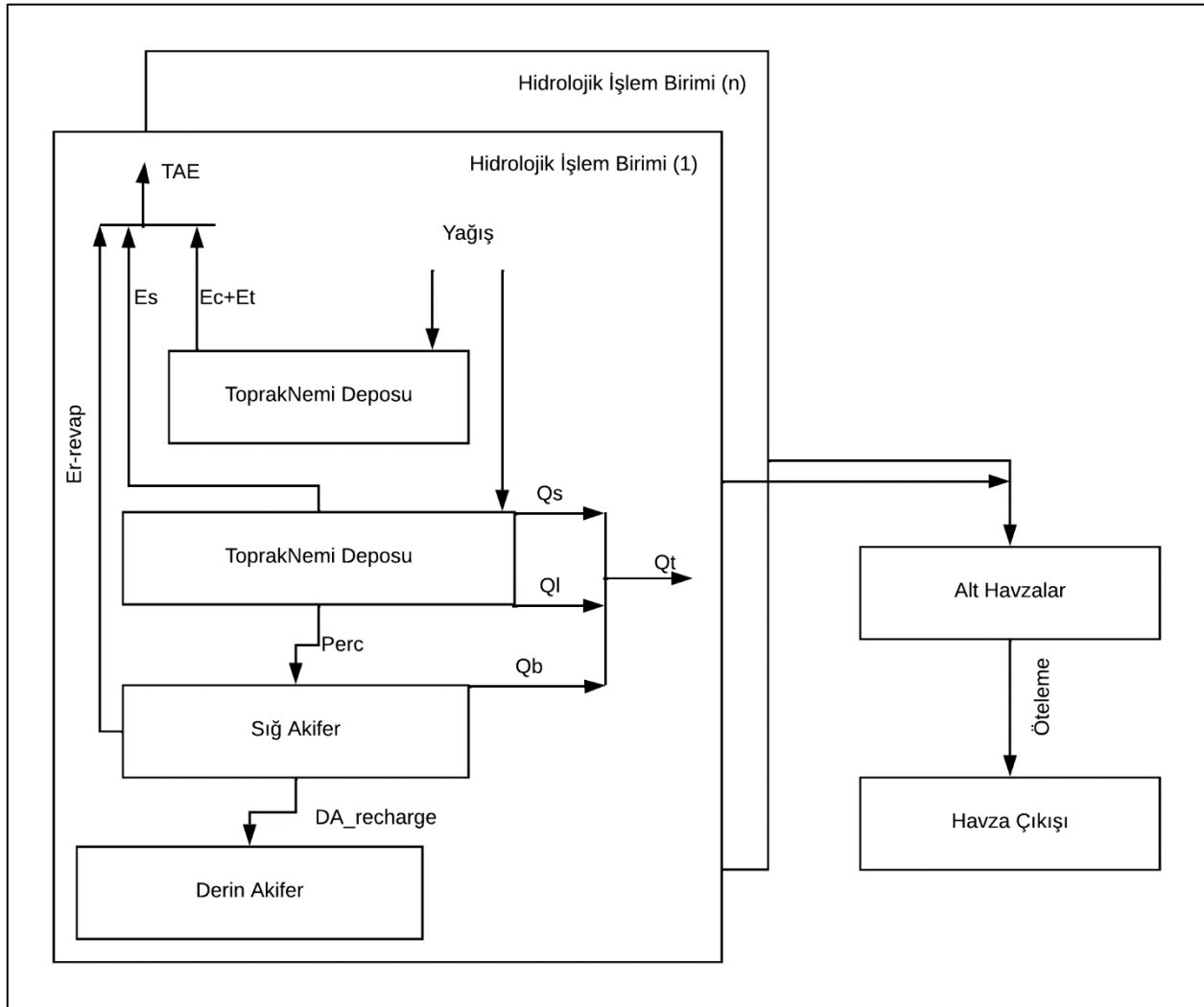
2.2. Modelin Tanımlanması (Model Description)

SWAT+ modeli fiziksel tabanlı, yarı-dağılımlı bir hidrolojik modeldir. SWAT+ modelinin temel hidrolojik bütçe denklemi Denklem 1’de verilmektedir.

$$\text{Depolamadaki Değişim SWAT+} = P - \text{Surq} - \text{Pr} - \text{Latq} - \text{ET} \quad (1)$$

Burada: P yağış; Surq yüzeysel akış; Pr sızma; Latq yatay akış ve ET evapotranspirasyondur.

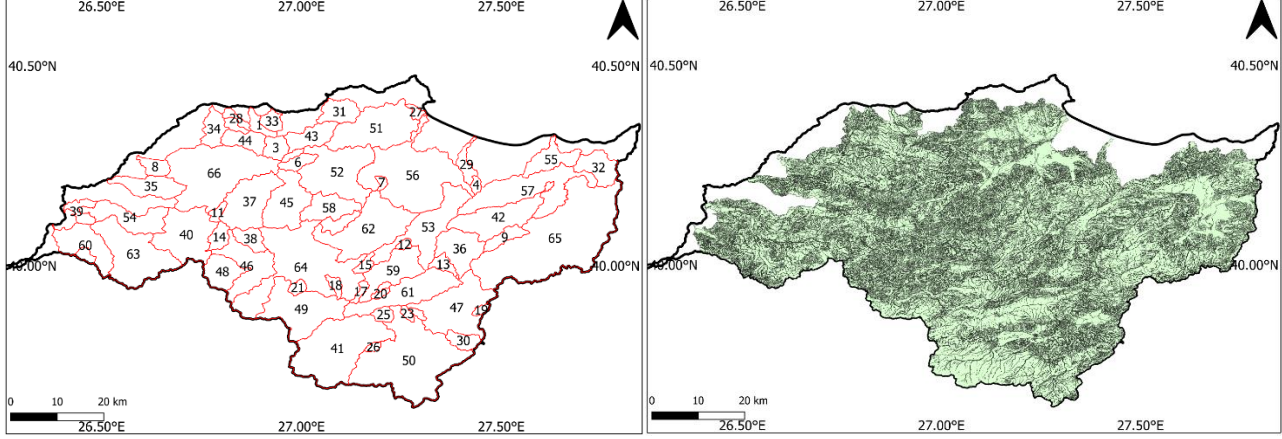
SWAT modelinin şematik gösterimi Şekil 2’de verilmektedir. Buna göre hidrolojik süreç, yağış ile başlamaktadır. Şematik gösterimdeki kutular depolama birimi olarak kullanılır. Yağış örtü katmanına ve toprak yüzeyinde düşer ve buradan bitkiden terleme (Et) ve örtü yüzeyinden buharlaşma (Ec) ile bir kısmı kayıp olur. Toprak nemi deposundaki (SM) suyun bir kısmı toprak yüzeyinden buharlaşır (Es) diğer kısmı ise sızma ile (Perc) sığ akifer deposuna (SA) boşalırken diğer kısmı yüzeysel ve yanal akış ile toplam akışa katılır (Qs ve Ql). Sığ akiferdeki suyun bir kısmı baz akım (Qb) olarak toplam akışa katılır ve bir kısmı da derin akifere (DA) geçip hidrolojik süreçten çıkar. Sığ akiferdeki suyun bir diğer kısmı da kapiler kuvvet tarafından çekilerek buharlaşmaya eklenir (Er).



Şekil 2. SWAT Modeli Şematik Gösterimi. TAE toplam gerçek evapotranspirasyon; Ec örtü yüzeyinden buharlaşma, Es toprak yüzeyinden buharlaşma; Et bitkilerden terleme, Perc toprak nemi deposundan sığ akifere sızma; Er-Revap sığ akiferden buharlaşma; Qt toplam akış; Qb baz akım; Ql yanal akış ve Qs yüzeysel akış. (Marhaento vd., 2017’den düzenlenmiştir.) (Schematic Representation of SWAT Model TAE total actual evapotranspiration; Ec evaporation from the canopy surface, Es evaporation from the soil surface; Et transpiration from plants; Perc infiltration from soil moisture storage to the shallow aquifer; Er-Revap evaporation from the shallow aquifer; Qt total flow; Qb base flow; Ql lateral flow and Qs surface flow. (modified from Marhaento vd., 2017.)

2.3 Hidrolojik İşlem Birimleri ve Girdi Verileri (Hydrologic Response Units and Input Data)

SWAT+ modeli su döngüsü bileşenlerini tahmin etmek için geliştirilmiş fiziksel tabanlı yarı dağılımlı bir hidrolojik modeldir (Arnold ve Allen, 1996; Zhang vd., 2016; Singh ve Saravanan, 2020). SWAT+ modeli dijital yükseklik modeli ile birlikte akarsu ağlarını kullanarak havzayı oluşturur. Oluşturulan havza daha sonra alt havzalara ve daha küçük birimler olan hidrolojik yanıt birimlerine (HRUs) ayırır (Şekil 3). Bu modelleme çalışmasında 66 alt havzada toplamda 3975 HRU oluşturulmuştur.



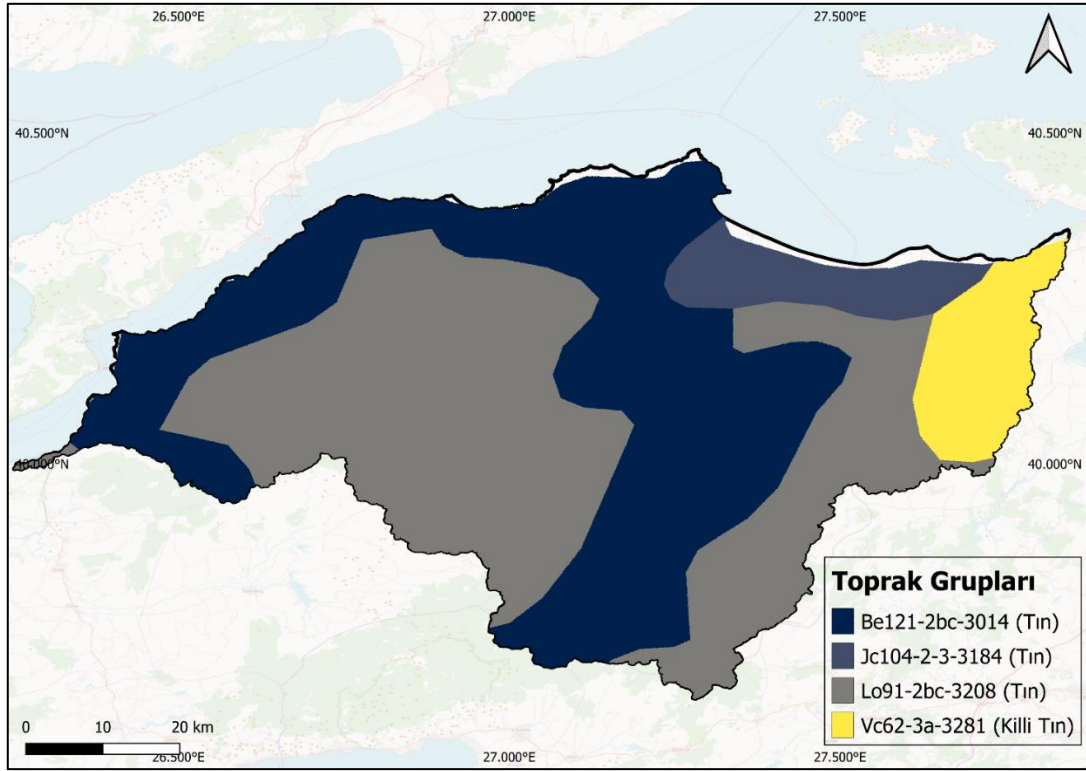
Şekil 3. Alt Havzalar (sol) ve Hidrolojik Yanıt Birimleri (sağ). (Sub Basins (left) and Hydrological Response Units (right))

HRU'lar su bütçesi denkleminde yararlanılarak ve birimin toprak kullanımı, toprak tipi ve eğim gibi parametreleri hesaba katarak yüzey akışı, sızma, buharlaşma gibi hidrolojik değişkenleri simüle etmek için kullanılan en küçük birimlerdir. SWAT modelinin çalışma prensibi ile ilgili ayrıntılı teknik bilgilere modelin teknik belgesinden ulaşılabilir (Dile vd., 2022).

Model için kullanılan veriler Tablo 1'de verilmiştir. SWAT+ modelinin önemli bir girdisi olan toprak verisi için Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) verileri (Fischer vd., 2008) kullanılmıştır. FAO veri tabanından indirilen vektör biçimindeki veriler raster (geoTiff) formatına dönüştürülmüştür. Raster formatındaki yeni veri öznitelikleri toprak gruplarına göre tekrar kodlanmış ve SWAT+ modeline uygun hale getirilmiştir. Toprak gruplarının SWAT+ modeli tarafından okunabilmesi için, model veri tabanında ilgili toprak gruplarına ait bilgilerin bulunması gerekmektedir. Projedeki toprak gruplarının öncelikle SWAT+ veri tabanındaki varlığı tespit edilmiş, ardından eksik olan toprak gruplarının öznitelik bilgileri SWAT+ veri tabanına eklenmiştir. Şekil 4'de gösterildiği üzere çalışma alanında 4 farklı büyük toprak grubu bulunmaktadır. Havzadaki baskın toprak grupları Lo91-2bc-3208 ve Be121-2bc-3014 olarak tespit edilmiştir.

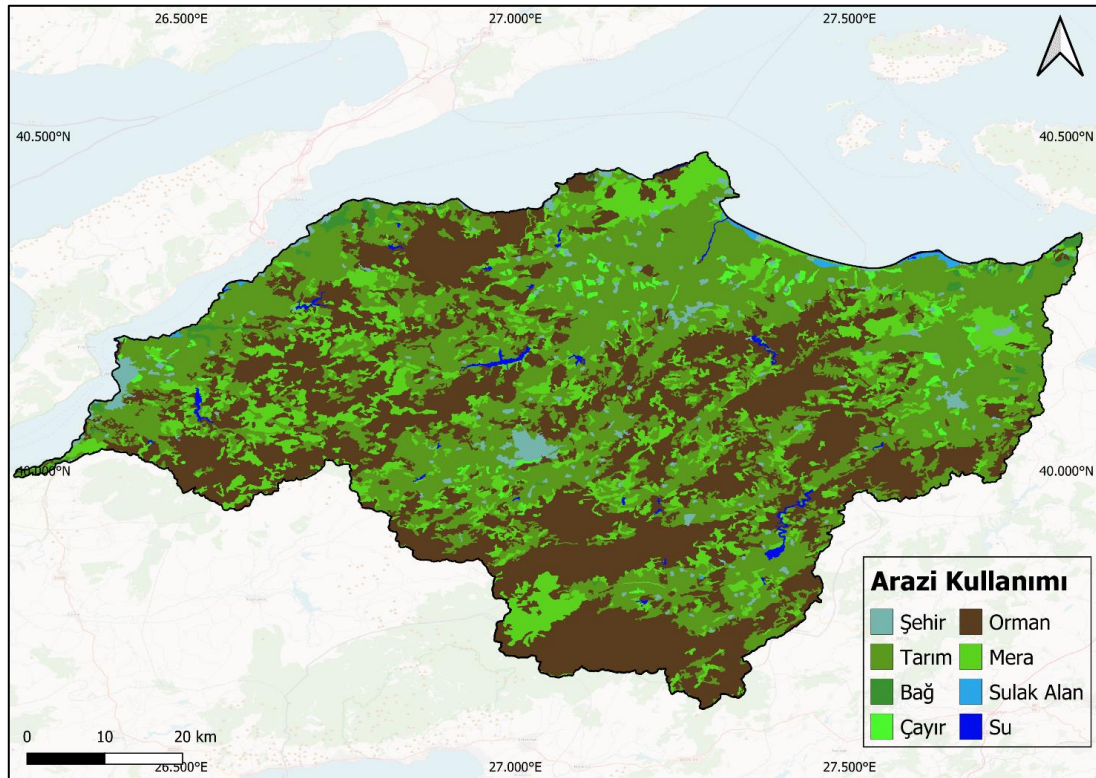
Tablo 1. Veriler (Data)

VERİ	TANIM	YIL/DÖNEM	KAPSAM / ÇÖZÜNÜRLÜK	KAYNAK
Dijital Yükseklik Modeli	EU-DEM	2011	25m x 25m	https://land.copernicus.eu/en
Büyük Toprak Grupları	HWSD v2.0 (Harmonized World Soil Database) FAO-UNESCO	2023	Havza ölçeği	FAO- https://www.fao.org/soils-portal
Arazi Kullanımı	CORINE (Coordination of Information on the Environment)	2018	Havza ölçeği	https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/
Meteoroloji Verileri	Meteorolojik İstasyon Verileri	1980 -2021	Günlük veri	MGM- https://www.mgm.gov.tr/
Akım Verileri	Doğallaştırılmış Akım Verileri	1980 -2021	Aylık Veri	DSİ- https://www.dsi.gov.tr/



Şekil 4. Güney Marmara Havzası Toprak Grupları (FAO, Harmonized world soil database, 2022) (South Marmara Basin Soil Groups (FAO, Harmonized world soil database, 2022))

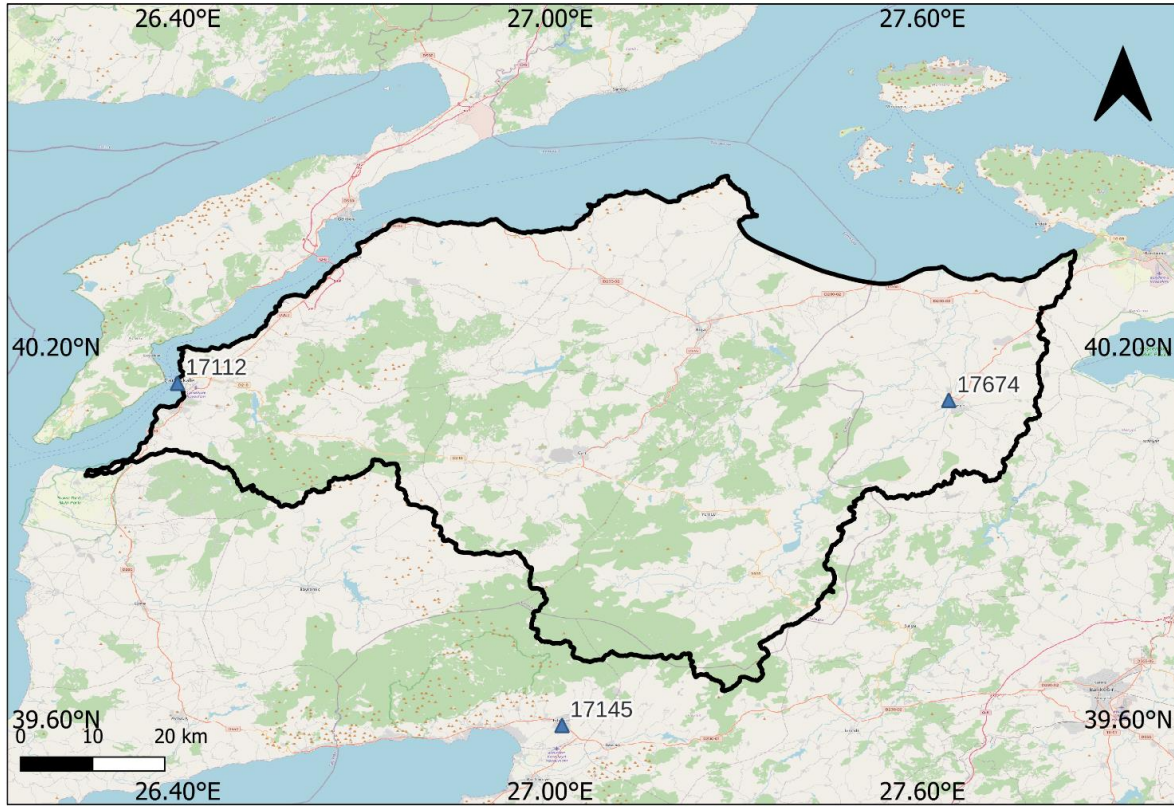
Arazi kullanımı için CORINE 2018 verileri Avrupa Çevre Ajansı'ndan (EEA) temin edilmiştir. CORINE verilerinin SWAT+ modeli tarafından kullanılması için arazilerin yeniden sınıflandırılması gerekmektedir, bu işlem QGIS uygulaması üzerinden kodlama yapılarak gerçekleştirilmiş ve araziler 8 farklı sınıf olacak şekilde tekrar sınıflandırılmıştır (Şekil 5).



Şekil 5. Güney Marmara Havzası Arazi Kullanımı (South Marmara Basin Land use)

Meteorolojik veriler ise Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden temin edilmiştir. Modelleme kapsamında veri varlığı ve kalitesi gözlemlenerek N17112, N17674, N17145 kodlu meteoroloji gözlem istasyonları kullanılmıştır (Şekil 6).

Meteorolojik veriler 1980-2021 yılları aralığı için günlük; yağış, maksimum ve minimum sıcaklık, bağıl nem, rüzgâr hızı verilerini kapsamaktadır.



Şekil 6. Meteoroloji İstasyonları (Meteorological Stations)

2.4 Model Performans Değerlendirilmesi (Model Performance Analysis)

Model performansının değerlendirilmesi için literatürde birçok değişik istatistiksel gösterge bulunmaktadır. Bu çalışmada, literatürde hidrolojik model performansının belirlenmesinde en çok kullanılan göstergelerden olan Nash Sutcliffe etkinlik katsayısı (NSE) amaç göstergesi olarak, Kök Ortalama Kare Hatası (RMSE) ve Yüzde Sapma (PBIAS) ise yardımcı göstergeler olarak kullanılmıştır.

NSE hidrolojik modellerdeki tahminlerin hatalarını hesaplamak için oluşturulmuş istatistiksel bir göstergedir (Nash ve Sutcliffe, 1970). NSE değeri $-\infty$ ile 1 arasında değişir. NSE katsayısı 1 olduğunda model tahminin mükemmel bir uyum sağladığı ve 1'e yaklaştıkça modelin tahmininin iyileştiği anlamına gelmektedir. Çalışma kapsamında NSE denklem 2 ile hesaplanmıştır.

$$NSE_x = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Xsim(t) - Xobs(t))^2}{\sum_{t=1}^T (Xobs(t) - Xobsmean)^2} \quad (2)$$

Denklem (2)'de Xobs: Gözlenen akımı, Xsim: Modellenen akımı (simüle akım), Xobsmean: Gözlenen akım ortalaması, Xobs(t): Akımın t anındaki gözlenen değeri, Xsim(t): Modellenen akımın t anındaki değerini göstermektedir.

Bu çalışmada NSE temel performans göstergesi olarak kullanılmıştır. Genel olarak 0 ile 1 arasındaki değerler kabul edilebilir değerlerdir. Sıfırın altındaki değerler modelin performansının kabul edilemeyecek düzeyde olduğunu gösterir. Öte yandan, NSE'nin tavsiye edilen değerleri incelendiğinde 0.50 değeri ve altının yetersiz, 0.50 ile 0.65 aralığının yeterli, 0.65 ile 0.75 aralığının iyi, 0.75 ile 1 aralığının mükemmel olduğu belirtilmektedir (Moriasi vd., 2007).

RMSE, modellenen değişkenin ortalama hatasını gösterir (Armstrong ve Collopy, 1992). Mükemmel bir tahmin $RMSE=0$ sonucunu verirken, bu değer sıfıra yaklaştıkça modelin tahmininin iyileştiği anlamına gelir. Çalışma kapsamında RMSE Denklem 3 ile hesaplanmıştır.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (3)$$

Denklem (3)'de x ve y karşılaştırılan verileri, n verilerin sayısını göstermektedir.

PBIAS, simüle akımların gözlemlerden sapma miktarının bir göstergesidir. Mükemmel bir tahminde PBIAS=0 olur. Ayrıca PBIAS değeri 0'a yaklaşması modelin tahmininin iyileştiği anlamına gelir. Çalışma kapsamında PBIAS Denklem 4 ile hesaplanmıştır.

$$PBIAS = \frac{\sum_{t=1}^t Xobs(t) - \sum_{t=1}^t Xsim(t)}{\sum_{t=1}^t Xsim(t)} \cdot 100 \quad (4)$$

Denklem (4)'de, Xobs(t): Akımın t anındaki gözlenen değeri, Xsim(t): Modellenen akımın t anındaki değerini göstermektedir.

2.5. Kalibrasyon ve Doğrulama (Model Calibration and Validation)

SWAT+ modelinde birçok parametre bulunmaktadır; dolayısı ile bu parametrelerin el ile kalibrasyonu çok karmaşık ve zaman alan bir süreçtir. Bu nedenle, bu çalışmada SWAT+ Toolbox v0.7.6 (Chawanda, 2021) kullanılarak Dynamically Dimensioned Search (DDS) algoritması yardımıyla kalibrasyon işlemi tamamlanmıştır. DDS algoritması kalibre edilmek istenen parametreler için öncelikle daha geniş aralıklarda değerler belirler. Ardından dinamik ve olasılıksal azaltma tekniklerini kullanarak değerleri bulunan en iyi değer yakınlarında iterasyon sayısı kadar değiştirerek amaç fonksiyonunu en iyi değere çıkartmaya çalışır (Tolson ve Shoemaker, 2007).

SWAT+ modelinin başarılı bir şekilde çalışabilmesi için tüm girdilerin modelin formatına uygun ve eksiksiz olarak girilmesi gerekmektedir. Modelin kurulumu yapıldıktan sonra modelin çalıştırılması ve değerlendirilmesi için, ısınma, kalibrasyon ve doğrulama dönemlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada ısınma dönemi 3 yıl (1980-1982), kalibrasyon dönemi 18 yıl (1983-2000) ve doğrulama dönemi 20 yıl (2001-2021) olarak seçilmiştir. Kalibrasyon için seçilen parametreler Tablo 2'de verilmiştir. Kalibrasyon sürecinde amaç fonksiyonu için NSE göstergesinin yükseltilmesi (1'e yaklaşması) hedeflenmiştir.

Tablo 2. Kalibrasyon Parametreleri ve Değerleri (Calibration Parameters and Values)

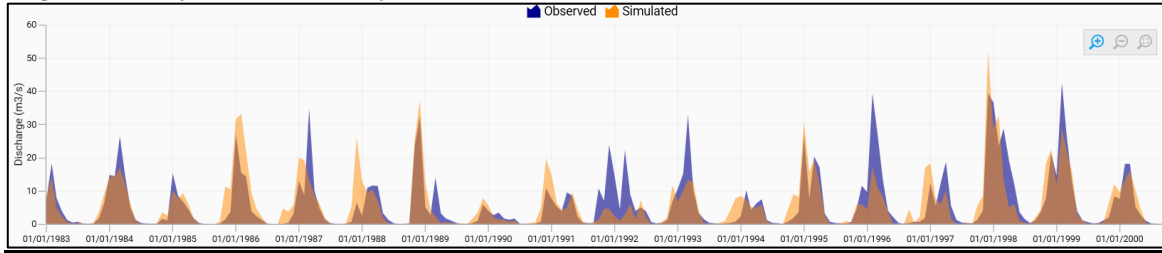
PARAMETRE	PARAMETRE GRUBU	BİRİM	KALİBRASYON DEĞERİ
alpha	Aqu	days	-5.389
awc	sol	mm_H20/mm	7.673
bd	sol	mg/m**3	-16.769
bd	rte	mg/m**3	2.148
canmx	hru	mm/H20	-18.961
chd	rte	m	28.588
chl	rte	km	-21.116
chw	rte	m	6.723
cn2	hru	no unit	-18.512
cn3_swf	hru	no unit	0.901
elev	hru	m	-5.062
epco	hru	no unit	0.014
esco	hru	no unit	0.535
flo_min	aqu	mm	-18.301
lat_len	hru	m	7.352
lat_ttime	hru	days	6.302
perco	hru	fraction	0.825
petco	hru	fraction	27.062
revap_co	aqu	no unit	0.179
slope	hru	m/m	-17.881
snofall_tmp	hru	degrees	0.965
snomelt_lag	hru	no unit	0.337
snomelt_max	hru	mm/deg/c/day	2.103
snomelt_min	hru	mm/deg/c/day	4.727
snomelt_tmp	hru	degrees	2.179
usle_p	hru	no unit	-8.395
z	sol	mm	-4.288

SWAT+ Toolbox, gelişmiş görselleştirme için QGIS ile entegrasyonuna sahiptir ve ayrıca hassasiyet analizi ve kalibrasyon için kapsamlı işlevler sunar. Kullanıcı dostu bir arayüz, çoklu nokta kalibrasyon desteği, çeşitli hassasiyet analizi yöntemleri ve potansiyel sorunları belirlemek için modelleme kontrol özellikleri sunar (Chawanda, 2021). QGIS entegrasyonu, verilerin daha iyi yorumlanmasını kolaylaştırarak gelişmiş görselleştirme ve kolay erişilebilirlik sağlar (Harifidy ve diğerleri, 2024; Pulighe ve diğerleri, 2021). SWAT+ Toolbox, tek bir platform üzerinde hassasiyet analizi, manuel ve otomatik kalibrasyon yapma yeteneğine sahiptir (Harifidy vd., 2024, Chawanda, 2021). DDS algoritması, karmaşık kalibrasyon işleminin verimli bir şekilde yapılmasına olanak tanır (Tolson ve Shoemaker, 2007). Ancak Harifidy ve ark. (2024), SWAT+ Toolbox'ın, R-SWAT gibi alternatiflere kıyasla daha fazla işlem süresi gerektirebileceğini ve bunun zamana duyarlı çalışmalar için bir sınırlama olabileceğini belirtmiştir. Ayrıca SWAT+ Toolbox şu anda sadece Microsoft Windows işletim sistemleriyle uyumludur (Chawanda, 2021).

SWAT+ Toolbox, kullanıcı dostu arayüzü ve karmaşık havzalardaki akışı simüle etmedeki iyi performansı nedeniyle çalışmamız için seçilmiştir. Ayrıca SWAT+ Toolbox Türkiye'de hiç kullanılmadığı ve araştırma sorusu ile uyumlu olduğu için bu çalışmada kullanılmıştır.

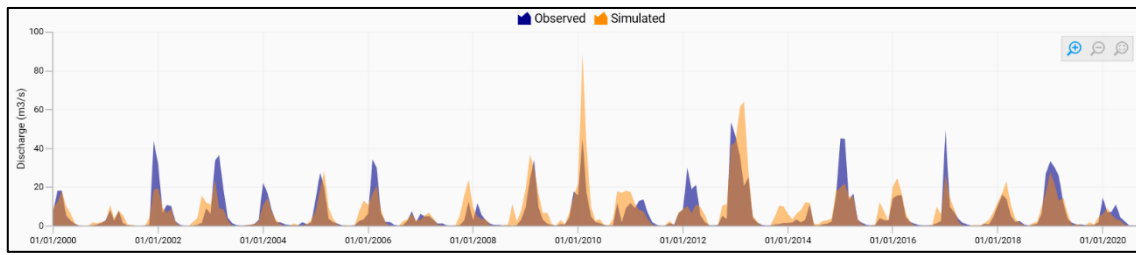
4. Bulgular ve Tartışma (Results and Discussion)

Kalibrasyon dönemi için simüle akış – gözlenen akış grafiği Şekil 7'de verilmiştir. Kalibrasyon döneminde model performans parametrelerine bakıldığında (Tablo 3) model performansının (NSE 0.596) tatmin edici düzeyin üzerinde olduğu görülmektedir. Öte yandan, PBIAS göstergesi modelin bu dönemde %1.742 düzeyinde fazla akım ürettiğini göstermektedir. PBIAS değerinin %10'dan düşük olması durumu modelin iyi bir performans gösterdiğini belirtir (Moriasi vd., 2007).



Şekil 7 / Figure 7. Kalibrasyon Dönemi: Gözlenen (Mavi) ve Modellenen (Turuncu) Akım İlişkisi (Calibration Period: Relationship Between Observed (Blue) and Simulated (Orange) Flow)

Doğrulama dönemi için simüle akış – gözlenen akış grafiği Şekil 8'de verilmiştir. Bu dönemde de model performans parametrelerine bakıldığında (Tablo 3) model performansının (NSE 0.516) tatmin edici düzey üzerinde olduğu görülmektedir. Kalibrasyon dönemin aksine, doğrulama döneminde PBIAS göstergesi modelin %9.64 düzeyinde daha az akım ürettiği görülmektedir. %10'dan düşük olan PBIAS değerleri modelin hem kalibrasyon hem de doğrulama dönemlerinde iyi bir performans gösterdiği görülmektedir.



Şekil 8 / Figure 8. Doğrulama Dönemi: Gözlenen (Mavi) ve Modellenen (Turuncu) Akım İlişkisi (Validation Period: Relationship Between Observed (Blue) and Simulated (Orange) Flow)

Kalibrasyon ve doğrulama dönemlerinde hesaplanan performans göstergeleri sonuçları (Tablo 3) modelin kabul edilebilir düzeyin üzerinde olduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 3. Model Performansı (Model Performance)

	NSE	MSE	RMSE	PBIAS
Kalibrasyon Dönemi (1983-2000)	0.596	31.324	5.597	1.742
Doğrulama Dönemi (2001-2021)	0.516	54.143	7.358	-9.640

Hidrolojik veriler, hidrolojik süreçleri anlamak, modeller geliştirmek, su kaynakları ve afet tahminleri yapmak ve su miktarı ile kalitesini izlemek için temel girdilerdir. Ancak doğru ve kesin hidrolojik verilerin elde edilmesi, uzun süredir tartışılan bir zorluktur. (McMillan vd, 2018). Bölgedeki istasyon mevcudiyetinden dolayı bu çalışmada

sadece 3 meteoroloji istasyonu kullanılmıştır. Büyük ölçekli havzaların hidrolojik modellemesi söz konusu olduğunda, meteoroloji istasyonları genellikle yetersiz kalmaktadır (Probst ve Mauser, 2022). Öte yandan, gelişen teknoloji ile modern sistemler (uydu, radar vb) hidroloji bilimine veri sağlayabilmektedir (Aksu ve Korkmaz, 2019). Özellikle hidrolojik modelleme gibi kapsamlı çalışmalarda, küresel re-analysis gibi yüksek çözünürlüklü, meteorolojik veri setlerine ihtiyaç giderek artmaktadır (Probst ve Mauser, 2022). Bu çalışmada tatmin edici sonuçlar alınmış olsa da, havzanın boyutu ele alındığında daha fazla istasyona ihtiyaç duyulduğu söylenebilir.

Öte yandan, model performansı arazi kullanımı ve toprak verisi gibi girdi verilerinin kalitesinden de önemli ölçüde etkilenebilir. Avrupa'da yapılan çalışmalar, CORINE (arazi kullanımı) verilerinin genel olarak yüksek doğruluk oranına sahip olduğunu göstermektedir (Aune-Lundberg ve Strand, 2021). Ancak, CORINE verilerinin Güney Marmara Havzası'ndaki doğruluğu henüz değerlendirilmemiştir. Ateşoğlu, CORINE 2006 verilerinin doğruluğunu Türkiye'deki bazı bölgelerde araştırmış ve doğruluklarının düşük olduğunu tespit etmiştir (Ateşoğlu, 2016). Bu çalışmada her ne kadar CORINE 2018 verilerini kullanılmış olsa da veri kalitesi konusunda bazı belirsizlikler bulunmaktadır.

Gelecekteki araştırmaların, SWAT+ modelinin girdi verileri kapsamında veri kalitesinin ve beraberindeki belirsizliklerin araştırılmasına odaklanması faydalı olabilir. Son yıllarda modelleme çalışmaları, küresel re-analysis gibi yüksek çözünürlüklü, meteorolojik veri kümelerini daha sık kullanmaya başlamıştır (Probst ve Mauser, 2022). Türkiye'de gelecekteki araştırmalar için, hidrolojik modellemede yüksek çözünürlüklü bu veri setlerinin kullanılması ve bu çalışma sonuçlarının değerlendirmesi önerilmektedir. Son olarak, SWAT+ modeli ile diğer hidrolojik modeller arasında karşılaştırmalı çalışmalar yürütmek, bu çalışmaların görece güçlü ve zayıf yönlerine dair değerli bilgiler sağlayabilir.

5. Sonuç (Conclusion)

Bu çalışmada, SWAT+ modeli ve SWAT+ Toolbox yazılımı ile birlikte Güney Marmara Havzası'na uygulanmıştır. Çalışmada, model performansının hem kalibrasyon döneminde (NSE 0,596) hem de doğrulama döneminde (NSE 0,516) tatmin edici olduğunu bulunmuştur. Sonuçlar SWAT modelinin Türkiye için kabul edilebilir sonuçlar sağladığı yönündeki literatürü desteklemektedir. Buna ek olarak bu çalışmada ülkemizde ilk defa kullanılan SWAT+ modeli ve SWAT+ Toolbox yazılımı, SWAT modelinin temel versiyonuna benzer bir başarı gösterdiği ilk defa ortaya konulmuştur. SWAT+ modelinin sağladığı esneklik ve ek fonksiyonlar ülkemizdeki hidrolojik modelleme çalışmalarına katkı sağlayacaktır. Bu çalışma ile, havzada gelecekte yapılacak çalışmalarda SWAT+ modelinin başarılı bir şekilde kullanılabileceği ortaya konulmuştur. Sonuçlar, SWAT+ modelinin gelişmiş ve esnek özelliklerinin model kurulumu ve çalıştırılması açısından önemli avantajlar sunduğunu göstermektedir.

Bu çalışma, SWAT+ modelinin Güney Marmara Havzası'ndaki uygulama ve değerlendirmesine öncülük ederek bu konuda literatüre katkı sağlamaktadır. SWAT+ Toolbox yazılımı kullanılarak kalibrasyon ve doğrulama yaptığımız SWAT+ modeli, bu karmaşık Akdeniz havzasında nehir akışını etkili ve doğru bir şekilde simüle etmiştir. Bu bağlamda çalışma, Türkiye'de SWAT modeli kullanılarak yapılan diğer çalışmalarla tutarlı sonuçlar göstermiştir.

SWAT+ Toolbox yazılımı gelişmiş özellikler sunmasına rağmen R-SWAT gibi alternatiflere kıyasla daha fazla işlem süresi gerektirmektedir (Harifidy ve diğerleri, 2024). Bu nedenle araştırmacılar, kendi özel araştırma amaç ve hedeflerine göre uygun SWAT yan araçlarını belirlemelidir.

Öte yandan, gelecekteki çalışmaların, SWAT+ ve SWAT+ Toolbox yazılımlarının farklı havza ve iklim koşullarında ne kadar etkili olduğunu araştırması önem taşımaktadır. Özellikle büyük ölçekli veya zaman açısından kritik projeler için SWAT+ Toolbox yazılımının hesaplama verimliliğinin artırılması gerekmektedir. Ayrıca, Türkiye'de yüksek çözünürlüklü ve modern yöntemlerle elde edilen meteorolojik veri setlerinin SWAT+ ile nasıl entegre edilip kullanılabileceği konusu önemlidir. Bu tür çalışmalar, SWAT+ ve diğer hidrolojik modeller arasındaki performans farklılıklarını Türkiye bağlamında anlamamıza yardımcı olacak ve böylece su kaynakları yönetimi stratejilerini optimize etmemizde değerli bilgiler sunacaktır.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Halil Emre Kışlıoğlu'nun doktora çalışmasının bir parçasıdır. Değerli danışman hocalarıma ve eşime katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Abbaspour, K. C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., ... & Srinivasan, R. (2007). Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of hydrology*, 333(2-4), 413-430.
- Aksu, H., Korkmaz, M. S., (2019). Türkiye’de Hidrolojik Veri Yönetimi ve Üniversitelerin Katılımı ABD Örneği, *Mühendislik Bilimler ve Tasarım Dergisi*, 7(3), 699-704.
- Armstrong, J. S., & Collopy, F. (1992). Error measures for generalizing about forecasting methods: Empirical comparisons. *International journal of forecasting*, 8(1), 69-80.
- Arnold, J. G., & Allen, P. M. (1996). Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds. *Journal of hydrology*, 176(1-4), 57-77.
- Ateşoğlu, A. (2016). Havza çalışmalarında kullanılan CORINE 2006 arazi sınıflandırma verilerinin doğruluğunun araştırılması. *Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University*, 66(1), 173-183.
- Aune-Lundberg, L., & Strand, G. H. (2021). The content and accuracy of the CORINE Land Cover dataset for Norway. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 96, 102266.
- Bai, J., Shen, Z., & Yan, T. (2017). A comparison of single-and multi-site calibration and validation: a case study of SWAT in the Miyun Reservoir watershed, China. *Frontiers of Earth Science*, 11, 592-600.
- Bieger, K., Arnold, J. G., Rathjens, H., White, M. J., Bosch, D. D., Allen, P. M., ... Srinivasan, R. (2016). Introduction to SWAT+, a completely restructured version of the soil and water assessment tool. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 53(1), 115–130. doi:10.1111/1752-1688.12482
- Chawanda, C.J. (2021). SWAT+ Toolbox: User Manual; SWAT+, Soil & Water Assessment Tool. Available online: <https://www.openwater.network/assets/downloads/SWATplusToolboxUserManual.pdf>.
- Clark, M. P., Kavetski, D., & Fenicia, F. (2011). Pursuing the method of multiple working hypotheses for hydrological modeling. *Water Resources Research*, 47(9).
- Crawford, N. H., & Linsley, R. K. (1966). *Digital Simulation in Hydrology* Stanford Watershed Model 4.
- Dile, Y., Srinivasan, R., & George, C. (2016). QGIS Interface for SWAT (QSWAT). Version, 1, 25.
- Dracup, J. A., Lee, K. S., & Paulson Jr, E. G. (1980). On the definition of droughts. *Water resources research*, 16(2), 297-302.
- Duygu, M. B. (2021). Opportunities and challenges in using soil moisture from cosmic ray neutron sensing for rainfall-runoff modelling.
- FAO. (2022). Harmonized world soil database v1.2. FAO SOILS PORTAL. Available at: <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/>
- Fıstıkoğlu, O. (1999) Hidrolojik Modeller. Türkiye İnşaat Mühendisliği 15. Teknik Kongre ve Sergisi Bildiriler Kitabı, 799-809, Ankara.
- Fischer, G., Nachtergaele, F., Prieler, S., van Velthuisen, H. T., Verelst, L., & Wiberg, D. (2008). *Global Agro-ecological Zones Assessment for Agriculture (GAEZ 2008)*. IIASA; FAO.
- Hämäläinen, R. P. (2015). Behavioural issues in environmental modelling–The missing perspective. *Environmental Modelling & Software*, 73, 244-253.
- Harifidy, R. Z., Hiroshi, I., Kazuyoshi, S., Jun, M., Harivelo, R. Z. M., & Fernández-Palomino, C. A. (2024). Multi-gauge calibration comparison for simulating streamflow across the Major River Basins in Madagascar: SWAT+ Toolbox, R-SWAT, and SWAT+ Editor Hard calibration. *Hydrology Research*, nh2024188.
- Jouma, N., & Dadaser-Celik, F. (2021). Assessing hydrologic alterations due to reservoirs and intensified irrigation in a semi-arid agricultural river basin using SWAT. *Irrigation and Drainage*, 71(2), 452–471.
- Keleş Özgenç, E. (2024). Evaluation using the SWAT model of the effects of land use land cover changes on hydrological processes in the Gala Lake Basin, Turkey. *Environmental Quality Management*, 00, 1–15.
- Marhaento, H., Booij, M. J., Rientjes, T. H. M., & Hoekstra, A. Y. (2017). Attribution of changes in the water balance of a tropical catchment to land use change using the SWAT model. *Hydrological Processes*, 31(11), 2029–2040. doi:10.1002/hyp.11167
- McMillan, H. K., Westerberg, I. K., & Krueger, T. (2018). Hydrological data uncertainty and its implications. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 5(6), e1319.
- Mekonnen, D. F., Duan, Z., Rientjes, T., & Disse, M. (2018). Analysis of combined and isolated effects of land-use and land-cover changes and climate change on the upper Blue Nile River basin’s streamflow. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(12), 6187-6207.
- Moriyas, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- Mulvaney, T.J. (1850) On the use of self-registering rain and flood gauges. *Transactions of the Institution of Civil Engineers of Ireland*, 4(2), 1-8.
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), 282-290.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). *Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009*. Texas Water Resources Institute.
- Nguyen, T. V., Dietrich, J., Dang, T. D., Tran, D. A., Van Doan, B., Sarrazin, F. J., ... & Srinivasan, R. (2022). An interactive graphical interface tool for parameter calibration, sensitivity analysis, uncertainty analysis, and visualization for the Soil and Water Assessment Tool. *Environmental Modelling & Software*, 156, 105497.
- Oruç, H. N., Çelen, M., Gülgen, F., Öncel, M. S., Vural, S., & Kılıç, B. (2022). Assessing hydrologic alterations due to reservoirs and intensified irrigation in a semi-arid agricultural river basin using SWAT. *Urban Water Journal*, 20(10), 1592–1607.
- Peker, İ. B., & Cüceloğlu, G. (2022). SWAT (Soil and Water Assessment Tool) Modeline Genel Bir Bakış ve Modelin Türkiye’deki Uygulamaları. *Çevre İklim ve Sürdürülebilirlik*, 23(1), 9-26.

- Probst, E., & Mauser, W. (2022). Evaluation of ERA5 and WFDE5 forcing data for hydrological modelling and the impact of bias correction with regional climatologies: A case study in the Danube River Basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 40, 101023.
- Pulighe, G., Lupia, F., Chen, H., & Yin, H. (2021). Modeling climate change impacts on water balance of a Mediterranean watershed using SWAT+. *Hydrology*, 8(4), 157. <https://doi.org/10.3390/hydrology8040157>
- Singh, L., & Saravanan, S. (2020). Simulation of monthly streamflow using the SWAT model of the Ib River watershed, India. *HydroResearch*, 3, 95-105.
- Singh, V. P., & Woolhiser, D. A. (2002). Mathematical modeling of watershed hydrology. *Journal of hydrologic engineering*, 7(4), 270-292.
- Swalih, S. A., & Kahya, E. (2021). Hydrological model optimization using multi-gauge calibration (MGC) in a mountainous region. *Journal of Hydroinformatics*, 23(2), 340-351.
- Tolson, B. A., & Shoemaker, C. A. (2007). Dynamically dimensioned search algorithm for computationally efficient watershed model calibration. *Water Resources Research*, 43(1).
- Turkes, M. (2012). Türkiye’de gözlenen ve öngörülen iklim değişikliği, kuraklık ve çölleşme. *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 4(2), 1-32.
- Van Loon, A. F. (2015). Hydrological drought explained. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2(4), 359-392.



DAĞBELİ KÖYÜ (ANTALYA) GÜNEYİ KİREÇTAŞI AKİFERİNİN HİDROJEOKİMYASAL ÖZELLİKLERİ

Ayşen DAVRAZ¹, Şehnaz ŞENER^{1*}, Erhan ŞENER²

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

² Süleyman Demirel Üniversitesi, Uzaktan Algılama Uygulama ve Araştırma Merkezi, Isparta

Anahtar Kelimeler

Hidrojeokimya,
Yeraltısuyu,
Karstik Akifer,
Antalya.

Öz

Dağbeli Köyü (Antalya) güneyindeki kireçtaşı akiferinin hidrojeokimyasal özelliklerinin incelendiği bu çalışmada bölgenin jeolojik ve hidrojeolojik özellikleri, yeraltısularının hidrojeokimyasal karakteri ve buna bağlı olarak kullanılabilirlik durumu ortaya koyulmuştur. Bölgede yüzeleyen Beydağları formasyonu ve Tekkeköy üyesi karstik akifer özelliği taşımaktadır. Karstik akifer ortamda açılmış sondaj kuyuları ile bölgede karstik akiferden boşalan Kırkgöz kaynaklarından alınan su örneklerinin analiz sonuçlarına göre suların EC değerleri 352-730,3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ arasında, pH değeri 7.2-8.29 arasında; sertliği ise 25.5-43.2 Fr^0 arasında değişmektedir. Yeraltısuları Piper ve Gibbs diyagramlarına göre Ca-HCO₃'lü sular fasiyesinde olup bölgede yeraltısuyu kimyasını denetleyen ana faktör kaya-su etkileşimidir. Hidrojeokimyasal proseslere göre sulara Ca, Mg ve HCO₃ varlığının karbonat olmayan kaynaklarla ilişkili olduğu ve silikat ayrışmasının baskın olduğu söylenebilir. Yeraltısularının kalite ve kullanılabilirlik özelliklerinin değerlendirilmesi sonucunda tüm su örneklerinin içme ve sulama suyu olarak kullanılabilir özellikte olduğu belirlenmiştir.

HYDROGEOCHEMICAL PROPERTIES OF THE LIMESTONE AQUIFER SOUTH OF DAĞBELİ VILLAGE (ANTALYA)

Keywords

Hydrogeochemistry,
Groundwater,
Karst aquifer,
Antalya.

Abstract

In this study, the hydrogeochemical properties of the limestone aquifer in the south of Dağbeli Village (Antalya) were investigated and the hydrogeochemical character of the groundwater and the availability of groundwater were revealed by examining the geological and hydrogeological characteristics of the region. Beydağları formation and Tekkeköy member surfacing in the region have the characteristics of karstic aquifer. According to the results of the analyses of the water samples taken from the boreholes drilled in the karstic aquifer environment and from Kırkgöz springs discharging from the karstic aquifer in the region, the EC values of the waters vary between 352-730.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$, pH value between 7.2-8.29 and hardness between 25.5-43.2 Fr^0 . According to Piper and Gibbs diagrams, the groundwaters are in the Ca-HCO₃ water facies and the main factor controlling the groundwater chemistry in the region is rock-water interaction. According to hydrogeochemical processes, it can be said that the presence of Ca, Mg and HCO₃ in the waters is related to non-carbonate sources and silicate weathering is dominant. As a result of the evaluation of the quality and usability characteristics of the groundwaters, it was determined that all water samples can be used as drinking and irrigation water.

Alıntı / Cite

Davraz, A., Şener, Ş., Şener, E., (2024). Dağbeli Köyü (Antalya) Güneyi Kireçtaşı Akiferinin Hidrojeokimyasal Özellikleri, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 12(3), 544-556.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

A. Davraz, 0000-0003-2442-103X
Ş. Şener, 0000-0003-3191-2291
E. Şener, 0000-0001-6263-8366

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	23.07.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date	22.08.2024
Kabul Tarihi / Accepted Date	22.08.2024
Yayın Tarihi / Published Date	26.09.2024

* İlgili yazar / Corresponding author: sehnazsener@sdu.edu.tr, +90-246-211-1332

HYDROGEOCHEMICAL PROPERTIES OF THE LIMESTONE AQUIFER SOUTH OF DAĞBELI VILLAGE (ANTALYA)

Ayşen DAVRAZ¹, Şehnaz ŞENER^{1†}, Erhan ŞENER²

¹ Süleyman Demirel University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Geological Engineering, Isparta, Türkiye

² Süleyman Demirel University, Remote Sensing Application and Research Center, Isparta, Türkiye

Highlights

- Beydağları formation and Tekkeköy member are karst aquifers in the study area.
- According to the Piper diagram, groundwater is in the Ca-HCO₃ water facies.
- Groundwater can be used as drinking and irrigation water.

Purpose and Scope

In this study, it was aimed to examine the geological and hydrogeological characteristics of the south of Dağbeli Village (Antalya) and to reveal the hydrogeochemical properties of the limestone aquifer and accordingly the groundwater quality and availability.

Design/methodology/approach

During the field studies carried out to determine the hydrogeochemical properties and water quality of the limestone aquifer in the south of Dağbeli Village (Antalya), which was determined as the study area, the geological characteristics of the region were first examined. In this context, the geological formations cropping out in the region, their lithological characteristics and their relationships with each other have been revealed. By evaluating the potential of lithological units to become aquifers, the hydrogeological situation of the region was determined and sample points were determined. Water samples were taken from sample points determined in field studies and temperature (T), electrical conductivity (EC) and hydrogen ion concentration (pH), dissolved oxygen (%), mg/l, Oxidation Reduction Potential (ORP; mV) and dissolved solids in water were determined. amount (TDS; mg/l) values were measured during sample collection using the YSI Professional Plus brand multi-parameter portable water quality measuring device. Chemical analyzes of water samples were carried out in the laboratory of SDÜ, Geothermal Energy, Groundwater and Mineral Resources Research and Application Center. In order to determine hydrogeochemical properties, major ion concentration values of the samples were placed on Piper (1944) and Gibbs diagrams and interpreted. In addition, (Ca+Mg)-(HCO₃+SO₄) graph was prepared to interpret the decomposition and dissolution processes of minerals in water.

Findings

In Dağbeli village and its surroundings, which were selected as the study area, Beydağları formation belonging to Beydağları autochthonous, Tekkeköy member, Söbütepe formation and Çamlıdere olistrochrome, Antalya nappes, Yeniceboğazıdere formation belonging to Çataltepe nappe and Lycian nappes, Kızılcaadağ mélange and olistrochrome units belonging to Marmaris ophiolite nappe are exposed. The most important aquifer units around Dağbeli Village are limestones and alluvium. In addition, the most important water source in the south of the study area is Kırkgöz springs. According to the Piper diagram, groundwater is in the Ca-HCO₃ water facies. The high Ca content detected in the waters in the study area is related to the limestones of the Beydağları formation, which outcrop in large areas in the region and with which the waters interact. The main factor controlling groundwater chemistry in the region is rock-water interaction. According to the evaluations made within the scope of the study, groundwater is suitable for drinking and irrigation use.

Practical implications

In this study, the hydrogeochemical properties of the limestone aquifer located in the south of Dağbeli Village (Antalya) were examined. Kırkgöz springs, one of the main drinking water sources of Antalya province, are located in the south of the study area and are the most important water source examined within the scope of the study. Since Kırkgöz springs are also used as a drinking water source in Antalya province, the data obtained as a result of the study are useful and important especially for local administrators.

Social Implications

The groundwater in the study area can be used as irrigation and drinking water in terms of its quality and chemical properties. Nowadays, when water resources are so important, having good quality water is a very important gain for the people of the region.

Originality

Since the groundwater flow rate in the karst and travertine aquifers in SW Turkey is quite fast (velocity 6.1 m/s in the travertine aquifer), pollutants spread to the Mediterranean through groundwater. For this reason, pollution in Isparta and Burdur residential areas creates a risk for Antalya and surrounding settlements (Davraz et al., 2009). Therefore, in the presented study, it is of great importance to determine the hydrogeochemical properties and water quality of the limestone aquifer in the south of Dağbeli Village (Antalya). In addition, the absence of a scientific study to determine the water chemistry and usability of groundwater in the study area makes this study scientifically original.

[†] İlgili yazar / Corresponding author: sehnazsener@sdu.edu.tr, +90-246-211-1332

1. Giriş (Introduction)

Yeraltısuları evsel, tarımsal ve endüstriyel amaçlarla kullanılan en önemli su kaynaklarından biridir. Özellikle karstik akiferlerden alınan yeraltısuları ülkemizde olduğu gibi dünyanın birçok bölgesinde birincil tatlı su kaynağı olarak kullanılmaktadır (Drew 1999). Yeraltısularının kullanılabilirlik özellikleri içerdikleri anyon, katyon, iz element ve mikrobiyolojik parametrelerle ilişkili olarak değişiklik göstermektedir (Tayfur vd., 2008; Şener vd., 2020). Yeraltısuyu kalitesindeki değişiklikler, suyun akiferlerden süzülmesi sırasında kaya-su etkileşimi ve oksidasyon-redüksiyon reaksiyonlarından kaynaklanan jeojenik faktörler ile doğrudan bağlantılıdır (Egbueri 2019). Bu süreçlere ek olarak, su kaynaklı patojenler, toksik ve toksik olmayan kirleticiler, yeraltısuyu hareketi ile akiferler aracılığıyla beslenme alanından deşarj alanına taşınan antropojenik kirleticiler yeraltısuyu kalitesini olumsuz olarak etkilemektedir (Kumar vd., 2009; Mostafa vd., 2017). Ülkemizde özellikle yüzey suyu kaynaklarının hem miktar hem de kalite bakımından her geçen gün kullanım potansiyellerinin azalması nedeniyle yeraltısuyu kaynakları daha da önem kazanmıştır. Bu çalışmada, Dağbeli Köyü (Antalya) güneyindeki kireçtaşı akiferi çalışma alanı olarak seçilmiştir. Akdeniz Bölgesinde bulunan Antalya ilinin içme suyu kaynağı olarak da kullanılan Kırkgöz kaynaklarının ve kuzeyinde bulunan çalışma konusu kireçtaşı akiferini temsil eden yeraltısularının hidrojeokimyasal özellikleri ayrıntılı olarak araştırılmıştır. Bu kapsamda, çalışma alanının jeolojik ve hidrojeolojik özellikleri değerlendirilerek çalışma alanındaki yeraltısularının mevcut durumdaki kalite özellikleri ve kullanım koşulları farklı eşitlikler, diyagramlar ve ilgili yönetmeliklere ait limit değerler kullanılarak belirlenmiştir.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Yeraltısularının hidrojeokimyasal özelliklerinin ve buna bağlı olarak kullanılabilirliğini belirleyen kalitesinin belirlenmesine yönelik araştırmalar birçok araştırmacının çalışma konusunu oluşturmaktadır. Özellikle Antalya bölgesinde yeraltısularının kimyasının ve kalitesinin incelendiği çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bektaş ve Şener (2021) tarafından yapılan çalışmada, Antalya ili içme suyu kaynaklarının hidrojeokimyasal özellikleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bölgedeki suların Ca-CO₃ ve Ca-Mg-HCO₃'lü sular sınıfında olduğu saptanan çalışmada su kalitesi bakımında TS-266'ya göre suların genel olarak içilebilir özellikte olduğu belirlenmiştir. Ancak, sular Mg, HCO₃ ve TDS değerleri bakımından WHO (2022) limit değerlerini aştığı ve içme suyu kullanımına uygun olmadığı belirtilmektedir. Davraz vd. (2009) tarafından GB Türkiye'deki karstik akifer sistemlerinin hidrojeolojisi, su kalitesi ve kirlenme sorunları ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmiştir. Araştırma alanındaki yeraltısuları Ca-Mg-HCO₃ fasiyesindedir ve Isparta, Burdur ve Antalya yerleşim bölgelerinde tarımsal ve endüstriyel atıklar yeraltısuları için önemli kirleticiler olarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında yapılan su analizlerine göre NO₃, NO₂ ve NH₄ konsantrasyonları Dünya Sağlık Örgütü ve Türk Standartları Enstitüsü'nün içme suyu için belirlediği limit değerleri aşmaktadır. GB Türkiye'deki karstik ve traverten akiferlerinde yeraltısuyu akış hızı oldukça hızlı olduğundan (traverten akiferinde hız 6,1 m/s) kirleticiler yeraltısuları vasıtasıyla Akdeniz'e yayılmaktadır. Bu nedenle Isparta ve Burdur yerleşim bölgelerindeki kirlilik Antalya ve çevre yerleşimler açısından risk yaratmaktadır (Davraz vd., 2009). Bu nedenle, sunulan çalışmada Dağbeli Köyü (Antalya) güneyindeki kireçtaşı akiferinin hidrojeokimyasal özelliklerinin ve su kalitesinin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, çalışma alanındaki yeraltısularının su kimyasını ve kullanılabilirliğini belirlemeye yönelik bilimsel bir çalışma bulunmaması bu çalışmayı bilimsel açıdan özgün kılmaktadır.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Çalışma alanı olarak belirlenen Dağbeli Köyü (Antalya) güneyindeki kireçtaşı akiferinin hidrojeokimyasal özelliklerini ve su kalitesini belirleyebilmek için yapılan arazi çalışmaları sırasında öncelikle bölgenin jeolojik özellikleri incelenmiştir. Bu kapsamda, bölgede yüzeleyen jeolojik formasyonlar ve bunların litolojik özellikleri ile birbirleri ile olan ilişkileri ortaya koyulmuştur. Litolojik birimlerin akifer olabilme potansiyelleri değerlendirilerek bölgenin hidrojeolojik durumu belirlenmiş ve örnek noktaları belirlenmiştir.

18.03.2023 tarihinde yapılan arazi çalışmalarında belirlenen örnek noktalarından su örnekleri alınmış ve sıcaklık (T), elektriksel iletkenlik (EC) ve hidrojen iyonu konsantrasyonu (pH), çözülmüş oksijen (%), Oksidasyon İndirgeme Potansiyeli (ORP; mV) ve sudaki çözülmüş katı madde miktarı (TDS; mg/l) değerleri YSI Professional Plus marka çok parametrelili portatif su kalitesi ölçüm cihazı kullanılarak numune alımları sırasında ölçülmüştür. Sızdırmaz polietilen şişelere alınan su örnekleri +4°C'de muhafaza edilerek kimyasal analizlerin yapılacağı laboratuvara ulaştırılmıştır. Su örneklerinin kimyasal analizleri SDÜ, Jeotermal Enerji, Yeraltısuyu ve Mineral Kaynakları Araştırma ve Uygulama Merkezi laboratuvarında yaptırılmıştır. Hidrojeokimyasal özelliklerin belirlenebilmesi için örneklerin majör iyon konsantrasyon değerleri Piper (1944) ve Gibbs diyagramlarına yerleştirilmiş ve yorumlanmıştır. Ayrıca suların içerisindeki minerallerin ayrışma ve çözünme süreçlerini yorumlayabilmek için (Ca+Mg)-(HCO₃+SO₄) grafiği hazırlanmıştır. Suların içme suyu olarak kullanılabilirliğinin belirlenmesinde ülkemizde dikkate alınması gereken İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik (İTASHY,

2005) ile belirlenmiş limit değerler dikkate alınmıştır. Ayrıca su örneklerinin analiz sonuçları dünya genelinde geçerli olan Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2022) standartları ile karşılaştırılmıştır. Sulama suyu olarak kullanılabilirliği değerlendirmek için ise Wilcox ve ABD tuzluluk laboratuvarı diyagramları ile Sodyum Yüzdesi (%Na), Sodyum Adsorpsiyon Oranı (SAR), Artıksal Sodyum Karbonat (RSC), Magnezyum Tehlikesi (MT), Geçirgenlik İndeksi (PI) ve Kelly Oranı (KR) değerleri kullanılmıştır.

4. Araştırma Bulguları (Research Findings)

4.1. İnceleme Alanının Jeolojisi (Geology of the Study Area)

İnceleme alanı olarak seçilen Dağbeli köyü ve yakın çevresinde Beydağları otoktonuna ait Beydağları formasyonu, Tekkeköy üyesi, Söbütepe formasyonu ve Çamlıdere olistrosromu, Antalya napları Çataltepe napına ait Yeniceboğazıdere formasyonu ve Likya napları Marmaris ofiyolit napına ait Kızılcaadağ melanj ve olistrosromu birimleri yüzeylenmektedir (Şekil 1). Jura-Kretase yaşlı neritik kireçtaşlarından oluşan Beydağları formasyonu bej, gri, krem renklerde, orta-kalın tabakalı kireçtaşlarından oluşmaktadır (Şenel, 1997). Sık erime boşluklu formasyonda karstlaşma yaygın olup çok sayıda dolin ve düden yapıları gözlenmektedir. Beydağları formasyonunun üst kesimlerini oluşturan ince-orta tabakalı globotruncanalı mikritler Tekkeköy üyesi olarak ayrıtlanmıştır.

Dağbeli Köyü batısında küçük alanlarda gözlenen Söbütepe formasyonu kumlu-killi kireçtaşı, kumtaşı, kiltası vb. kayatürlerinden oluşmaktadır (Yalçınkaya vd.,1986). Formasyon genel olarak farklı tabaka kalınlıklarında krem, yeşil, pembe, gri, bej vb. renklerde killi-kumlu kireçtaşı, kireçtaşı, marn, silttaşı, kiltası, kumtaşı vb. kayatürlerinden yapılanmıştır. Dağbeli Köyü güneyinde ince şeritler halinde yüzeyleyen Çamlıdere olistrosromu kiltası, marn, killi kireçtaşı, kumtaşı ve farklı boyutlu kırıntılardan oluşmaktadır. Kırkgöz kaynakları batısında küçük alanda yüzeyleyen Yeniceboğazıdere formasyonu çört, şeyl, kalsitürbidit, radyolarit ve kireçtaşlarından oluşmaktadır (Poisson, 1977). Dağbeli Köyü batısında küçük alanda gözlenen Kızılcaadağ melanj ve olistrostromu ise Marmaris ofiyolit napının bir parçasını oluşturmaktadır. Kızılcaadağ ofiyolitik melanj, kırmızımsı, yeşilimsi, kahverengimsi ve mavimsi renklerde alacalı görünüme sahiptir. Melanj Triyas, Jura, Kretase yaşlı karbonatlar, neritik kireçtaşları, çörtlü kireçtaşı, radyolarit- çört ile bazalt, gabro, spilit, tuf, diyabaz vb. bloklar kapsar (Bilgin vd., 1990). Dağbeli Köyü kuzeyi, Kovanlık ve Bıyıklı köyleri civarında kum, çakıl, kil vb. birimlerden oluşan alüvyon ovalık geniş alanlarda yüzeylenmektedir.

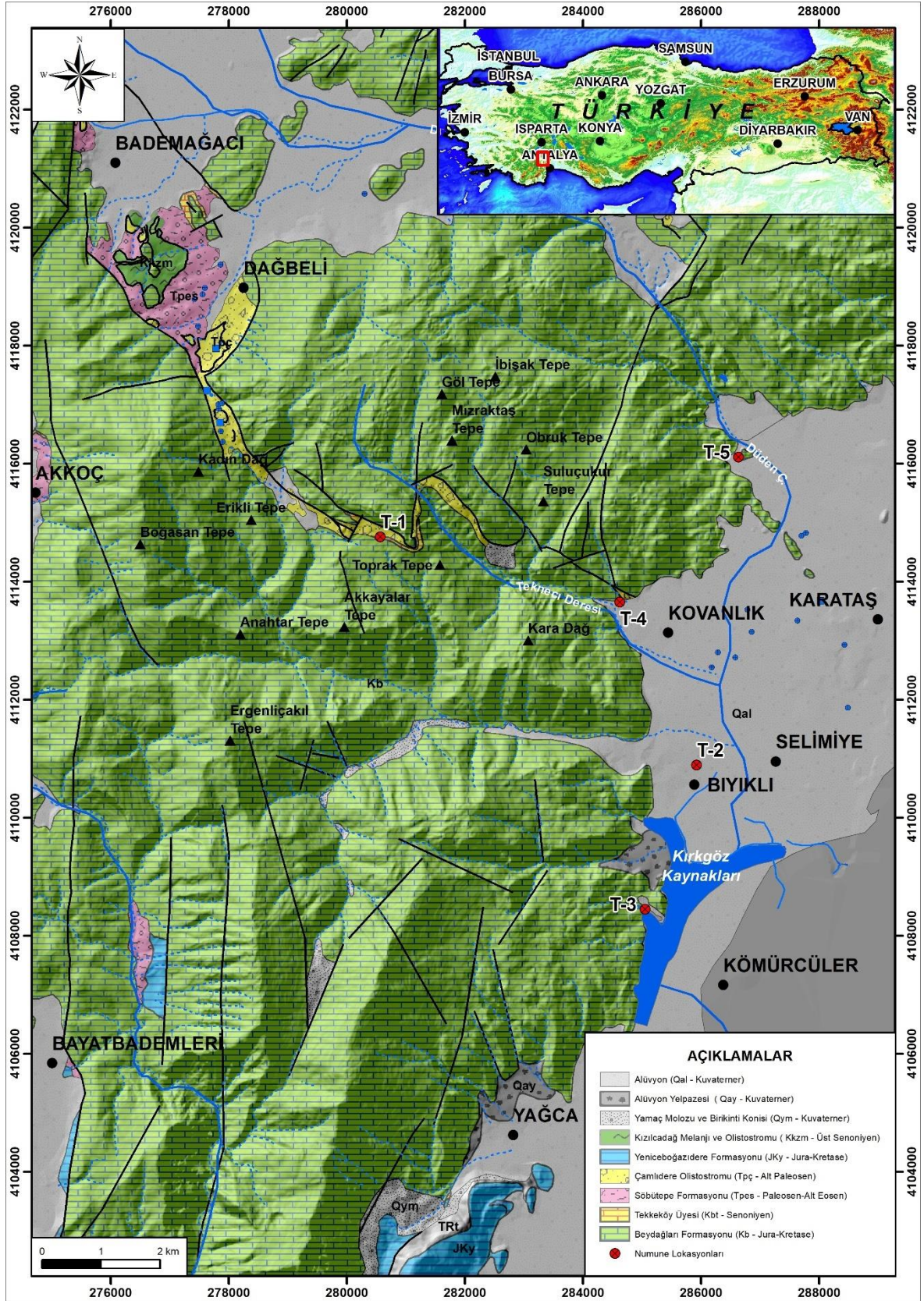
4.2. İnceleme Alanının Hidrojeolojisi (Hydrogeology of the Study Area)

Dağbeli Köyü çevresinde en önemli akifer birimler kireçtaşları ve alüvyondur. İnceleme alanı çevresinde bulunan alüvyon, alüvyon yelpazesi ve yamaç molozu birimleri gözenekli akifer özelliği taşımaktadır. Gözenekli akiferlerde kum ve çakıl seviyelerinden yeraltısu alınmaktadır. Bu seviyelerin yayılımı ve kalınlığının artışı oranında önemli miktarda yeraltısu elde edilebilmektedir. Bölgede alüvyon tabanında kireçtaşı birimi bulunmaktadır. İnceleme alanında geniş alanlarda yüzeyleyen kireçtaşlarından kırık-çatlak kesişim oranları ve yoğunluğu, kalınlıkları ve yayılımlarının artışı oranında yüksek debide yeraltısu elde edilebilmektedir. İnceleme alanında Beydağları formasyonu ve Tekkeköy üyesi karstik akifer özelliği taşımaktadır. Bölgede kireçtaşlarında açılmış sondaj kuyularında yeraltısu seviyesi 42.3-62.8 m arasında değişmektedir.

Killi kireçtaşı, marn, kiltası, konglomera ve kumtaşı ile olistolitik kırıntılardan oluşan Çamlıdere olistrostromu ile kalsitürbidit, çört, radyolarit, şeyl ve kireçtaşlarından oluşan Yeniceboğazıdere formasyonu ve Söbütepe formasyonu "yarı geçirimli birim" olarak sınıflandırılmıştır. Bu birimler içerisinde bulunan konglomera, kumtaşı, kireçtaşı ve kalsitürbidit seviyeleri az miktarda yeraltısu içerse de bu litolojilerin ardalanmalı ve kaotik yapıda bulunması birimlerin akifer özelliği taşımasını engellemektedir. Bölgede küçük alanlarda gözlenen Kızılcaadağ melanj ve olistrosromu "geçirimsiz birim"dir. Kızılcaadağ melanj ve olistrosromu serpantin ve serpantin hamur içerisinde bulunan ofiyolitik malzemeler içerisindeki kireçtaşlarında yeraltısu bulunabilirken genel yapı itibarıyla bu birimler yeraltısuunu iletebilecek kapasitede değildir.

4.3. Su Noktaları (Water Points)

İnceleme alanında Çamlıdere olistrosromu ve Beydağları formasyonu dokanağında keson kuyular bulunmaktadır (Şekil 2). Yağışa bağlı olarak su alınabilen bu kuyular hayvanların ihtiyaçları için kullanılmaktadır. İnceleme alanında Beydağları formasyonuna ait kireçtaşlarında açılmış olan sondaj kuyularından su örnekleri alınmıştır.



Şekil 1. İnceleme alanının yer bulduru, jeoloji ve su noktaları haritası
(Location, geology and water points map of the study area)



Şekil 2. Keson kuyular (Caisson wells)

İnceleme alanı güneyinde en önemli su kaynağı ise Kırkgöz kaynaklarıdır. Kırkgöz kaynakları, Antalya ilinin kuzey ve kuzeybatısında geniş yayılıma sahip olan Beydağları otoktonuna ait karstik kireçtaşlarından ortalama 15 m³/s debi ile yaklaşık 1 km'lik zon boyunca boşalmaktadır. Beydağları karbonat platformunda yeraltısuyu hareketi kırık sistemlerine bağlı olarak gelişmektedir. Kırkgöz kaynakları KB-GD ve K-G doğrultulu kırık çizgilerinin kesişim noktalarından boşalmaktadır (İrleyıcı-Davraz, 1998; Davraz vd., 2009; Şekil 3). Bölgede yapılan jeolojik ve hidrojeolojik araştırmalar, kaynağın farklı karstik kanallardan beslendiğini göstermektedir (Ekmekçi, 2005). Atilla (1996) tarafından yapılan hidrojeokimya ve izotop değerlendirmeleri sonucunda Kırkgöz kaynakları ile Düdenbaşı kaynağının Mesozoyik kireçtaşlarının bir boşalımı olduğu belirtilmiştir. Mesozoyik kireçtaşları ise Eğirdir Gölü havzasına kadar uzanan geniş bir alanda yüzülemektedir (İrleyıcı-Davraz, 1998; Davraz vd., 2006; Davraz vd., 2009). Kırkgöz kaynakları Antalya ilinin temel içmesuyu kaynaklarından biridir.

4.4. Hidrojeokimyasal Değerlendirmeler (Hydrogeochemical Evaluations)

Çalışma kapsamında Dağbeli Köyü güneyinde bulunan karstik akifer ortamda açılmış keson kuyu ve sondaj kuyuları ile bölgede karstik akiferden boşalan en önemli kaynak olan Kırkgöz kaynaklarından 18.03.2023 tarihinde su örnekleri alınmıştır. Su örneklerine ait kimyasal analiz sonuçları ve fiziksel parametreler Tablo 1'de verilmiştir. +25 °C deki 1 cm³ suyun iletkenliği (Erguvanlı ve Yüzer, 1987) olarak tanımlanan özgül elektriksel iletkenlik (EC) değeri suların kullanım özellikleri ve kalite değerlendirmelerinde kullanılan önemli parametrelerden biridir.



Şekil 3. Kırkgöz kaynaklarından bir görünüm (A view from Kırkgöz sources)

Tablo 1. Su örneklerinin fiziksel parametre ve kimyasal analiz sonuçları
(Physical parameter and chemical analysis results of water samples)

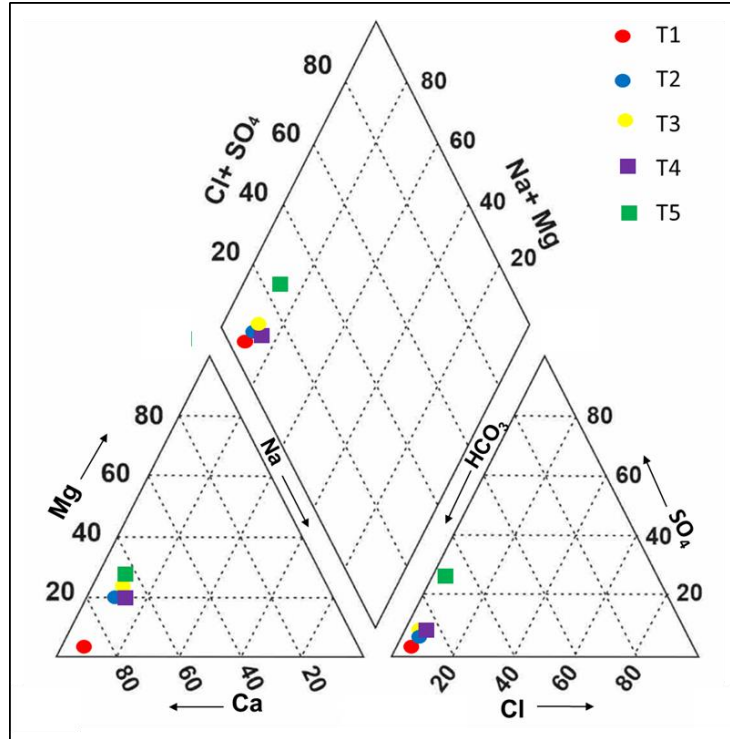
Parametreler	T1 Keson kuyu	T2 Sondaj kuyusu	T3 Kırkgöz kyn	T4 Sondaj kuyusu	T5 Sondaj kuyusu	İTASHY, 2005	WHO, 2022
pH	7.97	7.99	7.9	8.29	7.20	6.5-8.5	6.5-8.5
EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	352.3	634	679	476.4	730.3	2500	
Çözünmüş oksijen (%)	31.6	32.5	33.89	40	69.1		
Çözünmüş oksijen (mg/l)	4.02	4.1	4.25	5.02	6.59		
ORP (mV)	30.9	54.5	64.2	55.1	228.1		
TDS (mg/l)	193.7	348.7	373.45	262.02	401.66		1000
Sertlik (Fr^0)	25.2	39.6	43.2	27.0	30.6		
Na^+ (mg/l)	3.26	11.46	14.40	7.63	15.7	200	200
K^+ (mg/l)	0.22	1.84	2.35	1.93	2.68		
Ca^{+2} (mg/l)	79.33	110.1	119.1	87.73	86		200
Mg^{+2} (mg/l)	1.42	19.28	23.92	14.29	22.3		150
CO_3^{-2} (mg/l)	-	-	-	-	<10		
HCO_3^- (mg/l)	256.3	463.8	518.7	353.9	353		
Cl^- (mg/l)	6.34	12.68	14.33	9.79	17.2	250	250
SO_4^{-2} (mg/l)	6.19	11.32	17.36	9.46	20.1	250	250
Al ($\mu\text{g}/\text{l}$)	43.25	35.10	48.3	45.8	57.8	200	200
Br ($\mu\text{g}/\text{l}$)	0.07	0.09	0.12	0.78	0.11		
Cr ($\mu\text{g}/\text{l}$)	<20	<20	<20	<20	<20	50	50
Cu (mg/l)	10	9.2	12.1	10.8	13	2	2
Fe ($\mu\text{g}/\text{l}$)	27.6	25.6	28.2	19.8	29.9	200	300
Ni ($\mu\text{g}/\text{l}$)	9.2	8.8	7.6	8.65	10.1	20	70
Si (mg/l)	1.72	2.76	2.65	1.93	-		
Zn ($\mu\text{g}/\text{l}$)	sda	sda	sda	sda	203		
F (mg/l)	0.04	0.09	0.10	0.10	<0.1	1.5	
NH_4 (mg/l)	<0.06	<0.06	<0.06	<0.06	0.033		
NO_3 (mg/l)	3.25	10.16	2.95	5.58	1.19	50	50
NO_2 (mg/l)	sda	sda	sda	sda	<0.002	0.5	3
PO_4 (mg/l)	sda	sda	sda	sda	-		
% Na	3.36	6.53	7.28	5.59	9.93		
SAR	0.10	0.26	0.31	0.20	0.39		
RSC	0.12	0.52	0.59	0.25	-0.04		
MT	2.87	22.40	24.87	21.16	31.69		
PI	51.96	42.96	41.49	46.56	48.06		
KR	0.03	0.07	0.08	0.06	0.07		
Su sınıfı	Ca-HCO ₃	Ca-HCO ₃	Ca-HCO ₃	Ca-HCO ₃	Ca-HCO ₃		
Ca/Mg	33.90	3.47	3.02	3.73	2.16		
Ca/Ca+SO ₄	0.97	0.96	0.94	0.96	0.86		
Ca+Mg/HCO ₃	0.97	0.93	0.93	0.96	1.23		
Ca/HCO ₃	0.94	0.72	0.70	0.75	0.84		
Na/Cl	0.79	1.39	1.55	1.20	1.16		
CAI-1 (mek/l)	0.18	-0.53	-0.70	-0.38	-0.33		
CAI-2 (mek/l)	0.00	-0.01	-0.02	-0.01	-0.02		

Suların EC değeri suda bulunan çözülmüş iyon içeriği, sıcaklık ve toplam derişim parametrelerine bağı olarak değişiklik gösterir (Şahinci, 1991). İnceleme alanından alınan suların EC değerleri 352-730,3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ arasında değişmektedir (Tablo 1). Yüksek EC değerleri suların iyon içeriğinin artışı yansıtır. Yine su sınıflamalarında kullanılan önemli parametrelerden bir diğeri olan suyun asit veya bazik özelliğini tanımlamada kullandığımız pH değeri sudaki H⁺ ve OH⁻ iyon içeriklerinin değişimine bağı olarak artış ve azalış göstermektedir. İnceleme alanında karstik akiferden alınan suların pH değeri 7.2-8.29 arasında ölçülmüştür ve “bazik karakterli” suları yansıtmaktadır (Tablo 1). Suların Toplam Çözülmüş Katı Madde (TDS) değerleri 193,7-401,66 mg/l arasında değişmekte olup suda çözülmüş katıların (tuzlar, mineraller, iz elementler vb.) toplam miktarını ifade etmektedir. Özellikle içme suyu sınıflamalarında önemli bir parametre olan sertlik su içerisinde bulunan sertlik verici iyonların varlığı ile artmaktadır. Ca ve Mg iyonları doğal sularda diğeri majör katyonlara göre daha fazla oranda bulduklarından Ca-Mg-bikarbonat, Ca-Mg-sülfat ve Ca-Mg-nitrat sertliği oluşturan ana bileşiklerdir. İnceleme alanında suların sertliği 25.5-43.2 Fr⁰ arasında değişmekte olup “oldukça sert-sert sular” sınıflarını temsil etmektedir.

4.4.1. Major iyon içerikleri ve suların sınıflandırılması (Major ion contents and classification of waters)

Suların majör anyon ve katyon içerikleri suyun dolaşım yolu üzerinde karşılaştığı jeolojik birimler ve akifer ortam hakkında bilgi verirken su sınıfı ve hidrojeokimyasal fasiyeslerinin tanımlanmasında kullanılan temel parametrelerdir. İnceleme alanından alınan yeraltısularında baskın katyon kalsiyumdur ve 79.33-119.1 mg/l arasında analiz edilmiştir. Diğer önemli katyon olan Mg ise 1.42-23.92 mg/l arasında değişmektedir (Tablo 1).

Suların Na ve K değerleri ise sırasıyla 3.26-14.40 mg/l ve 0.22-2.68 mg/l arasındadır. Su örneklerinin HCO_3 içerikleri 208-518.7 mg/l, SO_4 içerikleri 6.19-20.1 mg/l ve Cl içerikleri 6.34-17.2 mg/l arasında değişmektedir (Tablo 1). Sularda HCO_3 anyonu baskındır. Suların sınıflandırılmasında hidrojeokimyasal fasiyes terimi veya su sınıfı kavramı yaygın olarak kullanılmaktadır. Kayaçlar içindeki mineraller ile yeraltısuyu arasındaki kimyasal süreçlerin etkilerini yansıtan bir kavram olarak tanımlanan hidrojeokimyasal fasiyes Back (1966) tarafından ortaya atılmıştır. Back (1966)'e göre hidrojeokimyasal fasiyes su içerisindeki meq/l cinsinden anyon ve katyon değerlerinin %50'den fazla oranlarına göre tanımlanır. İnceleme alanında su örneklerinin tamamının Ca ve HCO_3 içerikleri %50'den fazladır. Piper diyagramı suların sınıfları veya hidrojeokimyasal fasiyeslerinin tespitinde yaygın olarak kullanılmaktadır. İnceleme alanında yeraltısuları Piper diyagramına göre Ca- HCO_3 'lı sular fasiyesinde olduğu görülmektedir (Şekil 4). Ca soğuk yeraltısularında yüksek miktarda bulunan katyonlardan biri olup sudaki varlığı kaya-su etkileşimi ile ilişkilidir. Yeraltısularında Ca en fazla kalsit, dolomit, anhidrit, aragonit ve jips minerallerinde bulunmaktadır. Ek olarak, amfibol ve piroksen grupları, bazı feldispatlar, apatit ve florit gibi metamorfik ve mağmatik kaya mineralleri kaynaklı olarak da yeraltısularında Ca artışı gözlenmektedir (Şahinci, 1991). İnceleme alanındaki sularda tespit edilen yüksek Ca içeriği bölgede geniş alanlarda yüzeyleyen ve suların etkileşim halinde olduğu Beydağları formasyonuna ait kireçtaşları ile ilişkilidir. Yeraltısularında HCO_3 , atmosfer ve topraktaki CO_2 varlığı ile ilişkili olarak karbonatlı kayaçların erimesi ile bulunmaktadır. pH 8.2'den fazla olan sularda bikarbonat iyonları karbonat ve hidrojen iyonlarına ayrılır. Bu durum, pH 8.2'den daha düşük olan sularda HCO_3 'ın egemen olmasını sağlar.

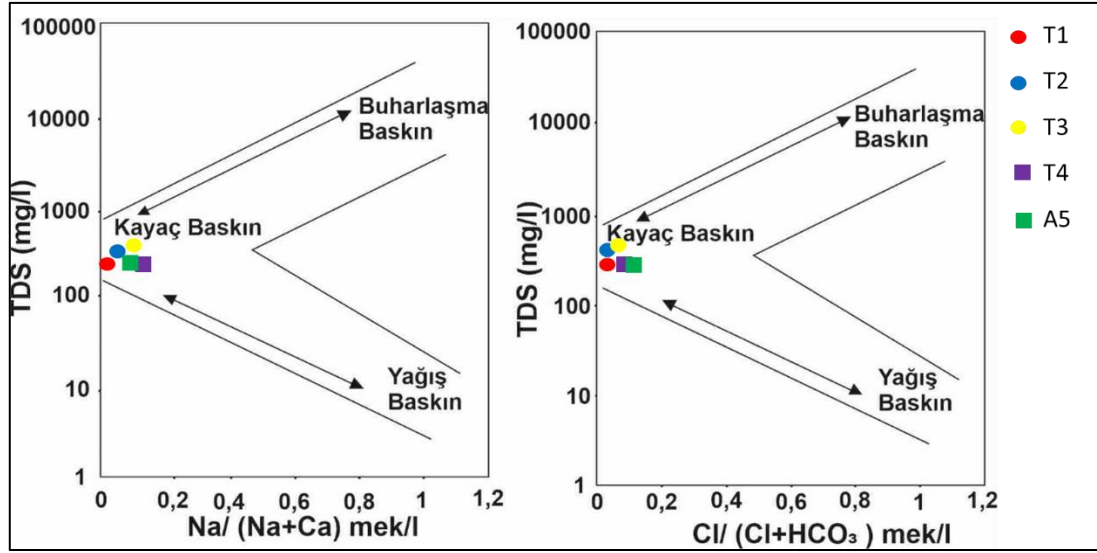


Şekil 4. Piper diyagramı (Piper diagram)

4.4.2. Hidrojeokimyasal prosesler (Hydrogeochemical processes)

Yeraltısularında toplam çözülmüş katıların önemli bir bölümünü oluşturan majör iyonlar akifer sisteminde gerçekleşen hidrojeokimyasal süreçlere bağlı olarak değişir. Yeraltısuyunun kimyasal yapısını kontrol eden olası hidrojeokimyasal süreçler ayrışma-çözünme (karbonat ayrışması-silikat ayrışması), iyon değişimi ve buharlaşma süreçleridir (Lakshmanan vd., 2003). Bu süreçler akifer ortam veya suların etkileşimde oldukları kayaçların bileşimleri, kayaç ve mineraller ile karşılaşma sırası, minerallerin çözünürlüğü, sıcaklık vb. birçok faktöre bağlı olarak değişir (Freeze ve Cherry, 1979). Suların majör iyon içeriklerini denetleyen süreçlerin tanımlanmasında Gibbs diyagramından yararlanılmaktadır. Gibbs (1970) tarafından önerilen iki diyagram, su bileşimi ile akiferin

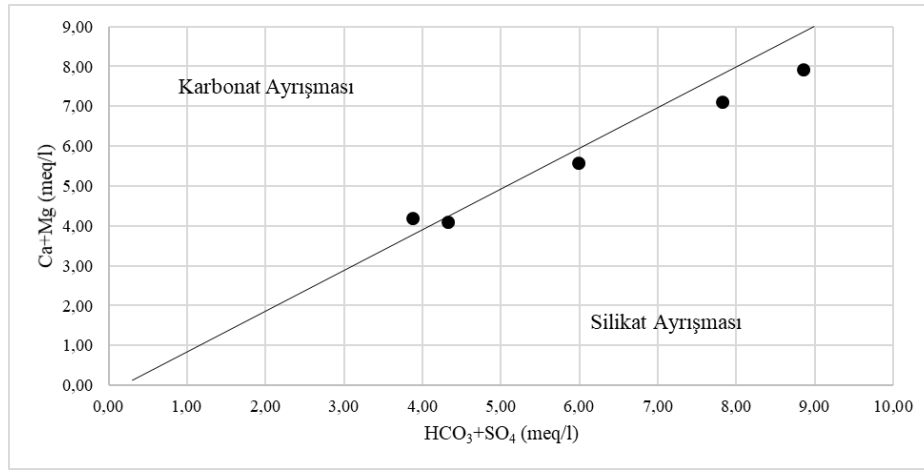
litolojik özellikleri arasındaki ilişkiyi tanımlamak için kullanılmaktadır. Bu diyagramda suyun Na, K, Ca, Cl, HCO₃ ve TDS değerleri ile belirlenen farklı oranlardan faydalanılmaktadır. Gibbs diyagramındaki (Şekil 3) veri noktaları, "Kayaç Baskın" bölgede bulunmaktadır. Bu durum, bölgede yeraltısuyu kimyasını denetleyen ana faktörün kaya-su etkileşimi olduğunu göstermektedir (Şekil 5).



Şekil 5. Gibbs diyagramı (Gibbs diagram)

Suların majör iyon içerikleri kullanılarak akifer sistemde gerçekleşen jeokimyasal süreçlerin tanımlanması mümkündür. Tanımlamalarda farklı iyon oranları ve grafikler kullanılmaktadır. Bu grafiklerden en çok kullanılanı (Ca+Mg)-(HCO₃+SO₄) grafiği olup minerallerin ayrışma ve çözünme süreçlerini tanımlamada yararlanılır. Grafikte 1:1 denge çizgisinin altındaki değerler silikat ayrışmasını, üstündeki değerler ise karbonat ayrışmasını gösterir (Rajmohan ve Elango, 2004; Kuldip vd., 2011; Şener vd., 2020; Davraz ve Batur 2021; Tay, 2021). İnceleme alanında yeraltıları genel olarak 1:1 çizgisinin altında olup silikat ayrışmasının baskın olduğunu göstermektedir (Şekil 6). Ayrıca, McLean ve Jankowski'ye (2000) göre, (HCO₃+SO₄)-(Ca+Mg) grafiğinde, 1:1 ilişkisi çözelti bileşimini kontrol eden baskın süreçler olarak jips, anhidrit, kalsit ve dolomit çözünmesini gösterirken, 1:1 çizgisinin altına düşen noktalar yeraltısuyu iyon değişimini göstermektedir, bu durumda Ca+Mg, HCO₃+SO₄'a göre tükenmiştir (Tay, 2021). Grafikte örnek noktaları 1:1 doğrusuna yakınsa kalsit, dolomit ve jips çözünürlüğünün baskın reaksiyon olduğu düşünülür (Datta ve Tyagi, 1996; Fisher ve Mulican, 1997). İnceleme alanından alınan yeraltısuyu örnekleri bu grafikte 1:1 doğrusuna yakın olduğu görülmektedir (Şekil 6). Bu durum sularda kalsit, dolomit ve jips çözünürlüğünün söz konusu olduğunu yansıtmaktadır.

Yeraltısuyunun Ca/Mg oranı kalsit ve dolomit çözünmesinin bir ölçüsü olarak kullanılmaktadır. Ca/Mg oranı 1'e eşit ise dolomit çözünmesi baskın olarak tanımlanırken oranının 1-2 arasında değişmesi kalsit çözünmesini yansıtır (Mayo ve Loucks, 1995). Bu oranın 2'den büyük değerleri yeraltısuyunda Ca ve Mg iyonlarındaki artışın silikat minerallerinin çözünmesi ile ilişkili olduğunu göstermektedir (Katz vd., 1998; Şener vd., 2020). İnceleme alanında yeraltısuyu örneklerinin Ca/Mg oranı 2'den büyük olup yeraltısuyunda tespit edilen Ca ve Mg iyonlarının kalsit minerallerinin çözünmesi kaynaklı olduğu söylenebilir (Tablo 1). Kireçtaşları farklı tane büyüklüğündeki kalsit kristallerinden yapılmış ve genel olarak beyaz renkli monomineralik bir kayadır. İnceleme alanında yeraltısuyu kireçtaşı akiferinden alınmakta olup kalsit varlığı kireçtaşları ile ilişkilidir. Yeraltısuyu örneklerinin Ca/(Ca+SO₄) oranı 0.5'den yüksek olup bu durum yeraltısuyunda Ca iyonu varlığında jips karbonatların etkisinin düşük olduğunu göstermektedir (Subramani vd., 2010). İnceleme alanında yeraltısuyu örneklerinin Ca/HCO₃ oranı 0.5'den büyük olması Ca ve HCO₃'ün kalsit ayrışmasından kaynaklandığını göstermektedir (Tablo 1). Ca+Mg/HCO₃ oranının 1'den büyük değerleri karbonat ayrışmasının baskın olduğunu gösterirken 1'den düşük değerleri silikat ayrışmasını işaret etmektedir (Pazant vd., 2012; Kumar Singh vd., 2012). Bölgede su örneklerinin Ca+Mg/HCO₃ oranı bir örnek hariç 1'den düşüktür. Sularda Ca, Mg ve HCO₃ varlığının karbonat olmayan kaynaklarla ilişkili olduğu ve silikat ayrışmasının baskın olduğunu söylenebilir.



Şekil 6. (Ca+Mg)-(HCO₃+SO₄) grafiği ((Ca+Mg)-(HCO₃+SO₄) graph)

Akifer malzemesinin yeraltı suyu kimyasal bileşiminin evrimindeki rolü, katyonlar (CAI-1) ve anyonlar (CAI-2) için kloro alkali indeksleri belirlenerek incelenmiştir. Schoeller (1967) tarafından geliştirilen CAI-1 $[Cl-(Na+K)]/Cl$ ve CAI-2 $[Cl-(Na+K)]/(SO_4+HCO_3+CO_3+NO_3)$ oranları ile yeraltısuyu ve akifer ortam arasındaki iyon değişim süreci ilişkilendirilmektedir. CAI-1 ve CAI-2 değerlerinin negatif olması, yeraltısuyundaki Ca ve Mg ile kayadaki Na ve K iyonları arasında değişimi gösterir ve bu da iyon değişimi olarak tanımlanır (Aghazadeh ve Mogaddam, 2011; Schoeller, 1967). Pozitif indeks değerleri, yeraltı suyundaki Na ve K ile akiferdeki Ca ve Mg arasında bir değişim olduğunda ters iyon değişimini gösterir. İnceleme alanından alınan su örneklerinin kloro alkali indeks değerleri negatif olup çalışma alanında iyon değişiminin baskın olduğunu göstermektedir. Ayrıca, negatif CAI-1,2 değerleri kloroalkalin dengesizliğini yansıtır. Bu ortamda akifer kayalar sudaki çözünmüş iyonların birincil kaynaklarıdır. Yeraltısuların Na/Cl oranı 1 civarında ve üstünde ise suda Na içeriğinin iyon alışverişi ile ilişkili olarak silikat ayrışması kaynaklı olduğu düşünülmektedir (Mayback, 1987, Kumar vd., 2006; Tay, 2012). İnceleme alanında su örneklerinin Na/Cl oranı bir örnek hariç 1'den büyüktür (Tablo 1).

4.4.3. Kullanılabilirlik özellikleri ve kalite değerlendirmeleri (Usability features and quality reviews)

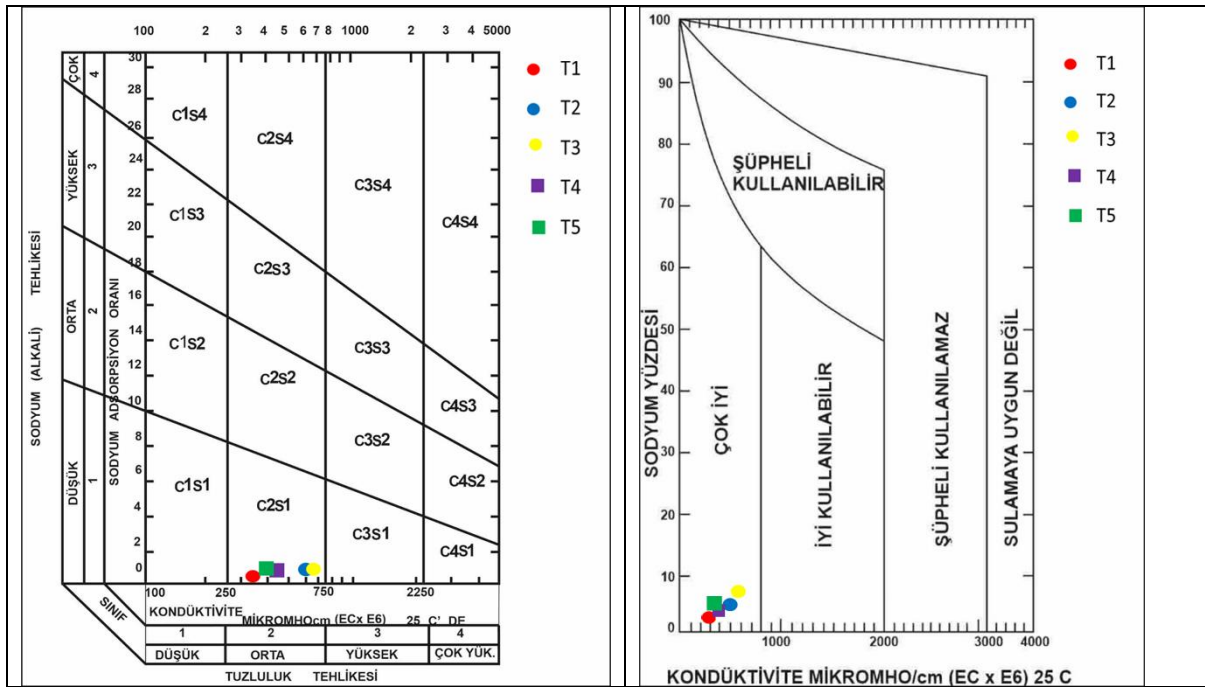
İnceleme alanı ve çevresinde sondaj kuyularından alınan sular sulama suyu amaçlı olarak kullanılmaktadır. Suların sulama suyu amaçlı kullanılabilirliğinin değerlendirilmesinde Wilcox ve ABD tuzluluk laboratuvarı diyagramları ile Sodyum Yüzdesi (%Na), Sodyum Adsorpsiyon Oranı (SAR), Artıksal Sodyum Karbonat (RSC), Magnezyum Tehlikesi (MT), Geçirgenlik İndeksi (PI) ve Kelly Oranı (KR) değerleri kullanılmıştır. Bu parametrelerin belirlenmesinde kullanılan formüller ve değerlendirme ölçütleri Tablo 2'de verilmiştir.

Sodyumun sulama sularında ve topraktaki fazlalığı toprak geçirgenliği azaltması ve toprak yüzeyinde tabaka oluşturabilmesi nedeniyle olumsuz etki yaratmaktadır. Bu nedenle %Na ve SAR parametreleri sulama suları için önemli olup sulama suyuna yönelik grafiklerde de kullanılmaktadır. İnceleme alanından alınan yeraltısuyu örneklerinin %Na değeri 3.36-7.28 arasında değişmektedir (Tablo 1). Sodyum yüzdesi açısından sular "Mükemmel" sulama suları sınıfındadır. Suların SAR oranı 0.10-0.31 arasında olup "Çok iyi özellikte sulama suları" sınıfındadır. RSC değeri toprakta süzülme oranı ile ilgili sorunun tahmininde kullanılan bir parametredir. RSC değerinin negatif olması durumunda toprakta sodyum zararı oluşma olasılığı bulunmadığı şeklinde yorumlanmaktadır (Eaton, 1950; Richards, 1954). Su örneklerinin RSC değeri -0.34 ile 0.59 arasında değişmekte olup "çok iyi-I. sınıf" suları temsil etmektedir (Tablo 1, 2). Pozitif RSC yeraltısularında sodyum zararı oluşturabilecek potansiyel CO₃ ve HCO₃ iyonu varlığını göstermektedir. Suların PI değerleri ise %41.49-51.96 arasında olup sulama suyu açısından "II. sınıf" suları temsil etmektedir. Sulama suyu kullanımında magnezyuma bağlı olumsuzlukların tespiti için kullanılan MT değeri inceleme alanındaki sulara %2.87-31.69 değişmekte olup "Uygun" su sınıfında yer almaktadır. KR değeri ise 0.03-0.08 arasında olup sulama suyu açısından "Uygun" su sınıfındadır (Tablo 1, 2).

Tablo 2. Sulama suyu sınıflamasında kullanılan parametreler (Parameters used in irrigation water classification)

Parametre	Sembol	Birim	Formül	Oranlar	Su sınıfı	Kaynaklar
Sodyum Yüzdəsi	%Na	mek/l	$\%Na = 100 * \left(\frac{rNa}{rNa + rCa + rMg + rK} \right)$	0-20 20-40 40-60 60-80 >80	Mükemmel İyi İzin verilebilir Şüpheli Uygun değil	Wilcox, 1955
Sodyum Adsorbsiyon Oranı	SAR	mek/l	$SAR = \frac{rNa}{\sqrt{\frac{rCa+rMg}{2}}}$	<10 10- 18 18- 26 > 26	Çok iyi özellikte sulama suları İyi özellikte sulama suları Orta özellikte sulama suları Kötü özellikte sulama suları	Todd, 1980 Richards, 1954
Artıksal sodyum karbonat	RSC	mek/l	$RSC = (rCO3 + rHCO3) - (rCa + rMg)$	< 1.25 1.25- 2.5 > 2.5	Çok iyi-I. Sınıf su İyi-II. Sınıf su Kullanılabilir-III. Sınıf su	Eaton, 1950 Richards, 1954 Raghuna th,1987
Magnezyum Tehlikesi	MT	mek/l	$MT = 100 * \left(\frac{rMg}{rMg + rCa} \right)$	<50 >50	Uygun Uygun değil	Raghuna th,1987
Geçirgenlik indeksi	PI	mek/l	$PI = 100 * \frac{rNa + r\sqrt{HCO3}}{r(Na + rCa + rMg)}$	>%25 %25- 75 <%75	I. sınıf II. sınıf III. sınıf	Doneen, 1964 Raghuna th,1987
Kelly oranı	KR	mek/l	$KR = \frac{rNa}{rCa + rMg}$	<1 1-2	Uygun Uygun değil	Kelly, 1963

Sulama suyu kullanılabilirliği değerlendirmelerinde ABD tuzluluk ve Wilcox diyagramı en çok yararlanılan diyagramlardır. İnceleme alanında su örneklerinin SAR, EC ve %Na değerlerine göre bu grafik üzerine yerleştirilmiştir. ABD tuzluluk diyagramına göre inceleme alanındaki sular orta ve fazla tuzluluğa sahip az sodyumlu suları temsil eden 'C2S1' sınıfında yer almaktadır (Şekil 7). Wilcox diyagramında göre ise sular "çok iyi-iyi kullanılabilir sular" sınıfında yer almaktadır.

**Şekil 7.** ABD tuzluluk laboratuvarı ve Wilcox diyagramları (ABD salinity laboratory and Wilcox diagrams)

Suların içme suyu olarak kullanılabilirliğinin yorumlanmasında ise su örneklerinin anyon-kasyon, iz element, fiziksel parametreler ve bakteriyolojik analiz sonuçlarının ülkelerde belirlenen standart değerlere uygun olması gerekmektedir. Ülkemizde İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik (İTASHY, 2005) kullanılmaktadır. Dünya genelinde ise Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2022) standartları ile değerlendirmeler yapılmaktadır. Çalışma kapsamında elde edilen fiziksel parametre, majör iyon ve azot türevi analiz sonuçları İTASHY (2005) ve WHO (2022) standartlarına uygun olduğu tespit edilmiştir. Ancak, suların içme suyu olarak kullanılması durumunda ek analizlerin yapılması zorunludur.

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada Dağbeli Köyü (Antalya) güneyinde bulunan kireçtaşı akiferinin hidrojeokimyasal özellikleri incelenmiştir. Özellikle Antalya ilinin başlıca içme suyu kaynaklarından olan Kırkgöz kaynakları inceleme alanı güneyinde bulunmakta olup çalışma kapsamında incelenen en önemli su kaynağıdır. Dağbeli Köyü çevresinde en önemli akifer birimler kireçtaşları ve alüvyondur. Beydağları formasyonu ve Tekkeköy üyesi bölgedeki karstik akifer özelliği taşımakta olan birimlerdir ve kireçtaşlarında açılmış sondaj kuyularından yüksek debide yeraltısuyu alınmaktadır. Çalışma kapsamında Dağbeli Köyü güneyinde bulunan kireçtaşı biriminde açılmış keson kuyu, sondaj kuyuları ve karstik akiferden boşalan Kırkgöz kaynaklarından yeraltısularının hidrojeokimyasal özelliklerini ve su kalitesini belirleyebilmek amacıyla Mart-2023 tarihinde su örnekleri alınmıştır. Örneklerin yerinde ölçüm ve kimyasal analiz sonuçları farklı grafik, diyagram ve standartlar kullanılarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre suların pH değeri 7.2-8.29 arasında ölçülmüştür ve "bazik karakterli" sular sınıfında olduğu belirlenmiştir. Suların sertliği 25.5-43.2 Fr° arasında değişmekte olup "oldukça sert-sert sular" sınıflarını temsil etmektedir. EC değerleri 352-730,3 µS/cm arasında; Toplam Çözünmüş Katı Madde (TDS) değerleri 193,7-401,66 mg/l arasında değişmekte olup suda çözünmüş katıların (tuzlar, mineraller, iz elementler vb.) toplam miktarını ifade etmektedir.

İncelenen yeraltısularında baskın katyon kalsiyumdur ve 79.33-119.1 mg/l arasında ölçülmüştür. Su örneklerinin baskın anyon ise HCO₃ olup içerikleri 208-518.7 mg/l arasındadır. Yeraltısuları Piper diyagramına göre Ca-HCO₃'lı sular fasiyesinde yer almaktadır ve Gibbs diyagramı bölgede yeraltısuyu kimyasını denetleyen ana faktörün kaya-su etkileşimi olduğunu göstermektedir. Hidrojeokimyasal süreçleri yorumlayabilmek için hazırlanmış olan (Ca+Mg)-(HCO₃+SO₄) grafiğine göre yeraltısularının kimyasal gelişiminde silikat ayrışmasının baskın olduğu ve kalsit, dolomit ve jips çözünürlüğünün söz konusu olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, sulardaki Ca ve Mg iyonlarının kalsit minerallerinin çözünmesi kaynaklı olduğu söylenebilir. Na iyonunun varlığı ise daha çok iyon alışverişi ile ilişkili olarak silikat ayrışması kaynaklıdır. Suların sulama suyu amaçlı kullanılabilirliğinin değerlendirilmesinde Wilcox ve ABD tuzluluk laboratuvarı diyagramları ile Sodyum Yüzdesi (%Na), Sodyum Adsorpsiyon Oranı (SAR), Artıksal Sodyum Karbonat (RSC), Magnezyum Tehlikesi (MT), Geçirgenlik İndeksi (PI) ve Kelly Oranı (KR) değerleri kullanılmıştır. Yapılan değerlendirmelere göre yeraltısuları sulama suyu olarak kullanılabilir özelliktedir. İçmesuyu kullanılabilirliğinin belirlenmesi için yeraltısularının fiziksel, majör iyon ve azot türevi analiz sonuçları İTASHY ve WHO limit değerleri ile karşılaştırılmış ve sözkonusu içmesuyu standartlarına uygun olduğu tespit edilmiştir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Aghazadeh, N., Mogaddam, A. A., 2011. Investigation of hydrochemical characteristics of groundwater in the Harzandat aquifer, Northwest of Iran. *Environmental monitoring and assessment*, 176(1), 183-195.
- Atilla, Ö., 1996. Çok Değişkenli İstatistiksel Analiz Teknikleri Kullanılarak Hidrojeokimyasal Verilerin Değerlendirilmesi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Mühendislik Tezi, Ankara.
- Back, W., 1966. Hydrochemical Facies and Ground-Water Flow Patterns in Northern Part of Atlantic Coastal Plain, 498-A, 1-42.
- Bilgin, Z.R., Karaman, T., Öztürk, Z., Şen, M.A., Şenel, M., 1990. Yeşilova-Acıgöl Civarının Jeolojisi Raporu. MTA Raporu, 9071, Ankara.
- Datta, P.S., Tyagi, S.K., 1996. Major ion Chemistry of Groundwater in Delhi Area: Chemical Weathering Processes and Groundwater Flow Regime. *Journal of Geological Society India* 47:179-188.
- Davraz, A., Karaguzel, R., Soyaslan, I., Sener, E., Seyman, F., Sener, S., 2009. Hydrogeology of karst aquifer systems in SW Turkey and an assessment of water quality and contamination problems. *Environmental Geology*, 58, 973-988.
- Davraz, A., Batur, B., 2021. Hydrogeochemistry characteristics of groundwater and health risk assessment in Yalvaç-Gelendost basin (Turkey). *Applied Water Science*, 11(4), 67.
- Doneen, L.D., 1964. Water Quality for Agriculture. Department of Irrigation, University of California, Davis, 48.
- Drew, D., 1999. Introduction. In: Drew D, Hötzl H (eds) Karst hydrogeology and human activities: impacts, consequences, and implications. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp 3-12
- Eaton, F.M., 1950. Significance of Carbonate in Irrigation Water. *Soil Science*, 69(2), 123-133.
- Egbueri, J. C., 2019. Evaluation and characterization of the groundwater quality and hydrogeochemistry of Ogbaru farming district in southeastern Nigeria. *SN Applied Sciences*, 1(8), 851.
- Ekmekçi, M., 2005. Pesticide and nutrient contamination in the Ketsel polje-Kırkgöz karst springs, Southern Turkey, *Environmental Geology*, 49: 19-29
- Erguvanlı, K., Yüzer, E., 1987. Yeraltısuları Jeolojisi, İTÜ yayınları no:23, 339s, İstanbul
- Fisher, R.S., Mullican, F.W., 1997. Hydrochemical Evolution of Sodium-Sulfate and Sodium-Chloride Groundwater Beneath the Northern Chihuahuan Desert, Trans-Pecos, Texas, USA. *Hydrogeology Journal*, 10(4), 455-474.

- Freeze, R. A., Cherry, J. A., 1979. Groundwater (p. 604). Englewood Cliffs: Prentice Hall.
- Gibbs, R.J., 1970. Mechanisms to Trace Metal Transport in Rivers. *Science*, 180:71-173.
- İrılaiıcı-Davraz, A., 1998. Eğirdir - Burdur Gölleri Arasının Hidrojeoloji İncelemesi, SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Isparta
- İ.T.A.S.H.Y., 2005. İnsani Tüketim Amaçlı Sular. Türk İçme Suyu Standartları TS 266 sayılı standart -Türk Standartları Enstitüsü - Ankara.
- Katz, B.G., Coplen, T.B., Bullen, T.D., Davis, J.H., 1998. Use of Chemical and Isotopic Tracers to Characterize the Interaction between Groundwater and Surface Water in Mantled Karst. *Groundwater*, 35, 1014-1028
- Kelley, W.P., 1963. Use of Saline Irrigation, *Water Soil Science*, 95(4), 355-391
- Kuldip, S., Hundal, H.S., Dhanwinder, S., 2011. Geochemistry and Assessment of Hydrogeochemical Processes in Groundwater in the Southern Part of Bathinda District of Punjab, Northwest India. *Environmental Earth Science*, 64, 1823-1833.
- Kumar Singh, A., Mondal, G.C., Singh, T.B., Singh, S., Tewary, B.K., Sinha, A., 2012. Hydrogeochemical processes and quality assessment of groundwater in Dumka and Jamtara districts, Jharkhand, India. *Environmental Earth Science*, 67, 2175-2191.
- Kumar, M., Ramanathan, A.L., Rao, M.S., Kumar, B., 2006. Identification and evaluation of hydrogeochemical processes in the groundwater environment of Delhi, India. *Environmental Geology*, 50, 1025-1039.
- Kumar, S. K., Rammohan, V., Sahayam, J. D., Jeevanandam, M., 2009. Assessment of groundwater quality and hydrogeochemistry of Manimuktha River basin, Tamil Nadu, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 159, 341-351.
- Lakshmanan, E., Kannan, R., Senthil Kumar, M., 2003. Major ion chemistry and identification of hydrogeochemical processes of ground water in a part of Kancheepuram district, Tamil Nadu, India. *Environmental Geosciences*, 10(4), 157-166.
- Maya, A.L., Loucks, M.D., 1995. Solute and Isotopic Geochemistry and Groundwater Flow in the Central Wasatch Range, Utah. *Journal of Hydrology*, 172, 31- 59.
- Mayback, M., 1987. Global Chemical Weathering of Surficial Rocks Estimated from River-Dissolved Loads., *American Journal of Science*, 287, 401-428.
- McLean, W., Jankowski, J., 2000. Groundwater quality and sustainability in an alluvial aquifer, Australia. In: Sililo et al (eds) Proceedings of XXX IAH congress on groundwater: past achievements and future challenges. Cape Town South Africa 26th November-1st December 2000. AA Balkema, Rotterdam, Brookfield
- Mostafa, M. G., Uddin, S. H., Haque, A. B. M. H., 2017. Assessment of hydro-geochemistry and groundwater quality of Rajshahi City in Bangladesh. *Applied Water Science*, 7, 4663-4671.
- Pazand, K., Hezarkhani, A., Ghanbari, Y., Aghavali, N., 2012. Geochemical and quality assessment of groundwater of Marand Basin, East Azarbaijan Province, northwestern Iran. *Environmental Earth Science*, 67, 1131-1143.
- Piper, A. M., 1944. A Graphic Procedure in the Geochemical Interpretation of Water Analyses. *Trans. Amer. Geophys. Union*, vol. 25, p. 914-923.
- Ragunath, H.M., 1987. Groundwater. New Delhi: Wiley.
- Rajmohan, N., Elango, L., Ramachandran, S., Natarajan, M., 2000. Major Ion Correlation in Groundwater of Kancheepuram Region, South India. *Indian Journal of Environmental Protection*, 20(3), 188-193.
- Richards, L.A., 1954. Diagnosis and Improvement of Saline Alkaline Soils, US Department of Agriculture, HandBook 60 (160)
- Schoeller, H., 1969. Qualitative evaluation of groundwater resources, In *Methods and techniques of groundwater investigation and development*, Water Research. India: UNESCO; p. 44-52.
- Subramani, T., Rajmohan, N., Elango, L., 2010. Groundwater geochemistry and identification of hydrogeochemical processes in a hard rock region, Southern India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 162, 123-137.
- Şahinci, A., 1991. Doğal Suların Jeokimyası, Reform Matbaası, 548s, İzmir.
- Şenel, M., 1997. Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü, 1/100000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları Isparta K-11(N25), No:11
- Şener, Ş., Şener, E., Davraz, A., Varol, S., 2020. Hydrogeological and hydrochemical investigation in the Burdur Saline Lake Basin, southwest Turkey. *Geochemistry*, 80(4), 125592.
- Şener, Ş., Bektaş, S., 2021. Antalya İli İçme Suyu Kaynaklarının Hidrojeokimyasal Özellikleri ve Sağlık Risk Değerlendirmesi. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 12(Ek (Suppl.) 1), 376-391.
- Tay, C.K., 2012. Hydrochemistry of Groundwater in the Savelugu-Nanton District, Northern Ghana. *Environmental Earth Science*, 67: 2077-2087.
- Tay, C. K., 2021. Hydrogeochemical framework of groundwater within the Asutifi-North District of the Brong-Ahafo Region, Ghana. *Applied Water Science*, 11(4), 72.
- Tayfur, G., Kirer, T., Baba, A., 2008. Groundwater quality and hydrogeochemical properties of Torbalı Region, İzmir, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 146, 157-169.
- Todd, D. K., Mays, L. W., 1980. Groundwater Hydrology. John Wiley & Sons. Inc., New York, 535.
- W.H.O., 2022. World Health Organization, Guidelines for drinking-water quality, Fourth edition incorporating the first and second addenda. ISBN 978-92-4-004506-4
- Wilcox, L., 1955. Classification and use of irrigation waters (No. 969). US Department of Agriculture.
- Yalçınkaya, S., Ergin, A., Afşar, Ö. P., Dalkılıç, H., Taner, K., Özgönül, E., 1986. Batı Torosların jeoloji raporu. Ankara: MTA Genel Müdürlüğü Jeoloji Etüdüleri Daire Başkanlığı, No: 7898, 131 s.



GOOSE ALGORİTMASI KULLANILARAK ÇİFT BANTLI MİKROŞERİT BAĞLANTILI KOMBİNE BANT GEÇİREN FİLTRE TASARIM PROBLEMİNDE DİZİ ARALIK SEÇİMİNİN SONUÇ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Ahmet ULUSLU^{1*}, Kervendurdy ALLABERDIYEV²

¹ İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, İstanbul, Türkiye

² İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Çift Bant Geçiren Filtre, Bağlantılı Hat, GOOSE algoritması, Meta Sezgisel Optimizasyon, Dizi Aralık Seçimi.</i>	Çift bantlı mikrodalga bant geçiren filtreler, çok bantlı radyo dalgası ve kablosuz uygulamalardaki talebi karşılamak için son gelişmelerde büyük ilgi görmüştür. Bu ihtiyacı karşılamak için optimizasyon yöntemlerine sıkça başvurulmaktadır. Burada karşılaşılan bir diğer büyük problem ise optimizasyonda seçilecek giriş veri setlerinin değer genişlik aralığının seçimidir. Bu makalede, 5G kablosuz iletişim sistemleri için 2,8 GHz ve 3,3 GHz için spektrum bant geçiren kompakt bir mikroşerit bant geçiren filtre (BGF) optimizasyon problemi üzerinden giriş veri seti aralığının seçiminin optimizasyon problemi üzerindeki başarısının katkısı sunulmaktadır. Yapılan çalışmada giriş parametre sayısının yüksekliğinin yanı sıra seçilen filtre modelinin çift bantlı olması optimizasyon problemini oldukça zorlaştırmaktadır. Bu nedenle algoritma olarak güncel ve oldukça başarılı bir algoritma tercih edilmiştir. Tasarım sonuçları MATLAB programı kullanılarak filtrenin S (dB) parametreleri simülasyon olarak sergilenmiştir. Ayrıca seçilen aralıkların sonuçları tablo olarak ele alındığında oldukça değişken başarılar elde edildiği görülmektedir. Buda optimizasyon problemlerinde, giriş veri setinde genişlik aralık seçimi büyük önem arz ettiğini göstermektedir.

THE EFFECT OF SERIES RANGE SELECTION ON THE RESULT IN THE DESIGN PROBLEM OF A COMBLINE BAND PASS FILTER WITH DUAL BAND MICROSTRIP CONNECTION USING THE GOOSE ALGORITHM

Keywords	Abstract
<i>Dual Bandpass Filter, Connected Line, GOOSE algorithm, Metaheuristic Optimization, Series Range Selection.</i>	Dual-band microwave bandpass filters have attracted great attention in recent developments to meet the demand in multiband radio wave and wireless applications. Optimization methods are frequently used to meet this need. Another big problem encountered here is the selection of the value width range of the input data sets to be selected in optimization. In this article, the contribution of the success of the selection of the input data set range on the optimization problem through a compact microstrip bandpass filter (BPF) optimization problem with spectrum bandpass for 2.8 GHz and 3.3 GHz for 5G wireless communication systems is presented. In the study, the high number of input parameters as well as the fact that the selected filter model is dual-band makes the optimization problem very difficult. For this reason, an up-to-date and very successful algorithm was preferred. The design results of the filter's S (dB) parameters were simulated using the MATLAB program. In addition, when the results of the selected intervals are considered as a table, it can be seen that quite variable success has been achieved. This shows that in optimization problems, width range selection in the input data set is of great importance.

Alıntı / Cite

Uluslu, A., Allaberdiyev, K., (2024). GOOSE Algoritması Kullanılarak Çift Bantlı Mikroşerit Bağlantılı Kombine Bant Geçiren Filtre Tasarım Probleminde Dizi Aralık Seçiminin Sonuç Üzerindeki Etkisi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 12(3), 557-571.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

A. Uluslu, 0000-0002-5580-1687
K. Allaberdiyev, 0009-0000-2685-7860

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	24.04.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date	28.06.2024
Kabul Tarihi / Accepted Date	23.08.2024
Yayın Tarihi / Published Date	26.09.2024

* İlgili yazar / Corresponding author: auluslu@iuc.edu.tr, +90-212-866-3700

THE EFFECT OF SERIES RANGE SELECTION ON THE RESULT IN THE DESIGN PROBLEM OF A COMBLINE BAND PASS FILTER WITH DUAL BAND MICROSTRIP CONNECTION USING THE GOOSE ALGORITHM

Ahmet ULUSLU^{1†}, Kervendurdy ALLABERDIYEV²

¹ Istanbul University-Cerrahpaşa, Department of Electronics and Automation, Istanbul, Türkiye

² Istanbul University-Cerrahpaşa, Institute of Graduate Studies, Istanbul, Türkiye

Highlights

- In the study, the difficult optimization problem of a dual-band microwave bandpass filter, which is a challenging design and can respond to the demands in wireless applications, was used to illuminate the selection of the optimal parameter range of the input set, which is a very new and never used in this field, by using an updated metaheuristic algorithm.
- The results obtained from the design are shown as simulation of the S (dB) parameters of the filter using the MATLAB program.
- As a result of the study, a study that can be used as a reference for input parameter data input range selection in future studies, just like the objective function selection study (Uluslu, 2023), has been revealed.
- After the study, the selection of the input data set range can be determined automatically at the beginning of the algorithm with the help of Latin Hypercube and Monte Carlo sampling methods.

Graphical Abstract

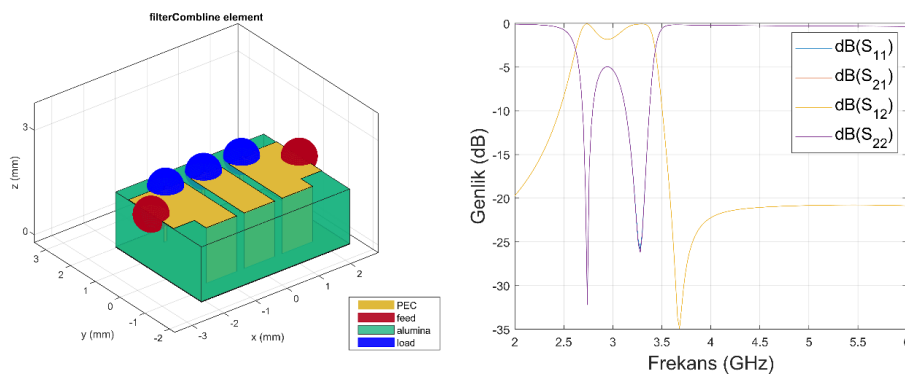


Figure. Using the GOOSE algorithm in dual bandpass combined filter design: (a) Schematic view of the filter (b) S parameter (dB) simulations [data set range (R) = 40%]

Purpose and Scope

The main purpose of this study is to shed light on the selection of the optimal parameter range of the input set, which creates a big question mark in the minds of designers in optimization problems.

Design/methodology/approach

Experiments have been made on the challenging optimization problem of a dual-band microwave bandpass filter, which is a challenging design and can meet the demands in wireless applications, using an updated metaheuristic algorithm that is very new and has never been used in this field. The results obtained are presented both as figures and tables.

Findings

As a result of the study, a study that can be used as a reference for input parameter data input range selection in future studies, just like the objective function selection study (Uluslu, 2023), has been revealed.

Research limitations/implications

The results obtained reached a value of 40% of the data set, which is neither small nor large. Therefore, the most successful results achieved remained within the limits of 20% and 50%. The results obtained from the design are shown as simulation of the S (dB) parameters of the filter using the MATLAB program.

Practical implications

After the study, the selection of the input data set range can be determined automatically at the beginning of the algorithm with the help of Latin Hypercube and Monte Carlo sampling methods.

Social Implications

Light has been shed on the selection of the optimal parameter range of the input set, which creates a big question mark in the minds of designers.

Originality

There is no similar study in the literature. In addition, the fact that the selected algorithm and filter are up-to-date supports the novelty of the study. The selected study topic is a reference for future studies.

[†] Corresponding author: auluslu@iuc.edu.tr, +90-212-866-3700

1. Giriş (Introduction)

Mikroşerit filtresi, geçiş bandı içinde istenen frekans sinyalini iletirken istenmeyen frekans sinyalini zayıflatan iki portlu bir ağıdır ve frekans tepkileri kontrol edilebilir (Pozar, 2011). Genel olarak mikrodalga filtreleri, düşük geçişli, yüksek geçişli, bant geçiren ve bant durdurucu filtreler olmak üzere dört tipik frekans karakteristiğine göre sınıflandırılabilir (Rezaei vd., 2012; Uluslu, 2021). Günümüzde mikrodalgalar, endüstriyel ve tıbbi kullanımlarda ısıtma, evsel mikrodalga fırınlarda hızlı pişirme ve çevresel uzaktan algılama için yaygın olarak kullanılmaktadır (Das & Das, 2010). Mühendisler, mikroşerit çizgileri, şerit çizgileri, koaksiyel çizgileri, yarık çizgileri, dalga kılavuzları ve mikrodalga kaynakları gibi mikrodalga destekli yapılar için yeni yöntemler geliştirmek için özel mikrodalga özelliklerinden yararlanılır. Mikrodalga bileşenleri, zayıflatıcılar, izolatörler, sirkülötörler, faz değiştiriciler, yön değiştiriciler, karıştırıcılar, faz değiştiriciler ve detektörler gibi dağıtılmış bileşenlerden oluşur ve cihazın fiziksel kapsamı boyunca voltaj veya akım fazı önemli ölçüde değişir.

Bant geçiren filtreler, frekansın belirli bir aralık içinde kalmasına izin verirken aynı zamanda bu aralık dışında kalan herhangi bir sinyali reddeder. Alçak geçiren filtreler ve yüksek geçiren filtreler, standart bir bant geçiren filtre oluşturmak için birleştirilebilir (Belen & Belen, 2023). Bununla birlikte, ISM bant filtresinin gelişmesi nedeniyle, mikroşerit çift bantlı bant geçiren filtre, çok bantlı antenler ve çok bantlı filtreler gibi ek donanıma ihtiyaç duyar (Göçen vd., 2022). Radyo frekansı enerjisinin endüstriyel, bilimsel, tıbbi, evsel veya benzeri amaçlarla yerel olarak kullanılmasını sağlamak için geliştirilen ekipmanın çalışması, ISM uygulamaları tarafından tanımlanmaktadır.

Günümüzde kablosuz iletişimdeki gelişmeler ve yeni sistemlerin ortaya çıkışı, uygun fiyatlı ve küçük çift bantlı mikrodalga filtrelerine olan talebin artmasına neden olmuştur. Çift bantlı bant geçiren filtreler yapmak için, iki farklı bant genişliğinde çalışan iki filtrenin birleştirilmesi veya bir geniş bantlı bant geçiren filtre ve bir bant durdurucu filtreden oluşan bir kademenin kullanılması gibi birçok yöntem vardır (Ragavi. vd., 2023). Sonuç olarak, mevcut filtrenin bu dezavantajlarını ele almak ve etkili bir çözüm elde etmek için, filtrenin toplam boyutunu, ağırlığını ve maliyetini azaltabilen ve ekleme kaybını azaltabilen bir mikroşerit çift bantlı bant geçiren filtreler önerilmiştir (Gomez-Garcia & Yang, 2021; B. P. Kumar & Baskar, 2022; N. Kumar & Kumar, 2015; Malki vd., 2022; Wan vd., 2023; Yang vd., 2024; Zhao vd., 2024).

ISM bandı genellikle kurallara uygun, lisanssız bir radyo frekansı spektrumudur. Bununla birlikte, ISM bandı kullanıcılarının diğer kullanıcıların müdahalesine karşı güvenli bir güvence yoktur. ISM bandı uygulamaları, radyo frekansındaki (RF) endüstriyel, bilimsel ve tıbbi ihtiyaçlar için uluslararası olarak ayrılmıştır. ISM ekipmanı aynı frekansı kullanırken elektromanyetik girişim radyo iletişimlerini kesintiye uğratar. Sonuç olarak, radyo bandı yalnızca belirli frekans bantlarıyla kullanılabilir. Yüksek hızlı kablosuz LAN'larda çalışan iki ISM frekansı olan 2,8 GHz ve 3,3 GHz bantlarında çalışacak şekilde çift bantlı bir mikroşerit bant geçiren bir filtre önerilmiş ve tasarlanmıştır. Ayrıca PCB üzerinde paralel çift mikroşerit filtrelerin imalatı daha kolaydır ve seri üretim daha ucuzdur. Kablosuz iletişimdeki son gelişmeler, RF devrelerinin çift bantlı bant geçirmesini zorunlu kılmıştır (Hong-Ming Lee vd., t.y.; Miyake vd., t.y.; Quendo vd., t.y.; Tsai & Hsue, 2004).

Çalışmada kullanılacak olan yeni bir meta sezgisel algoritma olan GOOSE algoritması kazın dinlenme ve yiyecek arama sırasındaki davranışına dayanan bir yöntemdir. Kaz tek ayak üzerinde durur ve sürüdeki diğer hayvanları korur. Genetik algoritma (GA), Parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO), Yusufçuk algoritması (YA) ve Uygunluğa bağlı optimize edici (UBO) ile karşılaştırmalı bir çalışma, GOOSE algoritmasını iyi bilinen 19 kıyaslama testi işleviyle karşılaştırılan bir çalışmada başarısı teyit edilmiştir (Hamad & Rashid, 2024). Ayrıca bu çalışmada 10 modern kıyaslama fonksiyonu üzerinde test edilmiş ve elde edilen sonuçlar Yusufçuk algoritması (YA), Balina optimizasyon algoritması (BOA) ve Salp sürüsü algoritması (SSA) gibi güncel üç algoritmayla karşılaştırılmıştır (Hamad & Rashid, 2024). Tüm bu elde edilen bulgular mühendislik vaka çalışmalarının sonuçları, önerilen yaklaşımın gerçek dünyada ortaya çıkan sorunlar için GOOSE algoritmasının rahatlıkla kullanılabileceğini göstermektedir.

Bu fikir doğrultusunda bu yazıda GOOSE algoritması, geliştirilmiş bir amaç fonksiyonu desteği ile mikroşerit çift bantlı filtre tasarımında başarıyla uygulanmaktadır. Bu algoritmayı kullanan tasarım süreci basittir ve en önemlisi zamandan tasarruf sağlamaktadır. Simülasyon sonuçları, algoritmanın geleneksel doğrudan optimizasyon yöntemine göre daha iyi bir filtre performansı sağlayabileceğini göstermektedir.

Özetle çalışmada öne çıkanlar:

- Çalışmada, zorlu bir tasarım olan ve kablosuz uygulamalardaki taleplere cevap verebilen çift bantlı mikrodalga bant geçiren filtrenin zor optimizasyon problemi, giriş setinin optimal parametre aralığının seçimini aydınlatmak amacıyla kullanılmıştır. Güncellenmiş bir meta-sezgisel algoritma kullanan, çok yeni ve bu alanda hiç kullanılmayan bir algoritmadır.

- Tasarımdan elde edilen sonuçlar, filtrenin S (dB) parametrelerinin MATLAB programı kullanılarak simülasyonu olarak gösterilmiştir.
- Çalışma sonucunda tıpkı amaç fonksiyonu seçimi çalışması gibi (Uluslu, 2023) gelecekteki çalışmalarda giriş parametresi veri giriş aralığı seçimi için referans olarak kullanılabilir bir çalışma ortaya çıkarılmıştır.
- Çalışmanın ardından giriş veri seti aralığının seçimi, Latin Hypercube ve Monte Carlo örnekleme yöntemleri yardımıyla algoritmanın başında otomatik olarak belirlenebilir.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Literatürde yapılmış olan çalışmalarda mikroşerit hat filtreleri için firkete, tarak hattı, paralel bağlı hat, adım empedansı ve saplama empedansı gibi birçok farklı yapı ve teknikler önerilmiştir (BELEN & MAHOUTİ, 2019; Lin vd., 2007; Maharjan & Kim, 2014; Psychogiou vd., 2018; Rajendran, 2012; Saad vd., 2008; Shaman, 2012; ULUSLU, 2022; Yi-Ming Chen vd., 2007). Bir çalışmada, 2,40 GHz ila 2,48 GHz geçiş bandı için 0,5 dB dalgalanmalı bir Chebyshev mikroşerit filtresi önerilmiştir (Rajendran, 2012). Bir diğer çalışmada, yeni bir mikroşerit bağlantılı hat tekniği kullanılarak kompakt düzlemsel bant geçiren filtre (BGF) geliştirilmiştir (Shaman, 2012). Merkez frekansı yaklaşık 3,0 GHz olan bir filtre oluşturmak için çeyrek dalga boyu uzunluğunda üç paralel bağlı çizgiden oluşan iki bölüm kullanılmıştır. Başka bir yaklaşım, düşük sıcaklıkta ortak ateşlemeli seramik olarak bilinen, güvenilir elektromanyetik analiz yoluyla uygulanması daha uygun olan ve fiziksel boyutları en aza indiren filtre yapıları sağlamaktadır (Saad vd., 2008). Düzlemsel saç tokası rezonatörler, fiziksel olarak küçük bir bant geçiren filtreler kullanılmaktadır. T besleyiciler ile firkete şekli boyunca farklı bir birleştirme etkisi, firkete filtresinin yapımında kullanılmaktadır (Maharjan & Kim, 2014). RFID uygulamaları için gerekli olan simüle edilmiş 5,8 GHz merkez frekansından yaklaşık 0,2 GHz daha düşük bir frekans kullanılmaktadır. Kombine filtre tasarımı, küçük fiziksel boyutları ve düşük kayıp avantajları nedeniyle artık çok sayıda uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır (Lin vd., 2007; Yi-Ming Chen vd., 2007). Yapılan çalışmada, iki kutup ve 27,6 x 5 mm²'lik bir alan içeren yeni geliştirilmiş birleştirilmiş bant geçiren filtrenin çoklu iletim sınırları olduğu belirtilmektedir (Lin vd., 2007). 1,43 GHz merkez frekansı, 3 dB kesirli bant genişliği yaklaşık %11,51, ekleme kaybı yaklaşık 2,781 dB ve geçiş bandı dönüş kaybı yaklaşık 18,1 dB'dir. Kademeli impedanslı geliştirilmiş bir birleşik bant geçişi tasarlanmış ve açıklanmıştır (Yi-Ming Chen vd., 2007). Alt tabakaya entegre dalga kılavuzu teknolojisinde kompakt, tek katmanlı bir filtreleme güç bölücü sunulmuştur. Dağıtılmış birleştirme hattı rezonatörleri, Chebyshev filtreleme tepkisi ile bir güç bölücü oluşturmak için etkili bir şekilde uyarlanmıştır. Simülasyon ve deneysel sonuçlar iyi bir uyum içinde olan bu çalışma ile %50'lik bir boyut küçültme ile birlikte mükemmel seçicilik performansı sergilenmiştir (Farahani vd., 2021). 1,85GHz mikrodalga bant geçiş uygulamaları için Yüksek frekans yapı simülatörü (YFYS) kullanılarak dikdörtgen dalga kılavuzu boşlukları ve Çebişev yaklaşımına dayalı çok portlu bir tarak çizgisi filtresinin yeni bir geometrik boyutlandırma ve boyutlandırma ayarlama stratejisini önermektedir. Geliştirilen filtre tasarımı, diğer yeni yüksek performanslı filtre topolojilerinin tasarlanmasına olanak tanıyan uygulanan optimizasyon yönteminin doğru kullanılabilirliği nedeniyle diğer filtre prototiplerine kolayca uyarlanabilir (Damou vd., 2022). Eklemeli üretim için tasarlanan bu filtre, dikey olarak 3D yazdırılabilir bir geometri sağlamak için üçgen irisler ve boşluklar kullanılabilir (Sirci vd., 2021). Gelişmiş elektriksel tepkiye sahip dalga kılavuzu birleşik bant geçiren filtrelerin tasarlanması için çok etkili bir prosedür sunulmaktadır. Önerilen teknik, tasarım sürecini daha basit aşamalara bölerek optimize edilecek değişken sayısını azaltan bir segmentasyon stratejisine dayanmaktadır. Ayrıca, deneysel bir doğrulama olarak, simüle edilmiş ve deneysel veriler arasında iyi bir uyum gösteren simetrik filtrenin bir prototipi üretilmiştir (Jamshidi-Zarmehri vd., 2023).

Yapılan başka bir çalışmada, 2,47 – 2,68 GHz ve 5,04 – 5,29 GHz arasındaki frekanslar için çift bantlı bir mikroşerit bant geçiren filtrenin geliştirilmesini ve optimizasyonunu sunulmuştur. Filtreleme ve kablosuz iletişim alanına kısa bir girişle başlayarak, ANSYS HFSS yazılımını kullanarak sayısal modelleme incelenerek, ardından filtre parametrelerinin pratik uygulamasını ve ölçümü takip edilmiştir. Geometri, dielektrik ve bağlantıdaki değişikliklerin filtre performansını nasıl etkileyebileceğini ayrıntılarıyla anlatılmış ve simüle edilmiş verileri deneysel sonuçlarla karşılaştırarak sonuçlar sunulmuştur (Andreica vd., 2023).

Bir diğer çalışmada ise Z-domain yaklaşımı kullanılarak çift bantlı bant geçişli mikrodalga filtre tasarımı tanıtılmaktadır. Bu bildiriye önerilen tasarım tekniğinde, istenilen çift bant geçiş filtresinin analog özellikleri dijital özelliklerine dönüştürülmüştür. Dijital filtre sınırları uygun bir optimizasyon tekniği ile kaldırılmaktadır. Çift geçişli bant filtresinin istenen filtre katsayılarını elde etmek için genetik algoritma tabanlı optimizasyon tekniğini (DSP tabanlı) uygulanır. Filtre katsayıları ileri transfer saçılma matrisi (S_{21}) cinsinden hesaplanmıştır. Bu filtre katsayıları, açık devre koçanlarının, kısa devre koçanlarının ve iletim hattı bölümlerinin karakteristik empedansının uygun değerlerini verir. Teorik sonuç çift bant geçişli mikrodalga filtresi MATLAB ve HFSS Simülasyon aracında doğrulanmıştır (P. Kumar, 2015).

Bu makalede, 5G kablosuz iletişim uygulamalarına uygun, 2,8 ile 3,3 GHz frekans bandını kapsayacak şekilde MATLAB yazılım araçları kullanılarak fiziksel olarak küçük bir üçüncü dereceden mikroşerit kombi hattı BGF tasarlanmıştır. Bir dielektrik substratı kullanır. Filtre tasarımı ve performansı sonraki bölümlerde sunulmakta ve tartışılmaktadır.

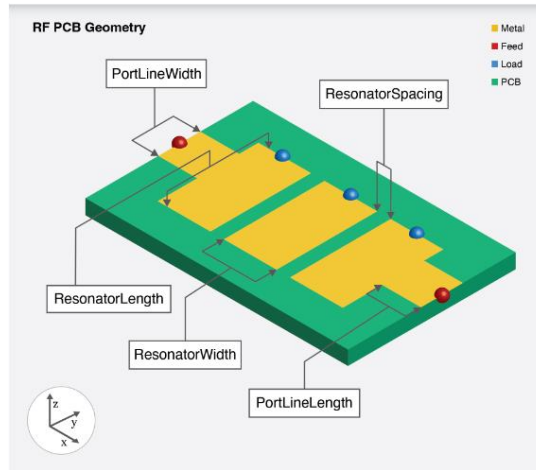
3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

3.1. Matematiksel Model (Mathematical Model)

Kullanılan filtrenin tasarım temelinde, empedans ve frekans bakımından normalleştirilmiş bir Butterworth alçak geçiren filtre prototipiyle başlamaktadır. Daha sonra prototip tasarımını (BDF) istenilen frekans aralığına (BGF) dönüştürmek için dönüşümler uygulanır. Bu iki adım, toplu elemanların (kapasitörler ve indüktörler) devrelerine yol açmaktadır. Son olarak, toplu elemanları mikroşerit iletim hattına dönüştürmek için Richards dönüşümü kullanılır (Hong & Lancaster, 2001).

3.1.1. Filtre tasarımı (Filter design)

Düzlemsel filtre, her biri bir ucunda geçiş deliği topraklaması ve diğer ucunda giriş ve çıkış terminalleri için 50Ω iletim hattı empedanslarına sahip bir kapasitör ile sonlandırılan üç rezonatör kullanır. Hatlar arasındaki bağlantı, üçüncü dereceden bant geçiren Butterworth özellikleriyle merkez frekansta rezonansa girecek şekilde ayarlanır (Al-Yasir vd., 2018). Önerilen birleşik filtre, 6 tanesi değişken olmak üzere toplamda 13 farklı parametre barındırır. Bununla birlikte, MATLAB R2022B versiyonu itibari ile kullanıma sunulan R2023B versiyonu kullanılarak simüle ve optimize edilmiştir. Filtre tasarımının şematığı ve tasarım parametreleri Şekil 1 ve Tablo 1'de detaylı olarak verilmiştir.



Şekil 1. Çift bantlı mikroşerit bağlantılı kombine bant geçiren filtrenin şematik görünümü (Schematic view of dual-band microstrip junction combline bandpass filter)

Tablo 1. Kombine filtre tasarımı için parametreler (Parameters for combline filter design)

Parametre	Merkez Değer	Değer Aralık	Tanım
ResonatorLength	3 (mm)	\mp %20, %30, %40, %50	Rezonatörün uzunluğu
ResonatorWidth	1,6 (mm)	\mp %20, %30, %40, %50	Rezonatörün genişliği
ResonatorSpacing	0,4 (mm)	\mp %20, %30, %40, %50	Rezonatörler arasındaki boşluk
PortLineLength	1.1 (mm)	\mp %20, %30, %40, %50	Giriş ve çıkış hatlarının uzunluğu
PortLineWidth	1,3 (mm)	\mp %20, %30, %40, %50	Giriş ve çıkış hatlarının genişliği
GroundPlaneWidth	5,0 (mm)	\mp %20, %30, %40, %50	Yer düzleminin genişliği
FilterOrder	3	Sabit	Filtre sırası
ResonatorOffset	0	Sabit	Her rezonatörün Y ofseti
FeedOffset	3,00E-01	Sabit	Giriş ve çıkış hatları için Y ofseti
Capacitor	1 pF	Sabit	Kapasitör değeri
Height	1,6 (mm)	Sabit	Kombine filtrenin zemin düzleminde yüksekliği
Substrate	dielektrik	Sabit	Dielektrik malzeme nesnesinin türü
Conductor	Metal	Sabit	Katman nesnesinin iletilmesinde kullanılan metal türü

Çift bantlı mikroşerit bağlantılı kombine bant geçiren filtre tasarım optimizasyonu Tablo 1'de verilen optimizasyon değişkenleri kullanılarak GOOSE algoritması ile yapılmıştır.

3.2. Önerilen Yöntem (Proposed Method)

Bu çalışmada, bir çift bantlı mikroşerit bağlantılı kombine bant geçiren filtre tasarımının optimizasyon problemi ile çözerken henüz çok yeni olan ve bu alanda kullanılmamış olan GOOSE algoritması kullanılarak giriş veri seti aralık seçiminin optimizasyon problemi üzerindeki etkisi ölçülecektir. Seçilen algoritma literatür taramasında bulunan çalışmada farklı problemler için diğer algoritmalar karşısında oldukça başarılı sonuçlar vermiştir (Hamad & Rashid, 2024). Giriş veri seti değer aralıkları Tablo 1'de belirtildiği gibi değişken olan 6 parametre için merkez değeri (varsayılan) baz alınarak $\pm\%20$, $\pm\%30$, $\pm\%40$ ve $\pm\%50$ olacak şekilde test edilecektir. Her bir sonuç ayrı ayrı ele alınıp elde edilen veriler sonuçlar kısmında detaylı olarak belirtilecektir. Çalışmanın en sonunda ise en düşük maliyet fonksiyonuna sahip sonuçlar tasarım sonucu olarak simüle edilerek sonuçları sunulur. Aşağıdaki alt bölümlerde GOOSE optimizasyon algoritması kısaca özetlenerek bu optimizasyonda kullanılacak olan amaç ve maliyet fonksiyonları hakkında detaylı bilgi verilecektir.

3.2.1. GOOSE algoritması (GOOSE algorithms)

GOOSE algoritması ilk olarak popülasyonu, yani X matrisini başlatır. X , bir kazın konumunu temsil eder. Popülasyon başlatıldıktan sonra, arama alanı dışına çıkan arama ajanları yani kazlar geri döndürülür. Her yineleme için her arama ajanının uygunluğu standart test fonksiyonları aracılığıyla belirlenir. Aramadaki her ajanın (X matrisindeki her satır) uygunluk değeri ölçülerek en iyi uygunluk ($BestFitness$) ve en iyi konum ($BestX$) değerlerini bulmak için diğer ajanların ($diğer\ satırlar$) uygunluk değerleriyle karşılaştırılır. $BestFitness$ ve $BestX$, her bir mevcut satırın uygunluğunu ($fitness_{i+1}$) bir önceki satırın uygunluğuyla ($fitness_i$) karşılaştıran işlemlerdir. Sonraki adımlarda, keşif ve kullanım aşamaları bir koşul ve rastgele bir değişken kullanılarak dengelenir. Bu değişken, yineleme sayısına göre aşamaları eşit olarak dağıtmayı amaçlamaktadır. "rnd" olarak adlandırılan rastgele değişken kullanılarak kazda keşif veya kullanım için %50 olasılık verilir. Koşullu bir ifade ile yinelemeler keşif ve kullanım arasında eşit olarak bölünür. Ayrıca, "pro", "rnd" ve "coe" gibi rastgele değerler alan başka değişkenler de vardır. "Pro", "rnd" ve "coe" değişkenlerinin değerleri 0 ile 1 arasında bulunur. "Coe" değerinin 0,17'den küçük veya eşit olup olmadığını kontrol etmek için bir koşul belirlenir; aksi takdirde, değer 0,17'ye eşitlenir. "Pro" değişkeninin işlevi, hangi denklemin çalışacağını belirlemektir. Ayrıca, kazın ayağıyla taşıdığı taşın ağırlığını temsil eden değişken de bulunur. Keşif ve kullanım aşamaları ileri kısımlarda ayrıntılı olarak tartışılacaktır (Hamad & Rashid, 2024).

3.2.1.1 Kullanım aşaması (Usage phase)

Bölüm 3.2.1'de açıklandığı gibi, grupları koruma olasılığı, kullanım aşaması için sahip olduğumuz bir ön koşuldur. Hedef kazın ayağında tuttuğu taşın ağırlığını bulmaktır. Bu ağırlığın 5 ile 25 kg arasında olduğu tahmin edilmektedir. Denklem (1) aracılığıyla, herhangi bir yineleme için taşın ağırlığını rastgele bulunur. Bu değişken, yineleme sayısını gösterir.

$$Stone_Weight_{it}=randi([5,25],1,1) \quad (1)$$

Daha sonra, Denklem (2)'de, taş düştüğünde yere ulaşması için gereken süre olan " $Time_of_Arrive_Object_{it}$ "i bulunmalıdır. Bu süre, döngüdeki her yineleme için 1 ile boyut sayısı arasında rastgele bir değerdir.

$$Time_of_Arrive_Object_{it}=rand(1, dim) \quad (2)$$

Denklem (3)'te, nesne yere çarptığında ve bir ses çıkarıp sürüdeki bireysel kaza iletildiğinde geçen süre olan " $Time_of_Arrive_Sound_{it}$ "i bulunur.

$$Time_of_Arrive_Sound_{it}=rand(1, dim) \quad (3)$$

Bir sonraki denklemden, yinelemeler boyunca sesin yayılması ve sürüdeki bireysel kaza ulaşması için gereken toplam süre keşfedilir. Denklem (4)'te gösterildiği gibi, toplam süre boyut sayısına bölünür. Gerekli ortalama süreyi elde etmek için toplam süre 2'ye bölünür. Denklem (5) adımları açıklayan kısımdır.

$$Total_time=\frac{\sum(Time_of_Arrive_Sound_{it})}{dim} \quad (4)$$

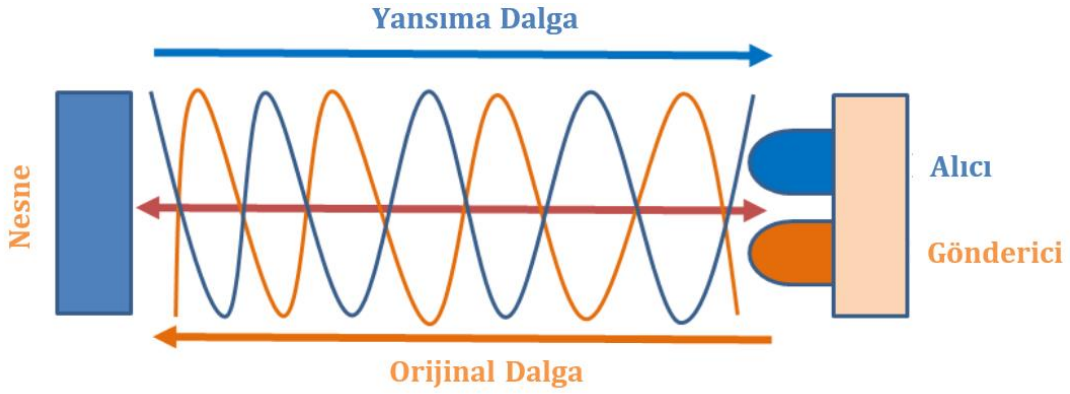
$$Total_Avarage=\frac{Total_time}{2} \quad (5)$$

Önceki bölümlerde gösterildiği gibi, kullanım ve keşif aşamalarının dağılımından sorumlu rastgele bir değişken olan "rnd" mevcuttur. "pro" değişkeninin değeri [0, 1] aralığından rastgele bir değer seçilir. "pro" değişkeninin değerinin 0,2'den büyük ve "Stone_Weight_{it}" (taş ağırlığı) değerinin 12'den büyük veya eşit olduğu varsayılır. Denklem (6)'da, "Time_of_Arrive_Object_{it}" (nesnenin yere ulaşma süresi), nesnenin 9,81 m/s²'lik ivmesine bölünen "Stone_Weight_{it}" (taş ağırlığı) değerinin karekökü ile çarpılmaktadır. Gruptaki bireyi korumak ve uyandırmak için bu denklemler çözülmelidir.

$$Free_Fall_Speed = Time_of_Arrive_Object_{it} * \frac{\sqrt{Stone_Weight_{it}}}{9,81} \quad (6)$$

Denklem (7)'de, sesin kat ettiği mesafeyi (*Distance_S_Travel_{it}*) bulmak için, havadaki ses hızı (*Speed_Sound*) ile sesin seyahat süresi (*Time_of_Arrive_Sound_{it}*) çarpılmaktadır. Havadaki ses hızı 343,2 metre/saniyedir. Şekil 2, sesin kat ettiği mesafeyi açıklamaktadır (Hamad & Rashid, 2024).

$$Distance_S_Travel_{it} = Speed_Sound * Time_of_Arrive_Sound_{it} \quad (7)$$



Şekil 2. Havadaki sesin kat ettiği mesafe (Distance traveled by sound in air)

Bu adımda, nöbetçi kaz ile dinlenen veya beslenen diğer kaz arasındaki mesafe (*Distance_Goose_{it}*) bulunur. Denklem (8)'de, sesin kat ettiği mesafeyi (*Distance_S_Travel_{it}*) 0,5 ile çarpılır çünkü sesin geri dönüş süresine değil sadece sesin gitme süresine ihtiyaç vardır.

$$Distance_Goose_{it} = 0,5 * Distance_S_Travel_{it} \quad (8)$$

Popülasyonda yeni bir X değeri belirlemek, yani sürüdeki bireyi uyandırmak için, Denklem (9)'da gösterildiği gibi bir *BestX_{it}* (en iyi konum) değeri bulunmalıdır. Bu denklem, düşen nesnenin hızını (*Free_Fall_Speed*) ile kazın mesafesinin (*Distance_Goose_{it}*) çarpımının, ortalama sürenin karesi (*TimeL_Avarage²*) ile toplamından oluşur.

$$X_{(it+1)} = Free_Fall_Speed + Distance_Goose_{it} * TimeL_Avarage^2 \quad (9)$$

Aksine, eğer hem taşın ağırlığı (*Stone_Weight_{it}*) 12'den küçük ve hem de "pro" değişkeni 0,2'den küçük veya eşitse, yeni X değerini aşağıdaki Denklem (11)'de gösterildiği gibi bulunur. Düşen bir nesnenin hızını (*Free_Fall_Speed*) elde etmek için veya nesneye ulaşmak için geçen süre (*Time_of_Arrive_Object_{it}*) ile taşın ağırlığının (*Stone_Weight_{it}*) yerçekimine bölünmesiyle çarpılır. Ayrıca, sesin kat ettiği mesafe (*Distance_S_Travel_{it}*) ve kazın mesafesini (*Distance_Goose_{it}*) belirlemek için, önceki denklemler (7) ve (8) kullanılır.

$$Free_Fall_Speed = Time_of_Arrive_Object_{it} * \frac{Stone_Weight_{it}}{9,81} \quad (10)$$

Diğer bir yöntemle, yeni bir matematiksel denklem kullanarak yeni bir X değeri bulunur. Bu denklemde, düşen nesnenin hızı, kazın mesafesi, ortalama süre ve "coe" değişkeni sırasıyla çarpılır.

$$X_{(it+1)} = Free_Fall_Speed * Distance_Goose_{it} * TimeL_Avarage^2 * Coe \quad (11)$$

Kullanım aşamasında, yeni bir X değeri bulmak için iki denklem kullanılır. Örneğin Denklem (9) ve Denklem (11). "pro" ve (*Stone_Weight_{it}*) (taş ağırlığı) değişkenlerinin değerleri, hangi denklemin kullanılacağını belirler (Hamad & Rashid, 2024).

3.2.1.2 Keşif aşaması (Exploration)

Bu aşamada, rastgele uyanma veya bireyi korumayı düzenlemek için, kazın şimdiye kadar keşfedilen en iyi konumu takip edilerek rastgele uyandırılır. Kaz ayağında taş taşımıyorsa, sürüdeki bireyler rastgele uyandırılır. Sürüdeki kazlardan biri uyandığında, sürüdeki tüm bireyleri korumak için bağırma başlar. Önceki kısımlarda bahsedildiği gibi, "rnd" değişkeninin değeri 0,5'ten küçükse, Denklem (3) ve Denklem (4) gibi denklemler uygulanır. Ayrıca, minimum sürenin (*Minimum_Time*) toplam süreden (*Total_Time*) büyük olup olmadığı kontrol edilir ve eğer büyükse, minimum süre toplam süreye eşitlenir. "alpha" değişkeninin değeri 2'den 0'a kadar değişebilir. Bu değer, döngüdeki her yinelemede önemli ölçüde azalır. Denklem (12), arama uzayında yeni bir X değerinin sonucunu iyileştirmek için kullanılır.

$$\alpha = \left(2 - \left(\frac{\text{loop}}{\frac{\text{Max_It}}{2}} \right) \right) \quad (12)$$

Burada "Max_It", yapılabilecek yineleme sayısıdır. Arama aşamasını en uygun çözüm olma olasılığı en yüksek olan çözüme doğru kaydırmak için, *Minimum_Time* ve *alpha* parametrelerini hesaplamak önemlidir. Kazın, arama uzayındaki diğer bireyleri rastgele keşfetmesini sağlamak için "randn(1, dim)" fonksiyonu kullanılır. Bununla birlikte, *Minimum_Time* ve *alpha* değişkenleri, GOOSE'un arama yeteneğini geliştirmek için kullanılır. Denklem (13)'te, minimum süre ve *alpha*, rastgele bir sayı ile çarpılır ve ardından arama uzayındaki en iyi konuma eklenir.

$$X_{(it+1)} = \text{randn}(1, \text{dim}) * (\text{Minimum_Time} * \alpha) + \text{Best_pos} \quad (13)$$

Burada "dim", problem boyutlarının sayısını ve "Best_pos", arama alanında bulduğumuz en iyi X veya en iyi konumu temsil eder.

Özetle, kaz algoritması popülasyonları rastgele oluşturarak başlar. Ardından, ilk yinelemede, sınırların dışındaki değerleri düzeltmek için sürüdeki popülasyon değerlerini gözden geçirir. Ayrıca, arama sınırları içindeki en iyi puanı ve en iyi konumu belirlemek için amaç fonksiyonlarını uygular. Kullanım ve keşif aşamalarını kontrol etmek için, rastgele seçilen değerlere sahip "rnd" adında bir rastgele değişken kullanılır. Rnd değeri 0,5'ten büyük veya eşitse, keşif aşaması etkinleştirilir. Bu koşul dahilinde, "pro" ve taşın ağırlığı "Stone_Weight" gibi iki rastgele değişken daha vardır. "Pro" 0,2'den büyük ve taşın ağırlığı 12'den büyük veya eşitse, (1), (2), (3), (4), (5), (6), (7), (8) ve (9) denklemleri uygulanır. Öte yandan, "pro" 0,2'den küçük veya eşit ve taşın ağırlığı "Stone_Weight" 12'den küçükse, (1), (2), (3), (4), (5), (7), (8), (10) ve (11) denklemler uygulanır. Rnd'nin 0,5'ten küçük olduğu bir senaryoda ise keşif aşaması başlatılır. Bunu göstermek için, "Time_of_Arrive_Sound", "Total_Time" ve "alpha" değişkenleri kullanılır. Bu durumda, (3), (4), (12) ve (13) denklemleri sırayla uygulanır. Ayrıca, bu algorithma arama uzayında yeni bir X bulmak için üç yöntem uyarlanmıştır. Kullanım aşamasında, örneğin Denklem (9) ve Denklem (11) gibi iki denklem kullanılır. Ancak, keşif aşamasında yeni bir X tespit etmek için sadece Denklem (13) kullanılır (Hamad & Rashid, 2024).

3.2.2. Amaç ve maliyet fonksiyonları (Objective and cost functions)

Filtrenin tasarımında kullanılan amaç fonksiyonları için, belirtilen frekans (*f*) değerindeki saçılma parametrelerinden S_{11} (dB) ve S_{21} (dB) referans noktaları olarak belirlenerek optimizasyon işlemi yapılmıştır. Bu belirlenen değerlere göre amaç fonksiyonlar şu şekilde tanımlanmıştır:

$$\text{Eğer } f < f_{kesimalt} \text{ ve } f > f_{kesimüst} \text{ ise } AF_1 = |S_{11} \text{ dB}|^2 + \left(\frac{1}{|S_{21} \text{ dB}|} \right)^2 \quad (14)$$

$$\text{Eğer } f > f_{kesimalt} \text{ ve } f < f_{kesimüst} \text{ ise } AF_1 = |S_{21} \text{ dB}|^2 + \left(\frac{1}{|S_{11} \text{ dB}|} \right)^2 \quad (15)$$

burada *f* (GHz) mevcut hesaplanan frekans değerimi ve $f_{kesimalt}$, $f_{kesimüst}$ (GHz) ise filtrenin kesim veya iletim yapacağı rezonans frekansını belirtmektedir. Amaç fonksiyonları filtrenin geçiren kısımlarında S_{11} 'in (dB) maksimum ve S_{21} 'in (dB) ise minimum olacak şekilde dizayn edilmiştir. Benzer bir şekilde filtrenin durduran kısımlarında S_{11} 'in (dB) minimum ve S_{21} 'in (dB) ise maksimum olacak şekilde dizayn edilmiştir. Kullanılan algoritma tek amaçlı olduğundan dolayı maliyet fonksiyonu ise 2 GHz – 6 GHz aralığında 0,1 basamak adımları ile her iki amaç fonksiyonun (14)-(15) toplanması sonucu oluşturulur.

Bu belirlenen değerlere göre maliyet fonksiyonu (16) şu şekilde tanımlanmıştır:

$$Maliyet = \sum_{f=2.0}^{f=6.0} AF_1 + AF_2 \quad (16)$$

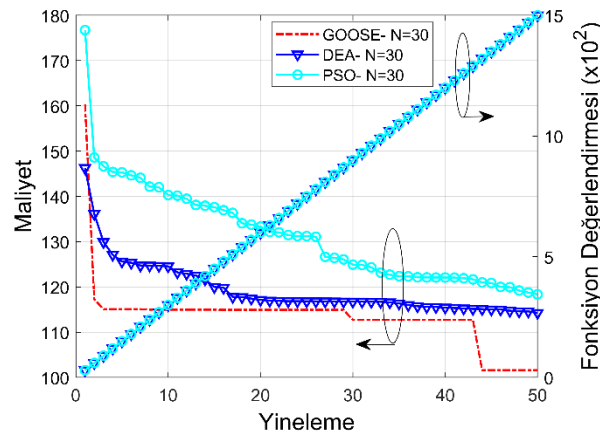
2,8 GHz ve 3,3 GHz kesim frekansları önceden tanımlanmış olup, iletim bant genişliği her bir kesim frekansına $\pm 0,1$ GHz gelecek şekilde toplamda 0,2 GHz olarak belirlenmiştir. Optimizasyon algoritmaları rastgele başlayan süreçler olduğundan ve dolayısı ile her çalışmada farklı performanslar sergileyebilecek olduklarından dolayı belirlenen amaç fonksiyonlarının toplanması sonucu elde edilen hedef fonksiyonu ile 10 çalıştırma üzerinden alınan minimum maliyet (16) ile sonuç belirlenmeye çalışılmıştır. Ek olarak kullanılan amaç fonksiyonları literatürde başarısını ispatlamış bir çalışmada (Uluslu, 2023) en başarılı olan seçilerek yapılmıştır. Yapılan tüm optimizasyon süreçleri için karar değişkenleri sırasıyla saçılma parametreleri S_{11} (dB) ve S_{21} (dB) dir. Bant geçiren filtrenin performans kriterleri Tablo 2'de detaylı sergilenmiştir.

Tablo 2. Çift bant geçiren filtrenin performans kriterleri (Performance criteria of dual bandpass filter)

Frekans (GHz)	İletim Bandı		Durdurma Bandı		
	2,7 - 2,9	3,2 - 3,4	0 - 2,7	2,9 - 3,2	3,4 - ∞
S_{11} (dB)	$f < -10$		$f = 0$		
S_{21} (dB)	$f = 0$		$f < -10$		

4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Ana çalışmaya başlamadan önce seçilen algoritmanın yaygın kullanılan Diferansiyel evrim algoritması (DEA) ve Parçacık sürü optimizasyonu algoritması (PSO) ile performans karşılaştırması yapılmış ve sonuçlar Şekil 3'te verilmiştir. Burada maksimum iterasyon 50 ve popülasyon ise 30 olarak seçilmiştir. Şekilde de görüleceği üzere önerilen algoritma diğer rakipleri karşısında daha başarılı olmuştur. Ana çalışma kısmı 3 ana kısımdan oluşmaktadır. Öncelikle belirlenen tasarım için kullanılacak filtre optimizasyonunda kullanılacak olan algoritma için varsayılan parametreler yerine ideal parametrelerin seçimi ile başlayacaktır. Bir sonraki kısımda seçilen bu parametreler ile belirlenen matematiksel modelden uyarlanmış olan özgün amaç fonksiyonu kullanılarak çalışmanın temelini oluşturan giriş veri seri aralıkları değiştirilerek bu durumun optimizasyonun başarısı üzerindeki değişimi sergilenecektir. En son kısımda ise en başarılı sonuçlar için 3D EM simülasyonu ile sonuçlar sergilenecektir. Çalışmada kullanılan yöntemler skolastik olması dolayısı her bir optimizasyon için kod 10 farklı çalışmadan seçilen en iyi performans dikkate alınmıştır. Ayrıca tüm süreçler eşit koşullar altında ve sırası ile gerçekleştirilmiştir.

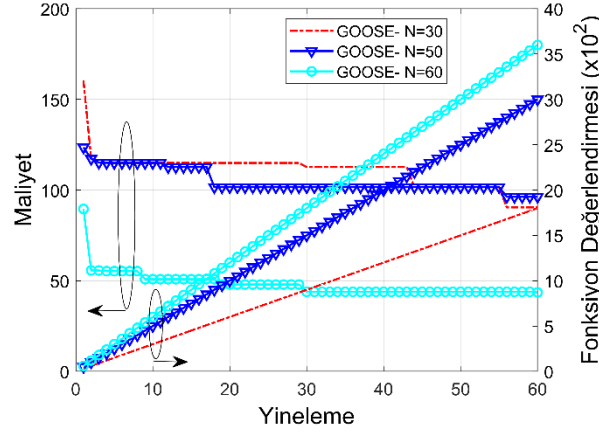


Şekil 3. Kombine filtre tasarımında farklı algoritmalar için 10 çalışmadan seçilen optimizasyonun en iyi performansının yinelemeli tipik maliyet ve FD varyasyonları (Typical iterative cost and FE variations of the best performance of optimization selected from 10 studies for different algorithms in combined filter design)

4.1. GOOSE Algoritması için İdeal Parametre Seçimi (Ideal Parameter Selection for the GOOSE Algorithm)

Meta sezgisel algoritmalarda popülasyon çeşitliliği, optimizasyon başarısını derinden etkinliği için kritik öneme sahiptir. Popülasyon tabanlı bir algoritma olduğu varsayılan bir algoritmadır. Meta sezgisel algoritmalar genellikle doğru en iyi sonuçları bulmamızı engeller çünkü yalnızca tek bir çözüme yakınsamaya yatkındırlar. Tüm bu nedenlerle, popülasyon boyutunu doğru seçmek çok önemlidir. Popülasyon büyüklüğünün yüksek seçilmesi hem çözüm sürecini uzatacak hem de kaynakları israf edecektir. Bununla birlikte, daha düşük seçimler, yerel optimuma takılma ve küresel optimumun bulunamaması sonucunu doğurur (Uluslu, 2022). Sonuç olarak, üç farklı değer için

en iyi popülasyon parametresini bulmak için işlem tamamlandı. Performans karşılaştırmaları, önceki bölümlerde detaylandırılan amaç fonksiyon çifti AF_1 - AF_2 (14, 15) kullanarak Maliyet (16) fonksiyonu üzerinden gerçekleştirildi. Optimizasyon algoritmaları rastgele başlatılmış koşullara ve sürece dayalı olduğundan, algoritma kodu, sabit maksimum yineleme ve farklı popülasyon parametreleri için diğer optimizasyon sorunlarında olduğu gibi on kere koşturulmuştur. Şekil 4'de bulunan sonuçlar, on farklı çalışmadan en iyi performansın maliyet-fonksiyon değerlendirme numarası/yineleme varyasyonları olarak gösterilmiştir. Tablo 3'de ayrıca Şekil 4'de gösterilen maliyet ve fonksiyon değerlendirme numarası değişimleri de gösterilmektedir. Bu çalışma için elde edilen sonuçlar, optimum popülasyon (N) değerinin 60 olduğunu göstermektedir, bu da en uygun maliyetli sonucu sağlar.



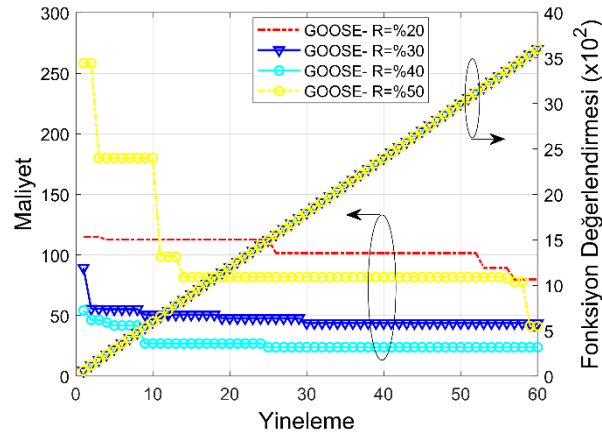
Şekil 4. Kombine filtre tasarımında GOOSE algoritması için popülasyona göre 10 çalışmadan seçilen optimizasyonun en iyi performansının yinelemeli tipik maliyet ve FD varyasyonları (Typical iterative cost and FE variations of the best performance of the optimization selected from 10 studies by population for the GOOSE algorithm in combined filter design)

Tablo 3. Kombine filtre tasarımında GOOSE algoritması için popülasyona göre optimizasyonun performans değerlendirmeleri (Performance evaluations of population-based optimization for the GOOSE algorithm in combined filter design)

Popülasyon		Ortalama	Maksimum	Minimum
30	Maliyet	110,52	160,39	90,43
	FDN	1800	30	1680
50	Maliyet	104,91	123,52	96,28
	FDN	3000	50	2800
60	Maliyet	47,89	89,57	43,57
	FDN	3600	60	3600

4.2. İdeal Veri Seti Giriş Aralığı Seçimi (Selection of the Ideal Data Set Input Range)

Tıpkı algoritma parametre seçimi gibi bir başka derin önemli konuda giriş veri setlerinin değer genişlik aralıklarının seçimidir. Giriş veri seti aralığı sonuçları doğrudan etkiler. Veri seti aralığının küçük seçilmesi olası daha iyi sonuçları kaçırmamızı sağlarken, çok geniş seçilmesi ise aralardaki iyi sonuçları atlamamıza neden olabilir. Aralıkların dar seçilmesi veya geniş seçiminin optimizasyon problemi üzerindeki etkisi görmek açısından burada 6 farklı giriş parametresi için verilen merkez değerden belirlenen 4 farklı yüzde (%20, %30, %40 ve %50) için sonuçlar sergilenecektir. Sonuç olarak, dört farklı yüzde değerinde en optimum maliyeti bulmak için işlem tamamlandı. Performans karşılaştırmaları, tıpkı bir önceki kısımdaki gibi amaç fonksiyon çifti AF_1 - AF_2 (14, 15) kullanarak Maliyet (16) fonksiyonu üzerinden gerçekleştirildi. Algoritma kodu, sabit maksimum yineleme ve sabit popülasyon parametreleri için diğer optimizasyon sorunlarında olduğu gibi on kere koşturulmuştur. Şekil 5'de bulunan sonuçlar, on farklı çalışmadan en iyi performansın maliyet-fonksiyon değerlendirme numarası/yineleme varyasyonları olarak gösterilmiştir. Tablo 4'de ayrıca Şekil 5'de gösterilen maliyet ve fonksiyon değerlendirme numarası değişimleri de gösterilmektedir. Bu çalışma için elde edilen sonuçlar, en optimum değer aralığının %40 olduğunu göstermektedir, bu da bize en uygun maliyetli sonucu sağlar.



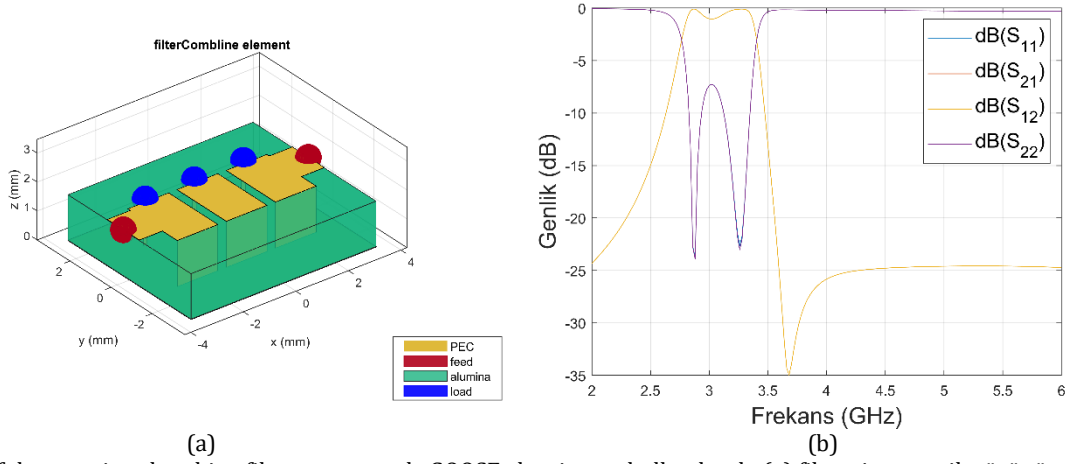
Şekil 5. Kombine filtre tasarımında GOOSE algoritması için veri seti aralıklarına göre 10 çalışmadan seçilen optimizasyonun en iyi performansının yinelemeli tipik maliyet ve FD varyasyonları (Iterative typical cost and FE variations of the best performance of the optimization selected from 10 studies according to data set ranges for the GOOSE algorithm in combined filter design)

Tablo 4. Kombine filtre tasarımında GOOSE algoritması için veri seti aralıklarına göre optimizasyonun performans değerlendirmeleri (Performance evaluations of optimization according to data set ranges for the GOOSE algorithm in combined filter design)

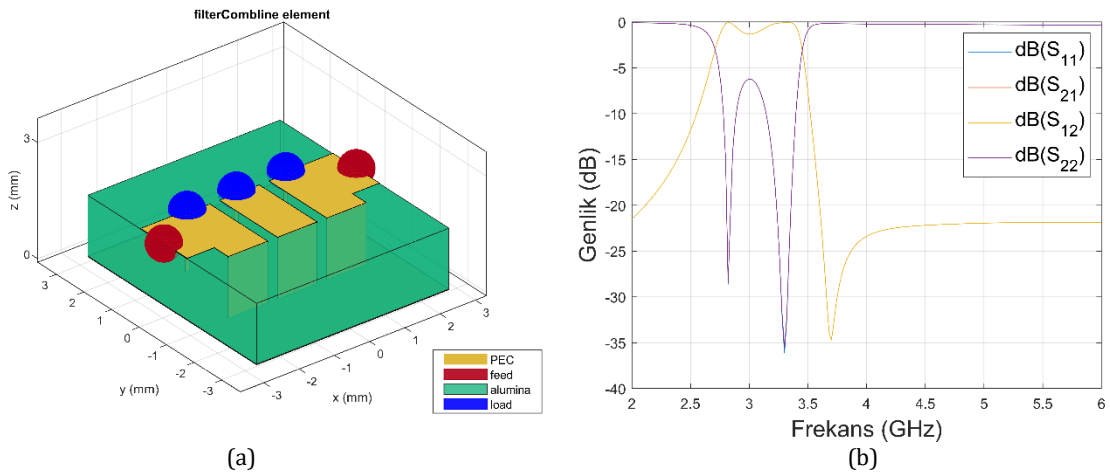
Aralık		Ortalama	Maksimum	Minimum
%20	Maliyet	104,09	114,97	79,91
	FDN	3600	60	3420
%30	Maliyet	47,89	89,57	43,57
	FDN	3600	60	3600
%40	Maliyet	27,57	54,40	23,94
	FDN	3600	60	1500
%50	Maliyet	100,12	258,41	41,40
	FDN	3600	60	3540

4.3. En Başarılı Sonuçlar için S Parametrelerinin Simülasyonu (Simulation of S Parameters for Best Results)

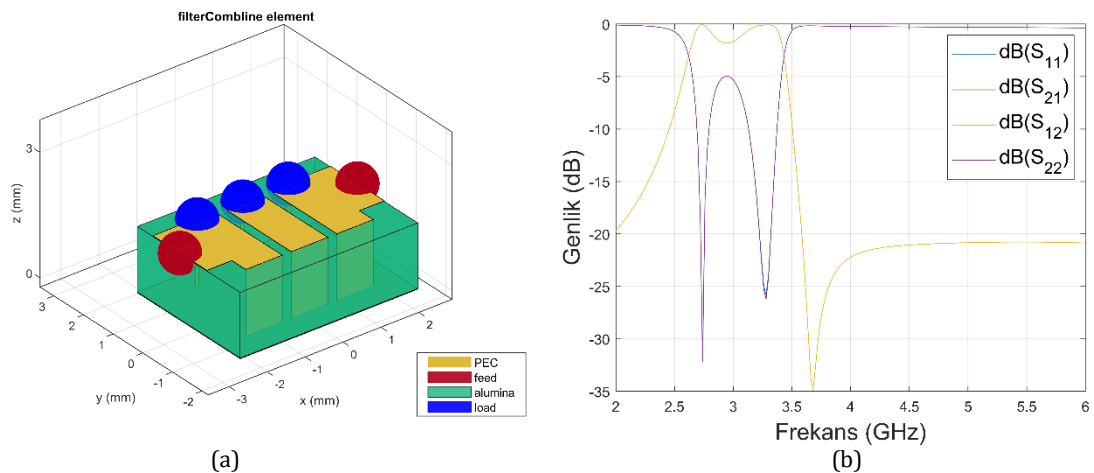
Şu ana kadar en optimum sonuçlara ulaşabilmek için MATLAB programında bulunan filtre araç kutusu yardımı ile farklı parametre ve veri seti giriş aralıkları kullanarak çeşitli denemeler yapılmış ve bunlara ait maliyet ve fonksiyon değerlendirme numaraları ortalama, maksimum ve minimum olarak sunulmuştur. Bu kısımda Tablo 4'de sunulan 4 farklı aralık için minimum maliyete sahip sonuçlara ait filtrenin şematik görüntüsü ve S (dB) parametreleri 2 GHz ile 6 GHz arasında olacak şekilde değişimi tipik genlik-frekans olarak verilmiştir. Elde edilen sonuçlar %20, %30, %40 ve %50 veri giriş aralığına sahip olacak şekilde sırası ile Şekil 6, Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9 da sunulmuştur. Şekil 6a'da filtrenin şematik görünümü yer almaktadır. Şekil 6b'de ise şekil 6a'da şematığı verilen filtrenin tipik genlik frekans değişimi sergilenmiştir. Filtreler S_{11} -10 dB ve altı geçirgenlik gösterdiğinden istenilen bant aralığında çalıştığı görülmektedir. Şekil 7a'da ise %30 veri giriş aralığına sahip optimizasyondan elde edilen en başarılı sonuç için filtrenin şematik görünümü gösterilmektedir. Şekil 7b'de ise Şekil 7a'daki şematığa sahip filtre için genlik frekans değişimi gösterilmiştir. Şekil 7b'de S_{11} parametresi bir önceki şekle göre daha derinlere indiği gözlenmektedir. Akabinde %40 veri girişinden elde edilen en başarılı sonuç Şekil 8a'da ve %50 veri giriş aralığına sahip filtre şematığı ise Şekil 9a'da gösterilmiştir. Bu şematıklara ait genlik frekans değişimleri ise sırası ile Şekil 8b ve Şekil 9b de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlardan Şekil 8b tıpkı maliyet fonksiyonuna paralel biçimde en dengeli ve en derin S (dB) parametre grafiği ile en başarılı sonuca sahip olduğu görülmektedir.



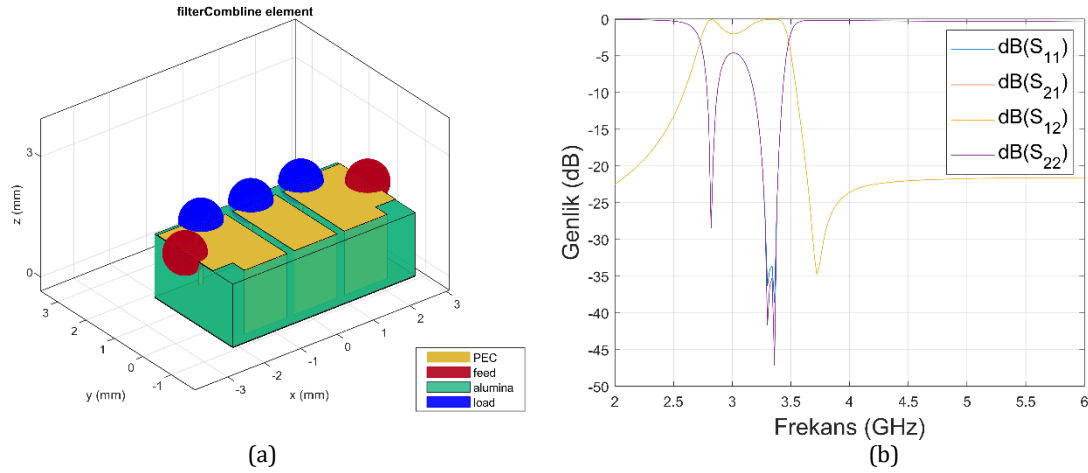
Şekil 6. Çift bant geçiren kombine filtre tasarımında GOOSE algoritması kullanılarak: (a) filtrenin şematik görünümü (b) S (dB) parametre simülasyonları [veri seti aralığı (R) = %20] (Using the GOOSE algorithm in dual bandpass combined filter design: (a) Schematic view of the filter (b) S (dB) parameter simulations [data set range (R) = 20%])



Şekil 7. Çift bant geçiren kombine filtre tasarımında GOOSE algoritması kullanılarak: (a) filtrenin şematik görünümü (b) S (dB) parametre simülasyonları [veri seti aralığı (R) = %30] (Using the GOOSE algorithm in dual bandpass combined filter design: (a) Schematic view of the filter (b) S (dB) parameter simulations [data set range (R) = 30%])



Şekil 8. Çift bant geçiren kombine filtre tasarımında GOOSE algoritması kullanılarak: (a) filtrenin şematik görünümü (b) S (dB) parametre simülasyonları [veri seti aralığı (R) = %40] (Using the GOOSE algorithm in dual bandpass combined filter design: (a) Schematic view of the filter (b) S (dB) parameter simulations [data set range (R) = 40%])



Şekil 9. Çift bant geçiren kombine filtre tasarımında GOOSE algoritması kullanılarak: (a) filtrenin şematik görünümü (b) S (dB) parametre simülasyonları [veri seti aralığı (R) = %50] (Using the GOOSE algorithm in dual bandpass combined filter design: (a) Schematic view of the filter (b) S (dB) parameter simulations [data set range (R) = 50%])

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Yapılan çalışmada, zorlu bir tasarım olan ve kablosuz uygulamalardaki taleplere yanıt verebilecek çift bantlı bir mikrodalga bant geçiren filtrenin zorlu optimizasyon probleminde henüz çok yeni ve bu alanda hiç kullanılmamış güncel bir meta sezgisel algoritma kullanılarak tasarımcıların aklında büyük soru işareti oluşturan giriş seti optimal parametre aralık genişliği seçimine ışık tutulmuştur. Bu kapsamda algoritmanın optimum parametreleri tespit edilmiş ve daha sonra bu parametreler üzerinden denemeler yapılmıştır. Optimizasyonda kullanılan amaç fonksiyonları literatürde başarısını ispatlamış bir çalışmada (Uluslu, 2023) en başarılı olan seçilerek yapılmıştır. Problemin çift bantlı olması optimizasyonu bir üst seviyeye taşımıştır. Elde edilen sonuçlar veri setinin ne küçük nede büyük sayılabilecek bir oran olan %40'lık bir değere ulaştırmıştır. Tasarım elde edilen sonuçlar MATLAB programı kullanılarak filtrenin S (dB) parametreleri simülasyonu olarak gösterilmiştir. Ayrıca seçilen aralıkların sonuçları tablo olarak ele alındığında oldukça değişken başarılar elde edildiği görülmektedir. Yapılan çalışma neticesinde tıpkı amaç fonksiyonu seçimi çalışmasında (Uluslu, 2023) olduğu gibi bundan sonraki çalışmalarda giriş parametre veri girişi seçimine referans gösterilebilecek bir çalışma ortaya çıkarılmıştır. Çalışmanın bir sonrasında giriş veri seti aralığının seçiminin Latin Hiperküp ve Monte Carlo örnekleme yöntemleri yardımı ile algoritmanın başında otomatik olarak tespiti çalışması yapılabilir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Al-Yasir, Y., Abd-Alhameed, R. A., Noras, J. M., Abdulkhaleq, A. M., & Parchin, N. O. (2018). Design of Very Compact Comblined Band-Pass Filter for 5G Applications. Loughborough Antennas & Propagation Conference 2018 (LAPC 2018), 61 (4 pp.)-61 (4 pp.). <https://doi.org/10.1049/cp.2018.1482>
- Andreica, S., Munteanu, C., Gliga, M., Giurgiuman, A., Pacurar, C., & Contantinescu, C. (2023). Development and Optimization of a Broadside-Coupled Dual-Band Microstrip Bandpass Filter for Wireless Communication Systems. 2023 10th International Conference on Modern Power Systems (MPS), 1-4. <https://doi.org/10.1109/MPS58874.2023.10187504>
- Belen, A., & Belen, M. A. (2023). Data-driven modeling of band-pass filter for sub-5G applications. Microwave and Optical Technology Letters, 65(8), 2210-2216. <https://doi.org/10.1002/mop.33704>
- Belen, M. A., & Mahouti, P. (2019). 2.4ghz Akıllı Haberleşme Sistemleri İçin Sarmal Şekli Frekans Seçici Yüzey Tasarımı. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 7(2), 381-385. <https://doi.org/10.21923/jesd.468281>
- Damou, M., Chetoui, M., Gouni, S., Boudkhil, A., Bouhmid, R., & Bouras, B. (2022). Optimization of Multi-Ports Comblined Filter Using Admittance Extraction Technique. 2022 International Conference of Advanced Technology in Electronic and Electrical Engineering (ICATEEE), 1-5. <https://doi.org/10.1109/ICATEEE57445.2022.10093720>
- Das, A., & Das, S. K. (2010). Microwave Engineering. Tata McGraw Hill Education Private Limited.
- Farahani, H. S., Rezaee, B., & Bosch, W. (2021). Compact Filtering Power Divider with Distributed Comblined Coupled-Resonators. 2021 IEEE MTT-S International Microwave Filter Workshop (IMFW), 85-87. <https://doi.org/10.1109/IMFW49589.2021.9642331>
- Gomez-Garcia, R., & Yang, L. (2021). Spurious-Free Signal-Interference Dual-Band Bandpass Filters. 2021 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS), 1-3. <https://doi.org/10.1109/IWS52775.2021.9499377>

- Göçen, C., Akdag, I., Belen, M. A., Mahouti, P., Kaya, A., & Palandöken, M. (2022). ISM 2.4 GHz Band Antenna Model for RF Energy Harvesting Systems. *European Journal of Science and Technology*. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1202107>
- Hamad, R. K., & Rashid, T. A. (2024). GOOSE algorithm: a powerful optimization tool for real-world engineering challenges and beyond. *Evolving Systems*. <https://doi.org/10.1007/s12530-023-09553-6>
- Hong, J., & Lancaster, M. J. (2001). *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/0471221619>
- Hong-Ming Lee, Chung-Rung Chen, Chin-Chuan Tsai, & Chih-Ming Tsai. (t.y.). Dual-band coupling and feed structure for microstrip filter design. 2004 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (IEEE Cat. No.04CH37535), 1971-1974. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2004.1338997>
- Jamshidi-Zarmehri, H., San-Blas, Á. A., Neshati, M. H., Cogollo, S., Sharma, A., Boria, V. E., & Coves, Á. (2023). Efficient Design Procedure for Comblin Bandpass Filters With Advanced Electrical Responses. *IEEE Access*, 11, 52168-52184. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3278791>
- Kumar, B. P., & Baskar, R. (2022). Design of Dual Band Bandpass Filter for Reduced Insertion Loss and Comparison with Ultra Wide Band Filter. 2022 2nd International Conference on Technological Advancements in Computational Sciences (ICTACS), 38-41. <https://doi.org/10.1109/ICTACS56270.2022.9988240>
- Kumar, N., & Kumar, M. (2015). Dual-band bandpass filter for WLAN application using coupled three-line microstrip structure. 2015 2nd International Conference on Electronics and Communication Systems (ICECS), 868-870. <https://doi.org/10.1109/ECS.2015.7125038>
- Kumar, P. (2015). Design of dual-band band pass filter using transmission line sections. 2015 Annual IEEE India Conference (INDICON), 1-4. <https://doi.org/10.1109/INDICON.2015.7443421>
- Lin, S.-C., Wang, C.-H., Chen, Y.-W., & Chen, C. H. (2007). Improved Comblin Bandpass Filter with Multiple Transmission Zeros. 2007 Asia-Pacific Microwave Conference, 1-4. <https://doi.org/10.1109/APMC.2007.4554864>
- Maharjan, R. K., & Kim, N.-Y. (2014). Microstrip Bandpass Filters Using Window Hairpin Resonator and T-Feeder Coupling Lines. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(5), 3989-3997. <https://doi.org/10.1007/s13369-014-0997-7>
- Malki, M., Yang, L., & Gomez-Garcia, R. (2022). Input-Reflectionless Two-Branch Channelized Passive Dual-Band Bandpass Filters. 2022 52nd European Microwave Conference (EuMC), 325-328. <https://doi.org/10.23919/EuMC54642.2022.9924315>
- Miyake, H., Kitazawa, S., Ishizaki, T., Yamada, T., & Nagatomi, Y. (t.y.). A miniaturized monolithic dual band filter using ceramic lamination technique for dual mode portable telephones. 1997 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 789-792. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.1997.602908>
- Pozar, D. M. (2011). *Microwave Engineering* (4th.). John Wiley & Sons.,
- Psychogiou, D., Gomez-Garcia, R., & Peroulis, D. (2018). RF Wide-Band Bandpass Filter With Dynamic In-Band Multi-Interference Suppression Capability. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 65(7), 898-902. <https://doi.org/10.1109/TCSII.2017.2726145>
- Quendo, C., Rius, E., & Person, C. (t.y.). An original topology of dual-band filter with transmission zeros. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2003, 1093-1096. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2003.1212559>
- Ragavi, B., Sharmila, S., Dharani, J., & Deepthika, K. (2023). Design of Dielectric coupled Line Resonator with Defector Ground Structure for Microwave frequency with Double Band Pass filter. 2023 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI), 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICCCI56745.2023.10128197>
- Rajendran, J. (2012). Design and Optimization of Band Pass Filter for SoftwareDefined Radio Telescope. *International Journal of Information and Electronics Engineering*. <https://doi.org/10.7763/IJIEE.2012.V2.180>
- Rezaei, B., Pooyan, M., & Ershadi, T. Z. (2012). Using Microstrip Elements in Dual-band Bandpass Filter with Parallel Coupled-Lines and Space Mapping Technique. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:55592881>
- Saad, M. R., Ambak, Z., Alias, R., Ibrahim, A., Shapee, S. M., Yusoff, M. Z. M., Yahya, M. R., & Mat, A. F. A. (2008). Designing 5GHz microstrip coupled line bandpass filter using LTCC technology. 2008 International Conference on Electronic Design, 1-4. <https://doi.org/10.1109/ICED.2008.4786774>
- Shaman, H. N. (2012). New S-Band Bandpass Filter (BPF) With Wideband Passband for Wireless Communication Systems. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 22(5), 242-244. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2012.2190269>
- Sirci, S., Menargues, E., & Berry, S. (2021). Triangular Comblin Filters Conceived for Additive Manufacturing. 2021 IEEE MTT-S International Microwave Filter Workshop (IMFW), 151-154. <https://doi.org/10.1109/IMFW49589.2021.9642360>
- Tsai, L.-C., & Hsue, C.-W. (2004). Dual-Band Bandpass Filters Using Equal-Length Coupled-Serial-Shunted Lines and Transform Technique. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 52(4), 1111-1117. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2004.825680>
- Uluslu, A. (2021). Design of Microstrip Filter by Modeling with Reduced Data. *The Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES)*. <https://doi.org/10.13052/2021.ACES.J.361109>
- Uluslu, A. (2022). Chameleon Swarm Algorithm Assisted Optimization of U-Slot Patch Antenna for Quad-Band Applications. *IEEE Access*, 10, 74152-74163. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3190378>
- Uluslu, A. (2022). Çok Amaçlı Evrimsel Algoritmalar İle Filtre Tasarımı. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 10(1), 201-216. <https://doi.org/10.21923/jesd.935175>
- Uluslu, A. (2023). Fitting nonlinear mathematical models to the cost function of the quadrafilar helix antenna optimization problem. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 115(3), 307-318. <https://doi.org/10.1007/s10470-023-02174-8>
- Wan, Y., Zhou, J., Rao, Y., Xie, J., Li, Q., & Luo, X. (2023). Independently Tunable Compact Dual-Band Bandpass Filter With High Selectivity and Wide Stopband Using Multilayer Folded Dual-Mode SIDGS Resonator. 2023 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium - IMS 2023, 827-830. <https://doi.org/10.1109/IMS37964.2023.10187986>

- Yang, L., Malki, M., & Gómez-García, R. (2024). Multilayer Dual-Band Bandpass Filter Using Microstrip-to-Slotline Transitions and Transversal Signal-Interference Microstrip Lines. 2024 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS), 79-82. <https://doi.org/10.1109/RWS56914.2024.10438619>
- Yi-Ming Chen, Sheng-Fuh Chang, Chia-Chan Chang, & Tin-Jae Hung. (2007). Design of Stepped-Impedance Compline Bandpass Filters With Symmetric Insertion-Loss Response and Wide Stopband Range. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 55(10), 2191-2199. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2007.906482>
- Zhao, X.-B., Wei, F., Yang, L., & Gómez-García, R. (2024). Planar-Magic-T-Based Dual-Band Bandpass Filters. 2024 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS), 75-78. <https://doi.org/10.1109/RWS56914.2024.10438662>



INVESTIGATION OF PHYSICAL, MECHANICAL AND THERMAL PROPERTIES OF MINERAL ADMIXED AUTOCLAVED FOAM CONCRETE

Nuri İŞILDAR^{1*}, Şemsettin KILINÇARSLAN², Metin DAVRAZ³

¹Suleyman Demirel University, Natural and Industrial Building Materials Application and Research Center, Isparta, Turkey

²Suleyman Demirel University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Isparta, Turkey

³Isparta University of Applied Sciences, Faculty of Technology, Department of Civil Engineering, Isparta, Turkey

Keywords

Foam Concrete,
Autoclaving,
Mineral Admixture,
Physical and Mechanical
Properties,
Thermal Properties.

Abstract

In this study, the aim was to develop a non-combustible, economical, and entirely domestically sourced and technology-based autoclaved foam concrete thermal insulation material. In autoclaved foam concrete (AFC) with a density of 300 kg/m³, which meets thermal insulation material standards, the density, capillary water absorption coefficient, compressive and flexural strengths, ultrasonic pulse velocity, dynamic modulus of elasticity, thermal conductivity, and the mineralogical properties of hydration products based on XRD of some silica-based mineral additives (fly ash, amorphous silica, and metakaolin) substituted at different ratios (5%, 10%, and 15%) for cement were investigated. Autoclaving improved the physico-mechanical properties of mineral-added foam concrete. Among the mineral additives, the highest strength values were obtained in the foam concrete with 5% metakaolin, while the lowest thermal conductivity and capillary water absorption values were obtained in the foam concrete with 5% fly ash. The study concluded that autoclaving is highly effective in producing a sustainable thermal insulation material in foam concrete.

MİNERAL KATKILI OTOKLAVLANMIŞ KÖPÜK BETONUN FİZİKSEL, MEKANİK VE TERMAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Anahtar Kelimeler

Köpük Beton,
Otoklavlama,
Mineral Katkı,
Fiziksel ve Mekanik Özellikler,
Termal Özellikler.

Öz

Bu çalışmada, yanmaz, ekonomik ve tamamen yerli kaynaklara ve teknolojiye dayalı bir otoklavlanmış köpük beton ısı yalıtım malzemesi geliştirilmesi amaçlanmıştır. Isı yalıtım malzemesi standartlarını karşılayan 300 kg/m³ yoğunluklu otoklavlanmış köpük betonda (AFC) çimento ile farklı oranlarda (%5, 10 ve 15) ikame edilen silika esaslı bazı mineral katkıların (uçucu kül, amorf silika ve metakaolin) yoğunluk, kılcal su emme katsayısı, basınç ve eğilme dayanımları, ultrasonik darbe hızı ve dinamik elastisite modülü, ısı iletkenliği, XRD esaslı hidrasyon ürünlerinin mineralojik özellikleri incelenmiştir. Otoklavlama, mineral katkılı köpük betonun fiziko-mekanik özelliklerini iyileştirmiştir. Mineral katkılar arasında en yüksek dayanım değerleri %5 metakaolin katkılı köpük betonda elde edilirken, en düşük ısı iletkenliği ve kapiler su emme değerleri %5 uçucu kül katkılı köpük betonda elde edilmiştir. Çalışmada, otoklavlanmanın sürdürülebilir ısı yalıtım malzemesi köpük beton elde edilmesinde oldukça etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Alıntı / Cite

İşildar, N., Kilincarslan, S., Davraz, M., (2024). Investigation of Physical, Mechanical and Thermal Properties of Mineral Admixed Autoclaved Foam Concrete, Journal of Engineering Sciences and Design,12(3), 572-584.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

N. İşildar, 0000-0001-6639-3650
S. Kilincarslan, 0000-0001-8253-9357
M. Davraz, 0000-0002-6069-7802

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	08.05.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date	05.08.2024
Kabul Tarihi / Accepted Date	31.08.2024
Yayın Tarihi / Published Date	26.09.2024

* İlgili yazar / Corresponding author: nuriisildar@sdu.edu.tr, +90-246-211-8206

INVESTIGATION OF PHYSICAL, MECHANICAL AND THERMAL PROPERTIES OF MINERAL ADMIXED AUTOCLAVED FOAM CONCRETE

Nuri IŞILDAR[†], Şemsettin KILINÇARSLAN², Metin DAVRAZ³

Suleyman Demirel University, Natural and Industrial Building Materials Application and Research Center, Isparta, Turkey

Suleyman Demirel University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Isparta, Turkey

Isparta University of Applied Sciences, Faculty of Technology, Department of Civil Engineering, Isparta, Turkey

Highlights

- The effect of autoclaving in foam concrete.
- Effect of fly ash, metakaolin and amorphous silica substituted with cement on foam concrete properties.
- Investigation of obtaining autoclaved sustainable thermal insulation material foam concrete.

Purpose and Scope

This research aims to develop a non-combustible, economical and autoclaved foam concrete thermal insulation material developed by fully utilising domestic resources and technology.

Design/methodology/approach

This research represents a comprehensive study to determine the effects of replacing cement with different mineral admixtures in autoclaved foam concrete with a density of 300 kg/m³. In this context, the production of autoclaved foam concrete with the use of materials such as amorphous silica, metakaolin or fly ash was targeted.

Findings

The autoclaving process increased the compressive and flexural strengths of the mineral admixed foam concrete series. Autoclaved mineral admixed foam concretes containing 5% fly ash admixture had the lowest coefficient of thermal conductivity and conformed to the required standards.

Research limitations/implications

In this study, the effect of using three different mineral admixtures in different proportions on autoclaved foam concrete was investigated. Future work aims to explore various mineral admixtures and to carry out further experiments to provide more comprehensive information on the performance and properties of the samples produced.

Practical implications

The samples obtained and the tests performed show that thermal insulation material can be produced from low density foam concrete. It is observed that this material has more potential and usability. Therefore, it can be foreseen that there may be developments in the future that will allow mass production of this material in an economical and easily applicable way.

Originality

The literature on autoclaved foam concrete is limited and studies on aerated concrete have generally been more widely carried out. However, this study can make a significant contribution to the foam concrete literature as it involves the investigation of low-density foam concrete and the effect of mineral admixtures. The results of this study can help us to better understand and develop the potential of autoclaved foam concrete by shedding light on future research.

1. Introduction

Foam concrete is considered as a relatively homogeneous lightweight cellular concrete that contains a cement-based binder, fine aggregates such as sand and foam obtained from a foaming agent to provide air recovery (Amran et al., 2015; Jalal et al., 2017). While the fact of earthquakes, which are frequently experienced in the world and in Turkey, reveals the need to reduce the load on buildings, the interest in foam concrete is increasing in the context of saving energy in heating-cooling purposes. It is extremely important in terms of sustainability that the use of coarse aggregate is not required in the production of foamed concrete and the possibility of replacing the fine aggregate partially or completely with recycled or secondary materials (Jones and McCarthy, 2006; Awang et al., 2012).

[†] Corresponding author: nuriisildar@sdu.edu.tr, +90-246-211-8206

Today, thermal insulation in buildings with housing and industrial functions is considered as a set of systems covering many branches of science, requiring precision and multi-dimensional detail work from material production to application. The most basic feature that distinguishes thermal insulation materials from each other is the heat transmission coefficients and according to the application, density, mechanical strength, fire resistance class, water vapor diffusion resistance, operating temperature, water absorption and dimensional stability are considered as other features (Papadopoulos, A.M., 2005). Petroleum-derived (EPS, XPS) and mineral-based products (such as multipore, lithapor) constitute over 70% of the insulation material sector in Turkey, but there is foreign dependency in the supply of necessary raw materials. On the other hand, the fact that some of them are petroleum derivatives leads to a situation that restricts their use and is questionable in terms of the environment. (Kilincarslan *et al.*, 2023; Işıldar, 2023)

Although intensive industrial efforts have been made for the production of wall and floor elements from foam concrete in Turkey, it has not been successful in solving some technological problems, especially the drying shrinkage problem. Likewise, the use of different additives in foam concrete in varying proportions can cause a great variability in the mechanical and structural properties of the concrete. It is accepted that drying shrinkage is generally seen in the first 20 days after mortar pouring and occurs 4-10 times more than normal concrete depending on the aggregate type, cement ratio, water content and mineral additives in the mixture design (Amran *et al.*, 2015). It is known that the addition of fiber reduces the drying shrinkage of foam concrete due to water retention and delays evaporation (Raj *et al.*, 2019), and again, the increase in foam volume causes the mortar to absorb less water and reduces shrinkage (Nambiar and Ramamurthy, 2009). On the other hand, the curing method, temperature, and time significantly influence the hydration process of the concrete mix, leading to variations in solid-phase chemical processes and pore structure formation. This, in turn, shapes properties such as drying shrinkage, mechanical performance, and thermal conductivity. Wang *et al.* (2024) emphasized the need to adjust steam curing regimes and include certain mineral and chemical additives to prepare high-quality steam-cured foam concrete and mitigate thermal degradation caused by the steam curing process. Curing is mostly conducted in water and air, with varying temperature and relative humidity levels. Additionally, different curing materials can be used, such as cellophane coating (Falliano *et al.*, 2018; Falliano *et al.*, 2022), steam (Alnkaa *et al.*, 2018), polyethylene sheeting, wet burlap, acrylic-based, water-based or bitumen-based, or coal tar epoxy (Maslehuddin *et al.*, 2013).

Due to its inorganic nature, foam concrete offers a significant advantage over traditional polymer-based insulation materials, as it is non-combustible. If the thermal conductivity of foam concrete can be reduced while maintaining its mechanical properties, it could serve as an alternative to conventional construction materials. This study represents a comprehensive investigation into the effects of various mineral additives replacing cement in autoclaved foam concrete with a density of 300 kg/m³. Consequently, the aim was to produce autoclaved foam concrete using materials such as amorphous silica, metakaolin, or fly ash.

2. Experimental

2.1. Materials

Within the scope of the study carried out at Süleyman Demirel University Natural and Industrial Building Materials Research and Application Center; lime was obtained from Turkey-Antalya-Dirmil, micronized quartz Turkey Aydın-Çine (Polat Mining Company), fly ash from Kütahya-Tavşanlı Çelikler Tunçbilek thermal power plant, metakaolin from Faridabad (India). Other components used are Lightcon 28 synthetic foaming agent (1.03 kg/l ± 0.02 density and pH 5.0 ± 1, Aydos Chemical Company), CEM-I-42.5 R type (Çimsa Company) cement.

2.2. Sample Production Process

In the production of foam concrete samples, apart from the control samples, cement, gypsum, micronized quartz, and three different types of mineral additives were used. In the samples with mineral additives, fly ash (FA), amorphous silica (AS), and metakaolin (MK) were substituted for cement at 5%, 10%, and 15% by weight. A slurry was prepared by adding water to the powder mixture, foam was added to the mixture from the foam generator, and the mixing process was continued for an additional 5 minutes. The prepared foam concrete was poured into plastic molds and left in the molds under laboratory conditions for 1 day before being demolded. The foam concrete samples are shown in Figure 1. Components of the control and mineral admixed foam concrete samples are given in Table 1.



Figure 1. Fresh (left) and hardened (right) foam concrete samples

Table 1. Components of the control and mineral admixed foam concrete samples

Series	Water/ solid = 0.60							Foam (dm ³)
	Cement (kg)	Lime (kg)	Micronized quartz (kg)	Fly Ash (kg)	Amorphous silica (kg)	Metakaolin (kg)	Water (kg)	
AFC	92.50	23.12	185	-	-	-	180	710
AFCFA-5	87,87	23.12	185	4.8	-	-	180	710
AFCFA-10	83.25	23.12	185	9.6	-	-	180	710
AFCFA-15	78.62	23.12	185	14.4	-	-	180	710
AFCMK-5	87,87	23.12	185	-	-	4.8	180	710
AFCMK-10	83.25	23.12	185	-	-	9.6	180	710
AFCMK-15	78.62	23.12	185	-	-	14.4	180	710
AFCAS-5	87,87	23.12	185	-	4.8	-	180	710
AFCAS-10	83.25	23.12	185	-	9.6	-	180	710
AFCAS-15	78.62	23.12	185	-	14.4	-	180	710

The samples, which were cured in air, were kept at 20±5 °C at 95% relative humidity for 28 days in a climate cabinet with adjustable temperature and humidity values (Figure 2).



Figure 2. Foam concrete samples cured in climate chamber

After being kept in the mold for a day, the foam concrete samples were cut and prismatic samples with dimensions of 40x40x160 mm were obtained. Three of these samples were placed in an autoclave and autoclaved at 170 °C and 14 bar pressure for 12 hours. The autoclaved device shown in Figure 3.



Figure 3. Autoclave device

The temperature and pressure regime of the autoclave device depending on the time was given in Figure 4.

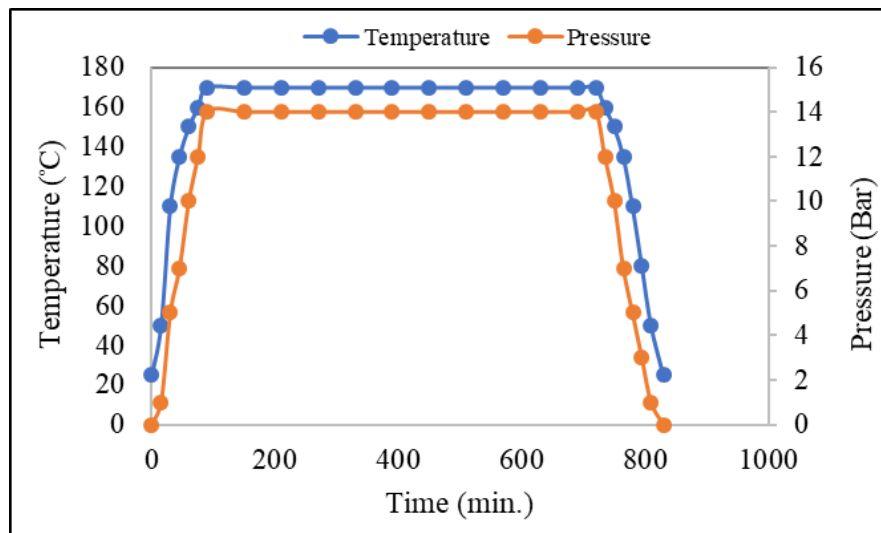


Figure 4. Time-dependent temperature and pressure regime of the autoclave device

The demolded samples were precisely sized using a diamond blade cutting device. Sample dimensions were measured with the help of an electronic caliper with an accuracy of 1/100 mm.

2.3. Methods

Densities of solid components were calculated by gas pycnometer (Micromeritics Accupyc II 1340) and their specific surface areas were calculated using the specific surface areas given in TS EN 196-6 standard (Equation 1). The apparent densities of foam concrete samples were determined according to TS EN 1602 standard.

$$S = \frac{K}{\rho} \times \frac{\sqrt{e^3}}{(1-e)} \times \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{10 \times \eta_1}} \quad \text{cm}^2/\text{g} \quad (1)$$

In equality; K is the device constant, e is the porosity of the bed, t is the time (s), ρ is the cement density (g/cm^3) and η is the viscosity (Pa.s) of the air at the test temperature (20 ± 2 °C).

Flexural strength tests of the samples were performed on 3 prism samples of 40x40x160 mm dimensions according to TS EN 196-1 standard and calculated using the relation given in Equation 2.

$$f_c = \frac{1.5 \times F \times l}{b \times h^2} \quad (2)$$

In equation: f_c is the flexural strength (MPa), where F is the maximum applied flexural load (N), L is the distance between the supports (mm), b and h are width and height (mm) of the samples ens under test respectively.

Compressive strength of the samples was carried out on 6 40 mm cube samples according to TS EN 196-1 standard. In the test, the loading rate of the compression tester was selected as 2400 N/s. The compressive strengths of the samples were calculated with the help of the relation given in Equation 3.

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (3)$$

In equation: F_c is the compressive strength (MPa), F is the maximum load (N), A_c is the cross-sectional area (mm²) of the sample in the load direction.

Ultrasonic pulse velocities (UPV) of the samples were determined according to. The sound transmission velocities (V_p) of non-autoclaved (FC) and autoclaved foam concrete (AFC) samples were calculated according to Equation 4 and the dynamic moduli of elasticity (E_d) were calculated according to Equation 5.

$$V = \frac{L}{t} \quad (4)$$

In equality, V is the longitudinal wave velocity (km/s), L is the sample length (m), and t is the ultrasonic sound wave transmission time (s).

$$E_d = 10^5 \times V^2 \times \frac{\Delta}{g} \quad (5)$$

In equality, E_d is the dynamic modulus of elasticity (MPa), V is the longitudinal wave velocity (km/s), Δ is the dry apparent density of samples (kg/dm³) and g is the acceleration of gravity (kgf cm/s²).

Capillary water absorption tests on foam concrete samples were carried out according to TS EN 1015-18 standard and capillary water absorption coefficients of the samples were calculated by using Equation 6.

$$c = 0,1 \times (M_2 - M_1) \quad (6)$$

In equality, c is the capillary water absorption coefficient of the sample (kg/m². min^{0.5}), M_1 is the mass of the sample at the end of the 10th minute (g) and M_2 is the mass of the sample at the end of the 90th minute (g).

Thermal conductivity tests of the samples were carried out according to TS EN 12664 standard. The surfaces of the \emptyset 60 x 30 mm circular shaped samples were smoothed and dried at 105 °C in an oven with air circulation until reaching constant mass. The dimensions of the samples were measured with an electronic caliper with an accuracy of 1/100 mm and the masses were weighed with an electronic balance with an accuracy of 0.01 g. Then, the coefficient of thermal conductivity ($\lambda_{10, dry}$) was measured using a Lasercomp Fox 50 instrument with the difference between hot and dry temperatures and cold plates (ΔT) was 10 K.

The mineralogical properties of the hydration products formed at the end of curing in foam concrete samples were determined by XRD device at Süleyman Demirel University Innovative Technologies Research Center. The analysis findings of cement (Çimsa Company), micronized quartz (Polat Mining Company), fly ash and synthetic foaming agent (Aydos Chemical Company) used in the study were obtained from the manufacturers. Metakaolin and slaked lime were analyzed at Afyon Kocatepe University Natural Stone Laboratory. Chemical components of amorphous silica were taken from the literature Davraz and Gündüz (2005).

3. Results And Discussion

3.1. Features of Foam Concrete Components

Specific gravity and specific surface area values of binders and mineral additives used in foam concrete production were given in Table 2. Among the mineral additives used in the study, fly ash had the lowest density (2.05 g/cm³) and metakaolin had the highest density (2.72 g/cm³). Among the binders, slaked lime has a specific surface area about 4 times higher than Portland cement. When the specific surface area values of mineral additives were analyzed, fly ash exhibited the lowest value (3305 cm²/g) and metakaolin the highest value (16661 cm²/g).

Table 2. Specific gravity and specific surface areas of foam concrete components

Components	Specific Gravity (g/cm ³)	Specific Surface Area (cm ² /g)
Cement	3.123	3772
Lime	2.307	12188
Micronized quartz	2.640	4167
Fly ash	2.049	3305
Metakaolin	2.724	16661
Amorphous silica	2.446	11399

Chemical compositions of components were given in Table 3. Among the mineral additives, amorphous silica (90.84%) had the highest silica content and metakaolin (43.97%) had the highest aluminum tri oxide content.

Table 3. Chemical compositions of foam concrete components

Chemical components	Mikronized quartz	Cement	Lime	Amorphous silica	Metakaolin	Fly ash
SiO ₂	98.50	18.90	0.13	90.84	52.89	58.07
Al ₂ O ₃	0.60	5.15	0.05	2.66	43.97	20.04
Fe ₂ O ₃	0.06	3.36	0.05	0.15	0.49	8.96
TiO ₂	0.04	0.00	0.00	1.24	1.58	0.00
CaO	0.00	63.59	70.42	0.18	0.35	2.69
MgO	0.00	1.57	0.39	0.00	0.03	3.94
SO ₃	0.00	2.65	0.07	0.06	0.00	0.42
Na ₂ O	0.10	0.40	0.04	1.12	0.08	1.19
K ₂ O	0.10	0.77	0.01	0.09	0.09	1.66

3.2. Physical Properties of Autoclaved Foam Concrete

3.2.1. Apparent Density

The apparent densities of autoclaved foam concrete (AFC_s) samples with mineral additives samples were given in Table 4.

Table 4. Average apparent densities of foam concrete samples

AFC _s	Apparent Density (kg/m ³)
AFC	309
AFCFA-5	285
AFCFA-10	291
AFCFA-15	280
AFCMK-5	314
AFCMK-10	301
AFCMK-15	316
AFCAS-5	305
AFCAS-10	301
AFCAS-15	305

Depending on the type of mineral admixture, there are minor differences in the density values of the autoclaved foam concrete samples. The decrease in density of AFCFA samples was attributed to the low specific gravity of fly ash (2.05 g/cm³). In addition, the partial increase in density of AFCFA samples was attributed to the relatively high specific

gravity of metakaolin (2.72 g/cm^3). Although the slight differences between the densities of foam concrete were due to the types of mineral admixtures, it is theoretically possible for a density difference to occur within the same mineral additive type depending on the selected admixture ratios. Therefore, it would be a more accurate approach to evaluate the findings of this study in terms of acceptable levels of consistency and differences between fresh density, designed density, and dry density, as some researchers have pointed out. (He et al., 2019; Peng et al., 2022; Yuan et al., 2022).

3.2.2. Capillary Water Absorption Coefficient

Capillary water absorption coefficients increased for all mineral additives depending on the usage rate (Figure 5). The replacement of fly ash, one of the mineral additives, with cement at the rates of 5 and 10% decreased the capillary water absorption coefficient compared to the control. It has been evaluated that the efficiency of amorphous silica is lower than other mineral additives in terms of dose-capillary water absorption coefficient differences for mineral additive types. The capillary water absorption coefficients increased from 1.32 to 1.46, from 0.7 to 1.0 for fly ash, and from 1.0 to 1.6 for metakaolin, depending on the amorphous silica doses. As a matter of fact, It has been reported that fly ash exhibits a variable (increasing and decreasing) characteristic within the scope of the effects of curing regime (7 and 28-day standard curing and autoclave curing) and water curing time on water absorption of foam concretes using different foam content (0, 31 and 47%) and some mineral admixtures (fly ash and silica fume- 0, 10 and 20 % cement substitutes) (Gökçe et al., 2019).

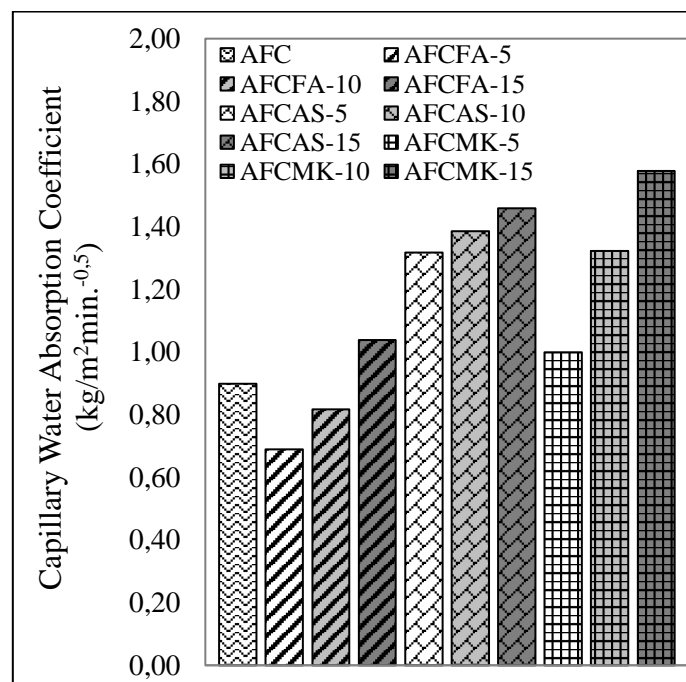


Figure 5. Capillary water absorption coefficients in mineral-added AFCs

3.3. Mechanical Properties

3.3.1. Compressive and Flexural Strengths

The compressive strengths of different mineral admixtures across all usage rates varied between 0.40-1.15 MPa (Figure 6). Fly ash compressive strengths are lower than control, regardless of usage rate. The highest compressive strengths are specific to metakaolin additives. The increase in the usage rate of all mineral additives led to a decrease in the compressive strength. However, the contribution-decrease ratio relationship differs in this change. The compressive strengths, where there is not much difference for the 5% and 10% admixtures of fly ash, are very close to each other for 10% and 15% metakaolin admixtures this time. The flexural strengths of autoclaved mineral-added foam concretes were found to be between 0.21-0.4 MPa (Figure 6). The flexural strengths for all mineral additives and proportions are higher than the control, except for fly ash and 15% of amorphous silica. The activities of the mineral additives were shaped as fly ash < amorphous silica < metakaolin. Although there were minor differences for the 5% and 10% ratios of all mineral additives, the main change was realized for the 15% ratio. The effects of fly ash, amorphous silica and metakaolin additives substituted with cement in this study on compressive and flexural strength are in agreement with the results of previous studies. As a matter of fact, it was stated that SEM data of river sediment and

expanded polystyrene added low carbon ultralight foam concrete confirmed the compatibility between expanded polystyrene particles and alkali-activated metakaolin-river sediment paste, and that the strength decreased with the increase of the said materials in the composition (Shi et al., 2021). Again, in autoclaved cellular concrete using 75% kaolinite clay, 25% Portland cement and 0.2-8% foaming agent (aluminum powder) by weight, lower mechanical strength (maximum 0.62 MPa) was associated with higher aluminum content (Guglielmi et al., 2010). Kim et al. (2017) reported that as the replacement ratio of waste concrete powder with silica powder, which acts as a SiO₂ source and filler, increases during autoclave curing, the strength decreases, but meets the required strength requirement of 14 MPa for the 50% level.

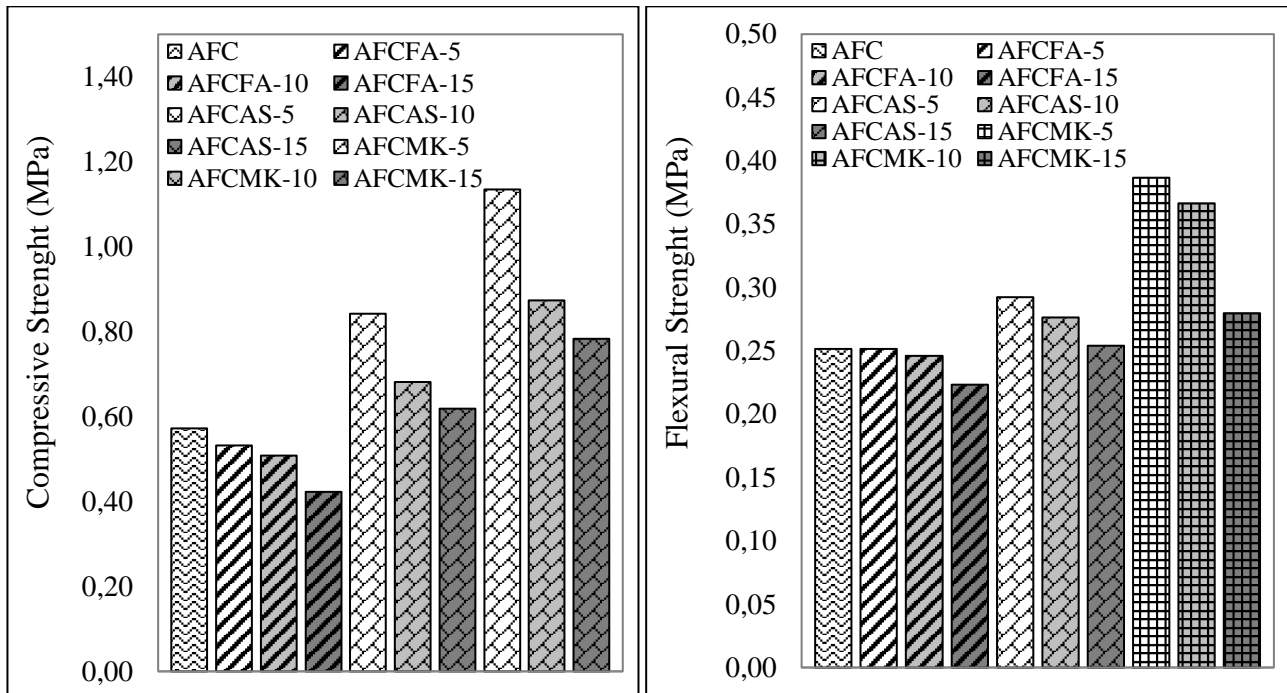


Figure 6. Compressive and flexural strengths of mineral-added AFCs

3.3.2. Ultrasonic Pulse Velocity and Dynamic Elasticity Modulus

The dynamic elasticity modulus in autoclaved mineral-added foam concretes varied between 0.344-0.369 GPa for fly ash, 0.457- 0.502 GPa for amorphous silica, and 0.495- 0.624 GPa for metakaolin. High coefficients of determination ($R^2= 0.8445- 0.9958$) were obtained for dynamic elasticity modulus -compressive strength relationships (Figure 7.). It has been observed that ultrasonic pulse transmission velocity values, which vary between 1.10-1.13 km/s for fly ash, 1.21-1.27 km/s for amorphous silica, and 1.24-1.40 km/s for metakaolin, increase with the increase in compressive strength (Figure 7). The biggest difference is between autoclaved foam concrete with 5% fly ash and 15% metakaolin. In a study by Gencil et al. (2021), 25, 50, 75 and 100 percent of sand was replaced with recycled concrete aggregate. It was determined that the recycled concrete aggregate increased the apparent porosity and caused higher water absorption than the sum of the increases obtained for the other utilization rates due to the higher capillary microcrack density for the 100% replacement rate. In addition, the recycled concrete aggregate decreased the dynamic elasticity modulus, ultrasonic pulse velocity and thermal conductivity of foam concrete.

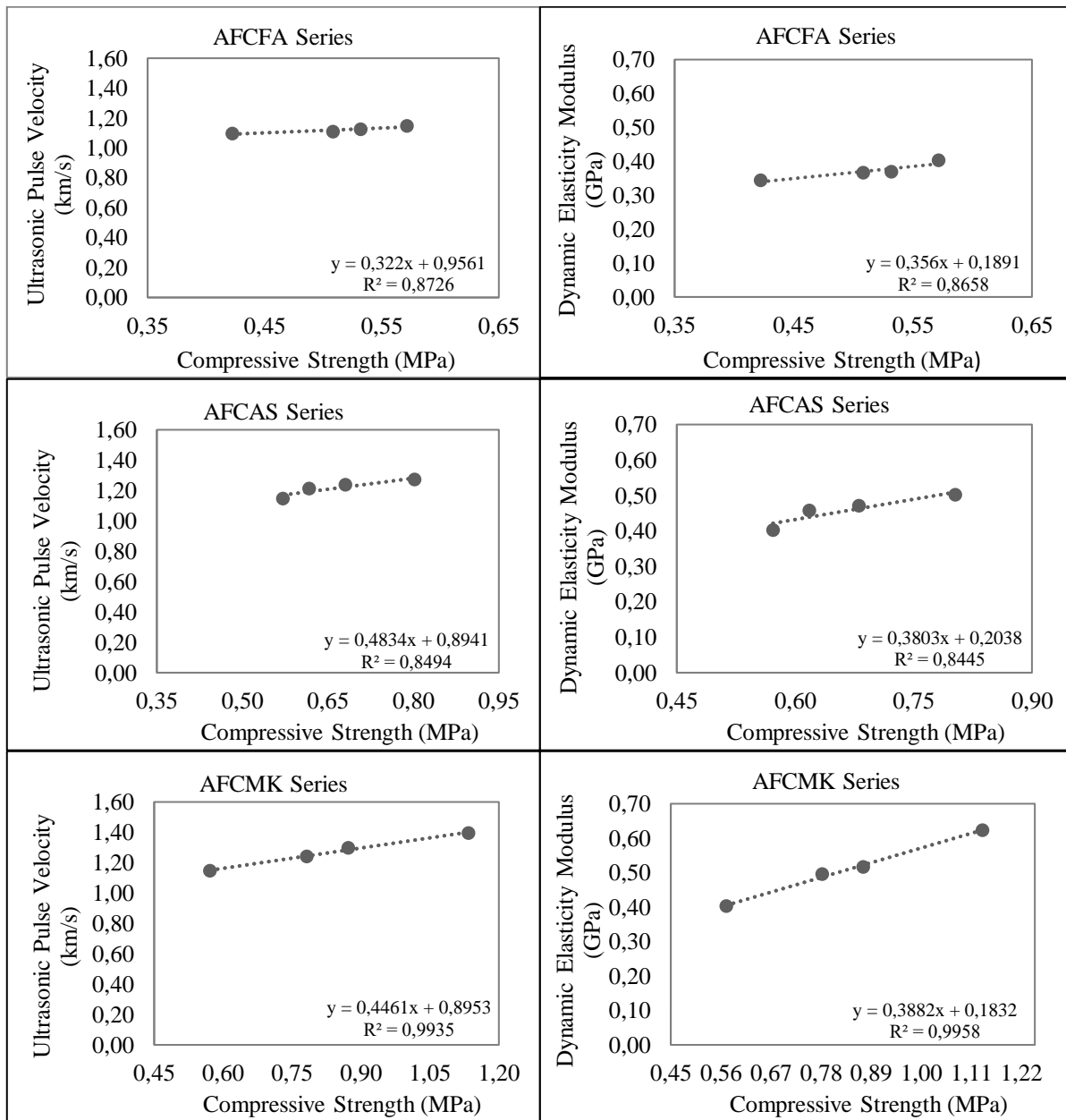


Figure 7. Dynamic elasticity modulus-compressive strength and ultrasonic pulse velocity-compressive strength relationships

3.4. Thermal Properties

The thermal conductivity coefficients for foam concrete samples using different types of mineral admixtures were given in Figure 8. The thermal conductivity coefficients (k) of the non-autoclaved foam concrete sample were approximately 15% higher than the the values of autoclaved foam concrete samples. The thermal conductivity coefficients of AFCFA samples (avg 0,059 W/mK) are lower than AFC values (avg 0,063 W/mK). Among the samples produced in this study, only FA ans AS mineral doped AFC met ISO and CEN standards (<0.065 W/mK). The thermal conductivity coefficients (avg.) of the AFC samples to which amorphous silica and metakaolin were added were measured as 0,063 W/mK and 0,071 W/mK, respectively. Mashkin et al. (2018) mentioned that the lowest density and thermal conductivity coefficient values of some mineral admixtures (wollastonite and diopside) in non-autoclaved concrete are specific to the minimum admixture ratios and also the decisive role of the mineral admixture type.

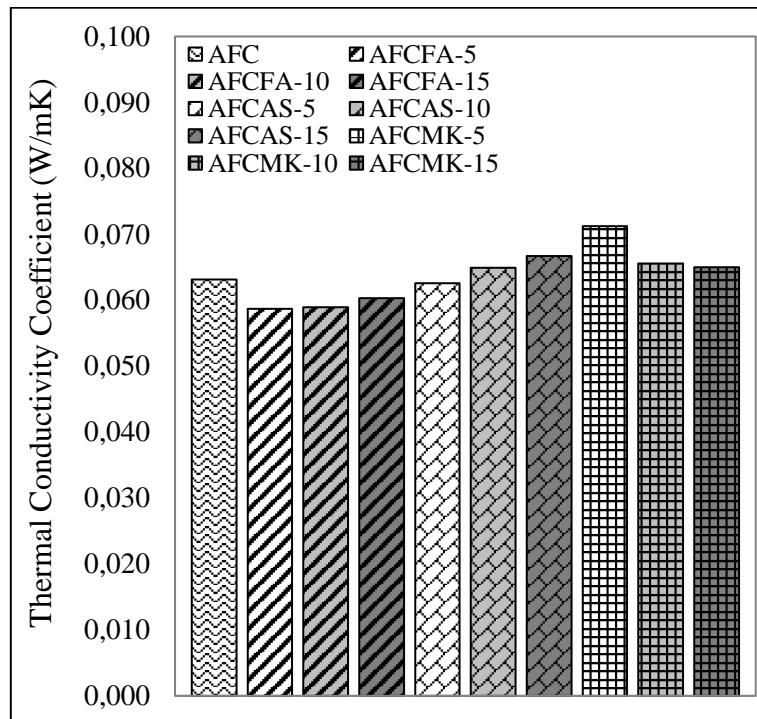


Figure 8. Thermal conductivity coefficients of AFC series with autoclaved mineral additives

3.5. Microstructure Properties

It has been evaluated that the differences in quartz peak densities for mineral additives are not really significant and this may be related to the differences in silica content due to the Si ratios of tobermorite and anorthite minerals. In some studies, it is observed that SEM images and XRD data provide a relatively qualitative evaluation (Abd Elrahman et al., 2021, Alnahhal et al., 2022). Compared to FC samples, the ratio of tobermorite increased in AFC samples (12.9% and 17.7% respectively) and the ratio of Portlandite decreased (11.3% and 4.8% respectively). Calcite mineral is considered to originate from unburnt CaCO₃ in slaked lime. The highest tobermorite ratio was observed in AFC samples containing AS (24.6%). The samples of AFCFA, AFCAS and AFCMK were found to have a decrease in SiO₂ ratio compared to AFC samples. This decrease in SiO₂ content indicates that reactive SiO₂ in the composition of micronized quartz and mineral additives reacts with Ca(OH)₂ to form tobermorite (Figure 9).

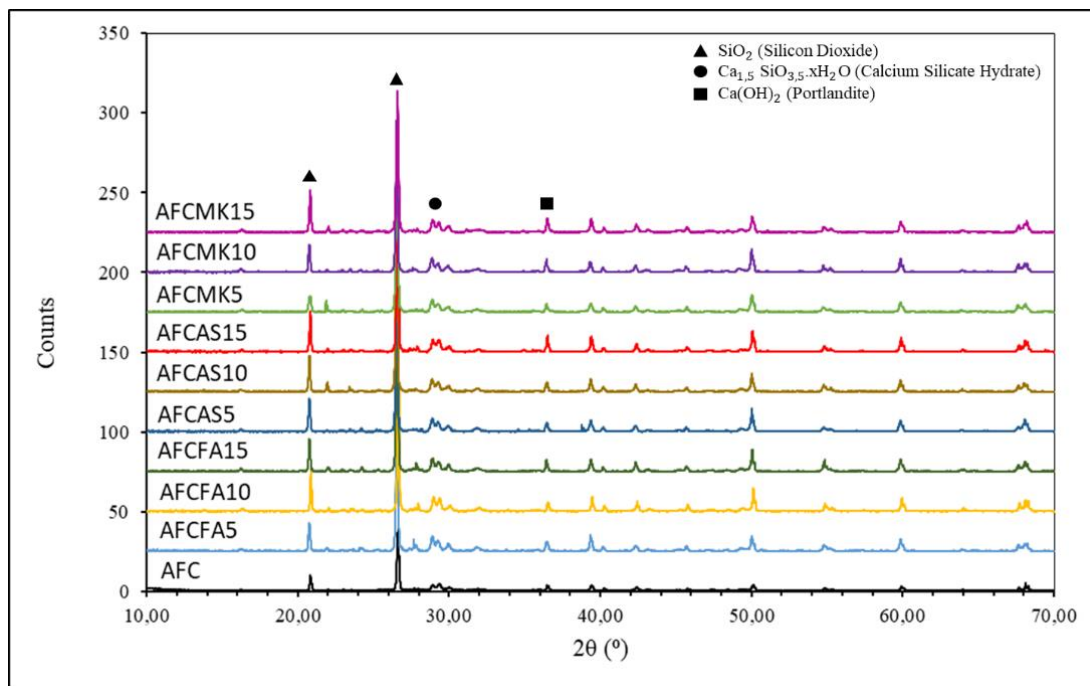


Figure 9. XRD analysis data of autoclaved foam concrete

4. Conclusions

In this research, the effect of autoclaving on the physical, thermal, and mechanical properties of foam concrete samples with a density of 300 kg/m³ was investigated. Additionally, the effects of mineral additives on AFC (Autoclaved Foam Concrete) samples were also studied.

The thermal conductivity coefficients of both mineral-added and non-added AFC samples (except AFCMK) were ≤ 0.065 W/mK. Compared to FC samples, autoclaving reduced the thermal conductivity coefficients of the samples by approximately 15%. Fly ash (FA) was found to be the most effective mineral additive in reducing thermal conductivity, while metakaolin (MK) increased thermal conductivity.

The aim of this study was to improve the mechanical, physical, and thermal properties of mineral-added AFC samples. The addition of fly ash did not significantly affect the mechanical strengths, while metakaolin showed the highest increase in strength (1.14 MPa). Overall, the autoclaving process reduced the capillary water absorption values in foam concrete (32%). However, due to its colloidal structure, the addition of amorphous silica increased the capillary water absorption values in AFC samples.

The mineralogical properties of the samples were examined using XRD analysis. According to the XRD analysis results, autoclaving reduced the amount of portlandite, a hydration product, in the foam concrete and increased the amount of tobermorite. The increase in mechanical strength in the AFC samples was associated with this finding. The autoclaving process did not have a significant effect on pore sizes.

Foam concrete, with its inorganic structure, has a significant advantage over traditional polymer-based insulation materials, as it is non-flammable. If the mechanical properties of foam concrete are maintained while reducing the thermal conductivity to some extent, it can become an alternative to traditional construction materials. Further research can be conducted by producing foam concrete samples with different mineral additive ratios and autoclaving them under various pressure and temperature levels to obtain different physical, thermal, and mechanical results.

Acknowledgement

We would like to thank Süleyman Demirel University Scientific Research Projects Management Unit for providing financial support to this study, which is a part of Nuri Işıldar's doctoral thesis, within the scope of the project numbered FDK-2020-8130.

Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.

References

- Abd Elrahman, M., Sikora, P., Chung, S. Y., Stephan, D. (2021). The Performance of Ultra-Lightweight Foamed Concrete Incorporating Nanosilica. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 21(2), 1-16. <https://doi.org/10.1007/s43452-021-00234-2>
- AKÜ DAL, (2022). Afyon Kocatepe University Natural Stone Laboratory, Afyon, Turkey.
- Alnahhal, A. M., Alengaram, U. J., Yusoff, S., Darvish, P., Srinivas, K., Sumesh, M. (2022). Engineering Performance of Sustainable Geopolymer Foamed and Non-Foamed Concretes. *Construction and Building Materials*, 316, 125601. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125601>
- Alnkaa, A., Yaprak, H., Memiş, S., Kaplan, G. (2018). Effect of Different Cure Conditions on the Shrinkage of Geopolymer Mortar. *Int. J. Eng. Res. Dev.*, 14(10), 51-55.
- Amran, Y. M., Farzadnia, N., Ali, A. A. (2015). Properties and Applications of Foamed Concrete; A Review. *Construction and Building Materials*, 101, 990-1005. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.112>
- ASTM C597-16. (2016). Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA 19428-2959 USA.
- Awang, H., Mydin, M. A. O., Roslan, A. F. (2012). Microstructural Investigation of Lightweight Foamed Concrete Incorporating Various Additives. *International Journal of Academic Research*, 4(2).
- Aydos Chemical Company. Kocaeli/Türkiye. <http://www.aydos.com.tr/tr/urun-detay/aydos-lightcon-28> (accepted 04 November 2021).
- Çimsa Company. Ankara/Türkiye. <https://www.cimsa.com.tr/tr/urunhizmetler/cimento/gri-cimento/cimsa-cem-i-42-5-r-portland-cimento/i-104> (accepted 04 November 2021).
- Davraz, M. & Gunduz, L. (2005). Engineering properties of amorphous silica as a new natural pozzolan for use in concrete. *Cement and Concrete Research*, 35(7), 1251-1261. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.11.016>

- Falliano, D., De Domenico, D., Ricciardi, G., Gugliandolo, E. (2018). Experimental Investigation on the Compressive Strength of Foamed Concrete: Effect of Curing Conditions, Cement Type, Foaming Agent and Dry Density. *Construction and Building Materials*, 165, 735-749. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.241>
- Falliano, D., Restuccia, L., Ferro, G. A. (2022). Increase the Fracture Energy of Foamed Concrete: Two Possible Solutions. *Procedia Structural Integrity*, 39, 229-235. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.03.092>
- Gencil, O., Oguz, M., Gholampour, A., & Ozbakkaloglu, T. (2021). Recycling waste concretes as fine aggregate and fly ash as binder in production of thermal insulating foam concretes. *Journal of Building Engineering*, 38, 102232.
- Gökçe, H. S., Hatungimana, D., Ramyar, K. (2019). Effect of Fly Ash and Silica Fume on Hardened Properties of Foam Concrete. *Construction and Building Materials*, 194, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.036>
- Guglielmi, P. O., Silva, W. R. L., Repette, W. L., Hotza, D. (2010). Porosity and Mechanical Strength of an Autoclaved Clayey Cellular Concrete. *Advances in Civil Engineering*, 2010. <https://doi.org/10.1155/2010/194102>
- He, J., Gao, Q., Song, X., Bu, X., He, J. (2019). Effect of Foaming Agent on Physical and Mechanical Properties of Alkali-Activated Slag Foamed Concrete. *Construction and Building Materials*, 226, 280-287. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.302>
- Işıldar, N. 2023. Silika esaslı katkılarının otoklavlanmış köpük beton mühendislik özelliklerine etkilerinin araştırılması. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 125s., Isparta.
- Jalal, M. D., Tanveer, A., Jagdeesh, K., Ahmed, F. (2017). Foam Concrete. *International Journal of Civil Engineering Research*, 8(1), 1-14.
- Jones, M. R., & McCarthy, A. (2006). Heat of hydration in foamed concrete: Effect of mix constituents and plastic density. *Cement and concrete research*, 36(6), 1032-1041. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.01.011>
- Kilincarslan, S., Davraz, M., & Işıldar, N. (2023). Investigation of the effect of autoclaving on foam concrete properties. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 16(4), 100722.
- Kim, H. S., Lee, S. H., Kim, B. (2017). Properties of Extrusion Concrete Panel Using Waste Concrete Powder. *Applied Sciences*, 7(9), 910. <https://doi.org/10.3390/app7090910>
- Mashkin, N., Bartenjeva, E., Mansurov, R. (2018). Naturally Cured Foamed Concrete with Improved Thermal Insulation Properties. In *Matec Web of Conferences*, 143, 02005. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814302005>
- Maslehuddin, M., Ibrahim, M., Shameem, M., Ali, M. R., Al-Mehthel, M. H. (2013). Effect of Curing Methods on Shrinkage and Corrosion Resistance of Concrete. *Construction and Building Materials*, 41, 634-641. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.064>
- Nambiar, E. K., Ramamurthy, K. (2009). Shrinkage Behavior of Foam Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 21(11), 631-636. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2009\)21:11\(631\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:11(631))
- Papadopoulos, A. M. (2005). State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments. *Energy and buildings*, 37(1), 77-86. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.05.006>
- Peng, Y., Yuan, X., Jiang, L., Yang, J., Liu, Z., Zhao, Y., Chen, H. (2022). The Fabricating Methods, Properties and Engineering Applications of Foamed Concrete with Polyurethane: a Review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-20. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04115-w>
- Polat Mining Company. Aydın/Türkiye. https://www.polatmaden.com.tr/urun_detay.asp?kat=4&idx=26 (accepted 04 November 2021).
- Raj, A., Sathyan, D., Mini, K. M. (2019). Physical and Functional Characteristics of Foam Concrete: a Review. *Construction and Building Materials*, 221, 787-799. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.052>
- Shi, J., Liu, B., He, Z., Liu, Y., Jiang, J., Xiong, T., Shi, J. (2021). A green ultra-lightweight chemically foamed concrete for building exterior: A Feasibility Study. *Journal of Cleaner Production*, 288, 125085. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125085>
- S-Lab (2021). Standard Laboratory Management Inc., Kocaeli, Turkey.
- TS EN 1015-18. (2004). Methods of test for mortar for masonry - Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar, TSE, Ankara.
- TS EN 12664 (2009). Thermal performance of building materials and products - Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods - Dry and moist products of medium and low thermal resistance, TSE, Ankara.
- TS EN 1602. (2013). Thermal insulating products for building applications-Determination of apparent density, TSE, Ankara.
- TS EN 196-1. (2016). Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength, TSE, Ankara.
- TS EN 196-6. (2020). Methods of testing cement - Part 6: Determination of fineness. TSE, Ankara.
- Wang, T., Gao, X., Li, Y., & Liu, Y. (2024). An orthogonal experimental study on the influence of steam-curing on mechanical properties of foam concrete with fly ash. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e02665.
- Yuan, H., Ge, Z., Sun, R., Xu, X., Lu, Y., Ling, Y., Zhang, H. (2022). Drying Shrinkage, Durability and Microstructure of Foamed Concrete Containing High Volume Lime Mud-Fly Ash. *Construction and Building Materials*, 327, 126990. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126990>



INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF DENSITY ON PHYSICAL, MECHANICAL AND THERMAL PROPERTIES OF FOAM CONCRETE

Metin DAVRAZ^{1*}, Şemsettin KILINÇARSLAN², Murat KORU³

¹ Isparta Uygulamalı Bilimler Üni., Teknoloji Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Isparta, Türkiye

² Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Isparta, Türkiye

³ Isparta Uygulamalı Bilimler Üni., Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Keywords

Foam Concrete,
Dry Density,
Thermal Conductivity,
Compressive Strength,
Split Tensile Strength.

Abstract

Foam concrete; It is a type of lightweight concrete that can be produced by adding cement, water, surfactant, and if desired, sand or fine aggregate. It has high fluidity in fresh form and low density after hardening. It can provide a thermal conductivity of 90 mW/mK at a density of 400 kg/m³. In this study, the foam concrete samples were produced by adding 80 g/L density foam to the mortars prepared at 300 kg/m³ cement dosage and 0.30 water/solid ratio using CEM I 42.5 R type Portland cement, limestone powder, polypropylene fiber, and superplasticizer additive. The compressive strength, split tensile strength and thermal conductivity properties of the samples produced in 12 different dry densities in the range of 300-1400 kg/m³ were tested. As the dry density values of the samples increased, the thermal conductivity and compressive strength values increased. Equations were proposed to estimate the compressive strength and thermal conductivity depending on the dry density of the foam concrete with limestone powder aggregate from the findings.

YOĞUNLUĞUN KÖPÜK BETONUN FİZİKSEL, MEKANİK VE TERMAL ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Anahtar Kelimeler

Köpük Beton,
Kuru Yoğunluk,
Isıl İletkenlik Katsayısı,
Basınç Dayanımı,
Yarmada Çekme Dayanımı.

Öz

Köpük beton; çimento, su, sürfaktan ve istenirse kum ya da ince agrega ilave edilerek, ısılsız olarak üretilebilen bir hafif beton türüdür. Taze halde yüksek akıcılığa ve sertleştikten sonra düşük yoğunluğa sahiptir. 400 kg/m³ yoğunlukta 90mW/mK ısılsız iletkenlik katsayısını sağlayabilmektedir. Bu çalışmada CEM I 42.5 R tipi Portland çimentosu, kalker tozu, polipropilen elyaf ve süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılarak, 300 kg/m³ çimento dozajı ve 0.30 su/katı oranında hazırlanan harçlara 80g/L yoğunlukta köpük ilavesiyle hafif beton numuneleri üretilmiştir. 300-1400 kg/m³ aralığında 12 farklı kuru yoğunlukta üretilen numunelerin (28. gün) basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve ısılsız iletkenlik özellikleri test edilmiştir. Elde edilen bulgulardan kalker tozu agregalı köpük betonun kuru yoğunluğuna göre basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve ısılsız iletkenlik katsayılarının değişimlerini tahmin etmeye yönelik bağıntılar önerilmiştir.

Alıntı / Cite

Davraz, M., Kılınçarslan, Ş., Koru, M., (2024). Investigation of The Effects of Density on Physical, Mechanical, and Thermal Properties of Foam Concrete, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 12(3), 585-594.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

M. Davraz, 0000-0002-6069-7802
Ş. Kılınçarslan, 0000-0001-8253-9357
M. Koru, 0000-0002-6949-645X

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	22.02.2022
Revizyon Tarihi / Revision Date	20.08.2024
Kabul Tarihi / Accepted Date	09.09.2024
Yayın Tarihi / Published Date	26.09.2024

* İlgili yazar / Corresponding author: metindavraz@isparta.edu.tr, +90-246-214-6771

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF DENSITY ON PHYSICAL, MECHANICAL AND THERMAL PROPERTIES OF FOAM CONCRETE

Metin DAVRAZ^{1†}, Şemsettin KILINÇARSLAN², Murat KORU³,

¹Isparta University of Applied Science, Technology Faculty, Dept. of Civil Engineering, Isparta-TURKEY

²Suleyman Demirel University, Dept. of Civil Engineering, Isparta-TURKEY

³Isparta University of Applied Science, Technology Faculty, Dept. of Mechanical Eng., Isparta-TURKEY

Highlights

- Lightweight foam concrete of different dry densities without heat treatment was prepared.
- The impact of density on the mechanical properties and thermal conductivity of foam concrete was investigated.
- Relations are proposed to predict the variations in compressive strength, splitting tensile strength, and thermal conductivity as a function of the dry density of foam concrete

Purpose and Scope

The effects of varying dry density values on the compressive strength, splitting tensile strength, and thermal conductivity of foam concrete were investigated.

Design/methodology/approach

12 different mix designs were prepared for dry density values ranging from 300 to 1400 kg/m³. The component quantities for each mix design were calculated based on the theoretical densities using the volume method. In all mixes, the cement dosage and the water-to-solid ratio (0.30) were kept constant, while the sand-to-cement ratio varied between 0 and 3.66

Findings

Relations are proposed to predict the variations in compressive strength, splitting tensile strength, and thermal conductivity as a function of the dry density of foam concrete

Originality

Thermal conductivity, compressive strength, and splitting tensile strength results were obtained for twelve different foam concrete mixtures with dry density values ranging from 300 to 1400 kg/m³. These findings provide valuable data for engineers and practitioners.

1. Introduction

Foam concrete is a lightweight concrete variation. It's made by incorporating foam made with a foaming ingredient into the mortar. This form of concrete is made from a mixture of aggregate, cement, and water. It comprises 75-80 percent of its volume in closed pores that are independent of one another. Foam concrete is a non-toxic, environmentally friendly building and insulation material that can be used in the exterior and interior walls and floors of all buildings. It contains no materials other than natural aggregate and cement, is non-toxic to humans, and provides light, heat, and impact sound insulation. In its fresh state, foam concrete has a low density, high flow ability, functional-sufficient strength, and low thermal conductivity. Its dry-density ranges from 400 to 1600 kg/m³, and its compressive strength is between 1 and 15 MPa. Pumping and placing foam concrete is simple. It does not necessitate the use of compression or vibration. It offers great water and frost resistance. In enterprises, foam concrete mortar can be molded and turned into blocks, or it can be simply transported with the help of a pump by producing it mobile at the application site-construction site when needed. Foam concrete can be used to make wall blocks, hollow blocks, panels, insulation leveling concrete, and prefabricated building parts, depending on its density (Kılınçarslan and Tuzlak, 2009).

Despite the fact that the first patent for foam concrete was issued in 1923, it has only lately gained popularity in semi-load-bearing and non-load-bearing construction applications (Ramamurthy *vd.*, 2009). Valore (1954) published the first complete research of cellular concrete in 1954, and Rudnai (1963), Short and Kinniburgh (1963) published detailed investigations on its composition, qualities, application, and structure in 1963. In recent years, researchers have examined the history of foam concrete, the materials utilized, its qualities, and building uses in a variety of projects around the world (Jones and McCarthy 2005, Jones and McCarthy 2005). While these

[†] Corresponding author: metindavraz@isparta.edu.tr, +90-246-214-6771

evaluations encompass functional features including fire resistance, thermal conductivity, and acoustic properties, there is a scarcity of information on new concrete properties, durability, and air gap systems. Many aspects influence the creation of stable foam concrete, including the choice of foaming agent, foam preparation procedures, material choice, additive selection for uniform air gap distribution, mix design strategies, and performance. Scientific investigations on the components of foam concrete, mixture design, manufacture, and qualities of fresh and hardened concrete were categorized by Ramamurthy et al. (2009). Table 1 shows the findings of the research on mixture design, density, and compressive strength of foam concrete based on this study. Most of the studies on normal concrete were also made for foam concrete. There are many factors affecting the properties of foam concrete (Kearsley and Wainwright 2001, Kearsley and Wainwright 2002, Nambiar and Ramamurthy 2006, Nambiar and Ramamurthy 2007, Just and Middendorf 2009, Jeong and Kim 2011).

Table 1. The Evaluation Of Foam Concrete Mix, Compressive Strength, And Density Range (Ramamurthy Vd., 2009, Jones And Mccarthy 2005, Jones And Mccarthy 2005, Nambiar And Ramamurthy 2006, Nambiar And Ramamurthy 2007, Mccormick 1967, Tam Vd., 1987, Regan And Arasteh 1990, Van Deijk 1991, Hunaiti 1997, Kearsley And Booyens 1998, Durack And Weiqing 1998, Tikalsky Vd., 2004, Aldridge And Ansell 2001)

Author(s) and years	Cement Dosage Components	s/c	w/c	FA/c	Density range (kg/m ³)	CS (MPa, 28g)
McCormick (1967)	335-446	0.79-2.8	0.35-0.57		800-1800	1.8-17.6
Tam vd. (1987)	390	1.58-1.73	0.6-0.8		1300-1900	1.81-16.72
Regan and Arasteh (1990)	Lightweight Aggregate	0.6	0.45-0.6		800-1200	4-16
Van Deijk (1991)	Cement. Sand and FA				280-1200	0.6-10 (91days)
ACI 523.1R-1992	Cement Paste				240-640 (DD)	0.48-3.1
	Cement-Sand				400-560 (DD)	0.9-1.72
Hunaiti (1997)		3			1667	12.11
Kearsley and Booyens (1998)	Cement - FA (Change)				1000-1500	2.8-19.9
Durack and Weiqing (1998)	270-398	1.23-2.5	0.61-0.82		982-1185 (DD)	1-6
	137-380		0.48-0.7	1.48-2.5	541-1003 (DD)	3-15 (77days)
Aldridge (2000)	Cement-Sand				400-1600	0.5-10
Kearsley and Wainwright (2001)	Cement and FA				1000-1500	2-18
	Cement. 149-420		0.4-0.45		490-660	0.71-2.07
Tikalsky vd. (2004)	Cement.Sand/FA 57-149		0.5-0.57		1320-1500	0.23-1.1
Jones and McCarty (2005)	300	1.83-3.17	0.5		1000-1400	1-2
			1.11-1.56	1.22-2.11	1000-1400	3.9-7.3
Jones and McCarty (2005)	500	1.5-2.3	0.3		1400-1800	10-26
			0.65-0.83	1.15-1.77	1400-1800	20-43
					800-1350	1-7
Nambiar and Ramamurthy (2006)	Cement-Coarse Sand	From 1 to 3 change filler /c ratio and v %0 - %100 FA change			(DD)	
	Cement- Sand				800-1350 (DD)	2-11
	Cement, Sand and FA				650-1200 (DD)	4-19

s/c : Sand/cement w/c : Water/cement FA/c : Fly Ash/cement DD : Dry density (kg/m³)

2. Material and Method

In this research, it was aimed to produce foam concrete in the density range of 300-1400 kg/m³ with cement, limestone powder, polypropylene fiber, superplasticizer, and protein-based foaming agent, and to determine some physical and mechanical properties. The dry density, compressive strength, splitting tensile strength, and thermal conductivity properties of the foam concrete samples produced in the laboratory were experimentally investigated, and the relations for the estimation of the compressive strength, tensile strength, and thermal conductivity depending on the dry density were proposed. The density of the foam concrete samples was controlled by the amount and density of foam obtained from the "surfactant + water + air" mixture. All sample productions and experiments in the research were carried out at the Suleyman Demirel University Natural and Industrial Building Materials Application and Research Center.

2.1. Materials

CEM I 42.5 R class Portland cement supplied from Göлтаş Cement Inc. was used as the binder. The properties of cement are given in Table 2. In the research, -100 µm limestone powder (LP) obtained from HSD Mining was used as a very fine aggregate. In order to reduce the amount of mixing water, lignosulfonate-based superplasticizer (SP) at the rate of 0.5% by mass of the cement amount and 6 mm polypropylene fiber (PF) at the rate of 1% to increase the tensile strength was added to all mix series.

Table 2. Properties Of Cement (Göltas 2020)

Chemical Properties of Clinker (%)		Physical Properties of Cement	
SiO ₂	20.52	Volumetric Expansion (mm)	≤ 1
Al ₂ O ₃	4.00	Fineness (90μ, %)	0.10
Fe ₂ O ₃	3.45	Fineness (200μ, %)	1.10
CaO	64.28	Specific Surface Area (cm ² /g)	3340
MgO	1.63	Initial Setting Time (min)	185
SO ₃	2.53	Final Setting Time (min)	240
Na ₂ O+K ₂ O	1.35	Specific Gravity (g/cm ³)	3.12
Mechanical Properties of Cement (MPa)			
7 days	Flexural Strength (MPa)	5.8	Compressive Strength (MPa)
28 days		7.2	

2.2. Method

12 different mixture designs were prepared in the dry density range of 300 - 1400 kg/m³. According to the theoretical densities targeted for each mixture design, the number of components to enter the mixture was calculated based on the volume method. Cement dosage and water/solid (w/s) ratio (0.30) were kept constant in all mixtures, while sand/cement (S/c) ratio varied between 0-3.66. In Table 3, the targeted dry density and component amounts for 1 m³ of the mixture were given.

Table 3. The Component Amounts Of Foam Concrete With Different Densities (For 1m³)

Sample	ρ_{ac-dry} (kg/m ³)	Cement (kg)	LP (kg)	Water (L)	SP (kg)	Fiber (kg)	Foam (kg)	w/s	S/c
1	300	300	0	89	1.48	3.0	76.55	0.30	0.00
2	400	300	96	119	1.98	3.0	70.22	0.30	0.32
3	500	300	196	149	2.48	3.0	63.85	0.30	0.65
4	600	300	296	179	2.98	3.0	57.53	0.30	0.99
5	700	300	396	209	3.48	3.0	51.16	0.30	1.32
6	800	300	496	239	3.98	3.0	44.84	0.30	1.65
7	900	300	596	269	4.48	3.0	38.47	0.30	1.99
8	1000	300	697	299	4.98	3.0	32.04	0.30	2.32
9	1100	300	797	329	5.48	3.0	25.71	0.30	2.66
10	1200	300	897	359	5.99	3.0	19.35	0.30	2.99
11	1300	300	997	389	6.48	3.0	12.98	0.30	3.32
12	1400	300	1097	419	6.99	3.0	6.65	0.30	3.66

Specific gravity of LP (ρ_L): 2.70 g/cm³ Specific gravity of PF (ρ_{PF}): 1.90 g/cm³
Density of SP (ρ_{SP}): 1.10 g/cm³ w/s: The ratio of water /solid
S/c: The ratio of sand/cement

First of all, the mortar was prepared by mixing cement, limestone powder, fiber, superplasticizer, and water. An average of 80 g/L density foam was added to the mixture until the theoretical fresh density value calculated for the mixture design was reached. In each sample group, 6 samples of 150 mm cubes and 3 samples of 300x300x50 mm panels were produced. All test specimens were cured at 23±2 °C temperature and 95% relative humidity (RH) environment until test times. The test samples of compressive and splitting tensile strengths were tested in the air-dry condition (RH~6%). On the other hand, the test samples of thermal conductivity were dried to a constant mass (up to 100% dry mass) in an air-circulating oven at 110 °C, and each of them were covered with a stretch film and protected from moisture until the end of the measurement.

The dry densities of foam concrete samples were determined according to TS EN 678 standard (TSE 1995). For each series, the compressive strengths according to TS EN 1354 and the split tensile strengths according to TS EN 12390-6 were carried out on 3 samples each of 150 mm cube (TSE 2007, 2009). In addition, the thermal conductivity of samples were carried out with the Laser Comb Fox 314 device according to TS EN 12667 (TSE 2003).

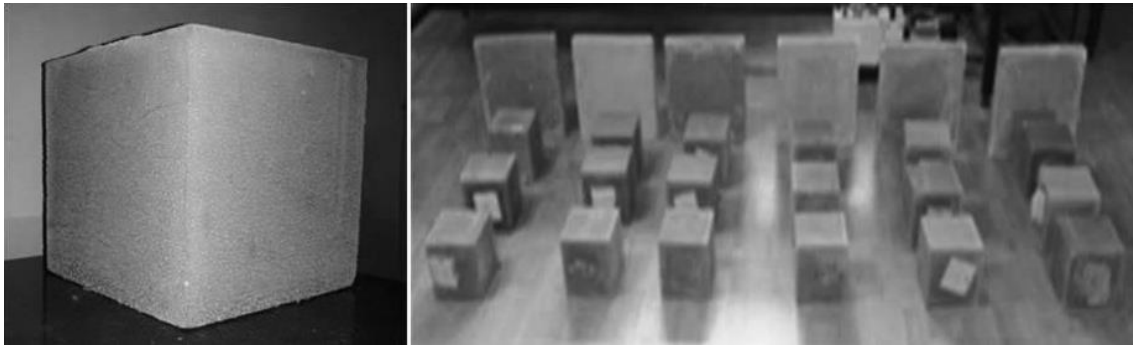


Fig 1. Foam Concrete Samples Produced In This Study

3. Results and Discussion

The theoretical and actual densities for fresh foam concrete and the theoretical and actual-dry densities of hardened foam concrete samples were given in Table 4.

Table 4. The Fresh And Hardened Dry Densities Of Foam Concrete Samples (Kg/M³)

Sample	Theoretical		Actual	
	ρ_{t-f}	ρ_{t-dry}	ρ_{ac-f}	ρ_{ac-dry}
1	466	300	514	333
2	590	400	703	487
3	714	500	749	535
4	838	600	928	651
5	963	700	1066	793
6	1087	800	1128	878
7	1211	900	1264	958
8	1336	1000	1395	1100
9	1460	1100	1619	1236
10	1585	1200	1713	1312
11	1709	1300	1814	1433
12	1833	1400	1973	1608

ρ_{t-f} : Theoretical density of fresh foam concrete (kg/m³)
 ρ_{ac-f} : Actual density of fresh foam concrete (kg/m³)
 ρ_{t-dry} : Theoretical dry density of foam concrete (kg/m³)
 ρ_{ac-dry} : Actual dry density of foam concrete (kg/m³)

The volume constancy in foam concrete depends on many factors such as the amount and type of components included in the mixture, the density of the foam, mixing speed and time, and ambient conditions. The differences between both theoretical and actual fresh densities of concrete and theoretical and actual dry densities of concrete are higher in foam concrete compared to normal concrete. When Table 4 was examined, there was an average of 8% increase in ρ_{ac-f} values in fresh concrete mixes compared to ρ_{t-f} values. This increase was related to the yield (stability) of the foam used in the mixture. In other words, the volume loss occurred in fresh concrete due to the explosion of some of the foam added to the mixture. This situation increased the ρ_{ac-f} values by 8% on average compared to the ρ_{t-f} values. When the ρ_{t-dry} values of the hardened foam concrete samples were compared with the ρ_{ac-dry} values, the average increase was around 11%. The increase in ρ_{ac-dry} values were also associated with the loss of stability of a part of the foam in the fresh foam concrete placed in the mold during the solidification stage. The test results of the compressive and splitting tensile strength carried out on the foam concrete samples that have completed the 28-day curing period were given in Table 5.

Table 5. The Results Of Compressive And Split Tensile Strengths Of Foam Concrete Samples At 28 Days (Avg.)

Sample	ρ_{ac-dry} (kg/m ³)	fc-28d (MPa)	fct-28d (MPa)
1	364	0.85	0.10
2	510	1.93	0,19
3	563	2.15	0.32
4	715	3.66	0.65
5	837	4.41	0.79
6	851	4.96	0.98
7	965	5.76	1.01
8	1100	6.77	1.09
9	1272	7.51	1.22
10	1321	8.77	1.27
11	1429	9.02	1.38
12	1531	10.94	1.43

fc-28d: Average compressive strength of 3 samples

fct-28d: Average split tensile strength of 3 samples

The compressive strengths of foam concrete samples based on actual dry density were given in Fig 2 and split tensile strengths based on actual dry density were given in Fig 3.

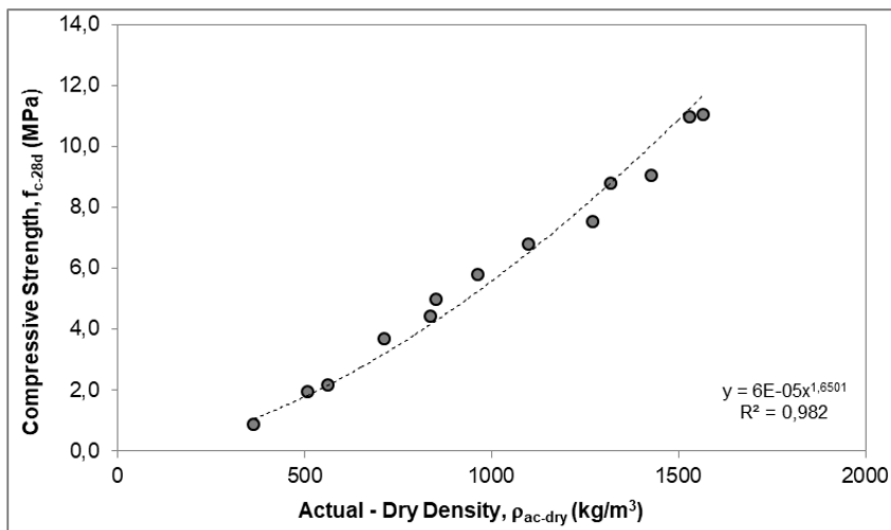


Fig 2. The Relationship Between Actual Dry Density And Compressive Strength In Foam Concrete Samples

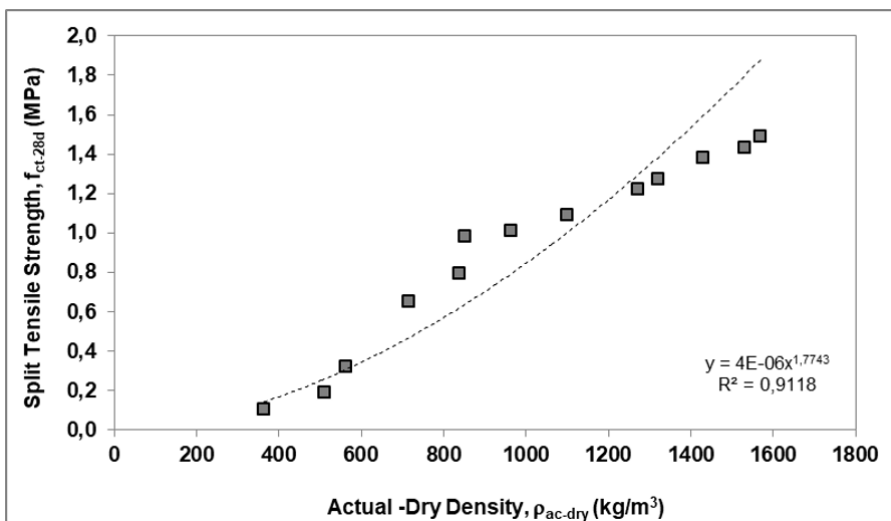


Fig 3. The Relationship Between Actual Dry Density And Split Tensile Strength In Foam Concrete Samples

The relations for the estimation of compressive and splitting tensile strengths on the 28th day according to the dry densities of foam concrete with 300 kg/m³ cement dosage, w/s:0.30 ratio, and limestone powder aggregate were given in Eq 1 and Eq 2, respectively.

$$f_{c-28d} = 6 \times 10^{-5} \times \rho_{ac-dry}^{1.65} \quad (r^2 = 0.98) \quad (1)$$

$$f_{ct-28d} = 4 \times 10^{-6} \times \rho_{ac-dry}^{1.77} \quad (r^2 = 0.91) \quad (2)$$

Where;

f_{c-28d} , is the compressive strength of foam concrete at 28d, MPa; f_{ct-28d} , is the split tensile strength of the foam concrete at 28d, MPa; ρ_{ac-dry} is the actual-dry density of foam concrete, kg/m³. In addition, the relationship between the compressive and split tensile strengths of the foam concrete samples was given in Fig 4.

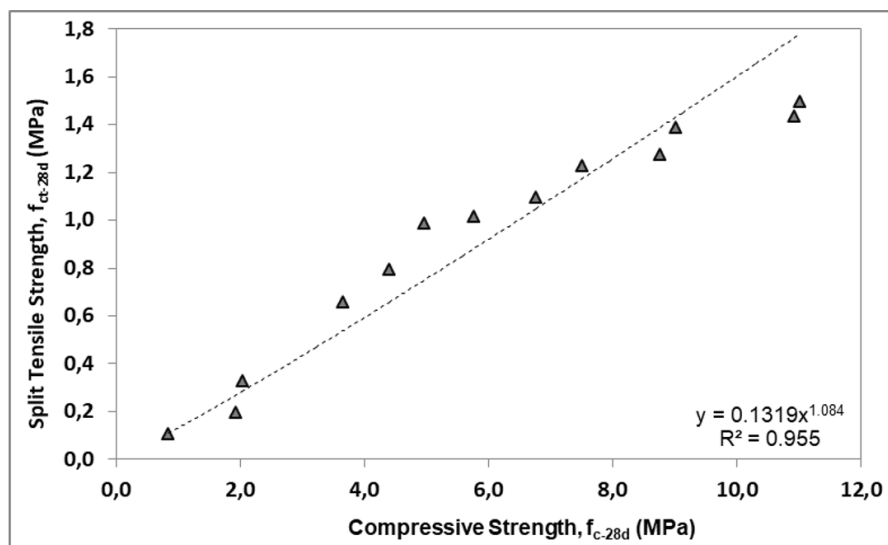


Fig 4. The Relationship Between Compressive Strength And Split Tensile Strength In Foam Concrete Samples

The equation for the estimation of the split tensile strengths according to the compressive strengths at 28d of the foam concretes with the properties described above was also given in Eq 3.

$$f_{ct-28d} = 0.132 \times (f_{c-28d})^{1.084} \quad (r^2 = 0.96) \quad (3)$$

Thermal conductivity (λ_{10}) for each foam concrete densities group were determined by taking the average of measurement results of 3 samples, and the average λ_{10} values depending on the ρ_{ac-dry} of the samples were given in Table 6.

Table 6. Thermal Conductivity Of Foam Concrete Samples Depending On Actual Dry Density (Avg.)

Sample	ρ_{ac-dry} (kg/m ³)	λ_{10-dry} (mW/mK)
1	333	90.98
2	487	135.00
3	535	141.90
4	651	159.10
5	793	221.90
6	878	236.50
7	958	265.30
8	1100	297.90
9	1236	323.60
10	1312	361.70
11	1433	433.80
12	1608	498.10

The variation of the thermal conductivity depending on the actual dry density in foam concrete samples was given in Fig 5. In addition, the relation for the estimation of foam concrete λ_{10} -dry values depending on ρ_{ac-dry} values were proposed in Eq 4.

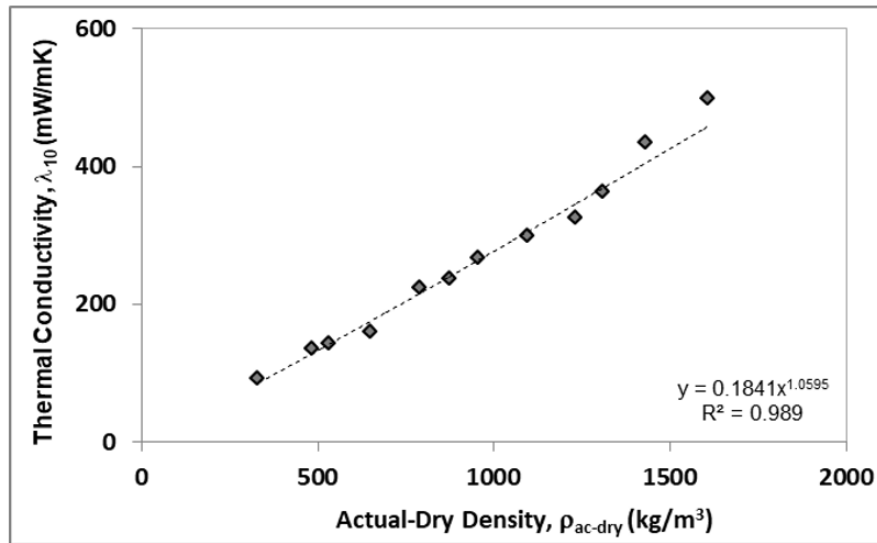


Fig 5. The Thermal Conductivity Depending On Actual Dry Density In Foam Concrete Samples

$$\lambda_{10} = 0.184 (\rho_{ac-dry})^{1.060} \quad (r^2 = 0.99) \quad (4)$$

Where;

λ_{10} is the thermal conductivity of foam concrete at 100% dry condition, mW/mK.

4. Conclusions

In this research, it was aimed to produce foam concrete samples with 12 different dry densities between 300-1400 kg/m³, and the actual dry densities of the produced samples varied between 333-1608 kg/m³. This difference was attributed to the change of foam stability depending on the a/c ratio and the fluctuation of the produced foam density between 70-95 g/L.

By evaluating the findings obtained from the research, relations for estimating compressive and splitting tensile strengths according to dry density was proposed for foam concretes with 300 kg/m³ cement dosage, w/s = 0.30 ratio, and limestone powder aggregate. Also;

- Depending on the decrease in the density of the foam concrete, the compressive strength also decreased linearly,
- For different foam concrete designs, it is possible to predict with high accuracy the compressive strength based on the theoretical dry density, providing the cement dosage, w/c ratio, and aggregate type is constant,
- Similar approximations can be established between dry density-split tensile strength and compressive strength-split tensile strength.
- The thermal conductivity of the foam concretes with a dry density between 333-1608 kg/m³ produced in the study varied between 91-498 mW/mK.
- As the actual dry density values of the foam concrete samples increased, the thermal conductivity also increased linearly.

In this study, a relation for the estimation of thermal conductivity was also proposed depending on the dry densities of the foam concretes obtained.

However, many factors such as cement dosage, aggregate type, w/s ratio, and S/c ratio affect the thermal conductivity of foamed concretes as well as their dry densities. In this context, the suggested equations will be consistent for 300 kg/m³ cement dosage, use of limestone powder as aggregate, and foam concrete with a ratio of w/s: 0.30.

For countries with limited energy resources, energy saving is of great importance. Features such as low thermal conductivity, low density, stretchability of production according to the targeted product, and being easily

produced based on local resources make foam concrete remarkable in many regions. However, the fact that many factors affect the physical, structural and mechanical properties of foam concrete necessitates the continuation of numerous and comprehensive studies in this field.

Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.

Declaration of interests

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

References

- Aldridge D., Ansell T. (2001) Foamed concrete: production and equipment design, properties, applications and potential. In: Proceedings of one-day seminar on foamed concrete: properties, applications and latest technological developments. Loughborough University.
- Durack, J. M., Weiqing, L., (1998) The properties of foamed air cured fly ash-based concrete for masonry production. In Proceedings of the Fifth Australasian Masonry Conference (pp. 129-38). Gladstone The Queensland, Australia.
- Hunaiti, Y. M., (1997) Strength of composite sections with foamed and lightweight aggregate concrete. *Journal of materials in civil engineering*, 9 (2), 58-61. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1997\)9:2\(58\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1997)9:2(58)).
- Goltas Cement Inc. Monthly Cement Analysis Report, August 2020.
- Jeong, J. Y., Kim, J. M., (2011) Properties of low density foamed concrete for building construction using anionic surfactants of synthetic and natural materials. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 11(6), 557-566. <https://doi.org/10.5345/JKIBC.2011.11.6.557>.
- Jones M.R., McCarthy A., (2005) Utilizing unprocessed low-lime coal ash in foamed concrete. *Fuel*. Vol.84, pp. 1398-1409. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.09.030>.
- Jones M.R., McCarthy A., (2005) Preliminary views on the potential of foamed concrete as a structural material. *Magazine of concrete research*, 57(1), 21-31. <https://doi.org/10.1680/mac.2005.57.1.21>.
- Just, A. and Middendorf B., (2009). Microstructure of high-strength foam concrete. *Materials characterization*, 60 (7), 741-748. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2008.12.011>.
- Kearsley, E. P., Wainwright, P. J., (2001). The effect of high fly ash content on the compressive strength of foamed concrete. *Cement and concrete research*, 31(1), 105-112. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00430-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00430-0).
- Kearsley, E. P., Wainwright, P. J., (2002). The effect of porosity on the strength of foamed concrete. *Cement and concrete research*, 32 (2), 233-239. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00665-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00665-2)
- Kearsley E.P., Booyens P.J., (1998) Reinforced foamed concrete, can it be durable. *Concrete Beton* Vol. 91, pp. 5-9.
- Kılıncarslan, Ş., Tuzlak, F., (2018) Investigation of Strength and Thermal Conductivity Properties of Foam Concrete with Fly Ash. *International Journal of Sustainable Engineering and Technology*, 2(1), 1-5.
- McCormick, F. C., (1967). Rational proportioning of preformed foam cellular concrete. In *Journal Proceedings* (Vol. 64, No. 2, pp. 104-110).
- Nambiar, E. K., Ramamurthy, K., (2006). Models relating mixture composition to the density and strength of foam concrete using response surface methodology. *Cement and Concrete Composites*, 28 (9), 752-760. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.06.001>.
- Nambiar, E. K., Ramamurthy, K. (2007). Sorption characteristics of foam concrete. *Cement and concrete research*, 37(9), 1341-1347. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.05.010>.
- Ramamurthy, K., Nambiar, E. K., and Ranjani, G. I. S. (2009). A classification of studies on properties of foam concrete. *Cement and concrete composites*, 31(6), 388-396. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.04.006>.
- Regan P.E., Arasteh A.R., (1990) Lightweight aggregate foamed concrete. *Structural Engineer*, Vol. 68 (9), 167-73.
- Rudnai G., (1963) *Lightweight concretes*. Budapest, Akademiado, <https://lib.ugent.be/catalog/rug01:001029927>
- S. Van Deijk, (1991) *Foam concrete*, Concrete 25 (5).
- Short A., Kinniburgh W., (1963) *Lightweight concrete*. Asia Publishing House. London: Applied Science Publishers, 1978.
- Tam, C. T., Lim, T. Y., Sri Ravindrarajah, R., Lee, S. L., (1987). Relationship between strength and volumetric composition of moist-cured cellular concrete. *Magazine of Concrete Research*, 39 (138), 12-18. <https://doi.org/10.1680/mac.1987.39.138.12>
- Tikal'sky P.J., Pospisil J., MacDonald W.A., (2004) Method for assessment of the freeze-thaw resistance of preformed foam cellular concrete. *Cement and Concrete Research*. 34(5), 889-893. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.11.005>.
- TS EN 678, (1995) Determination of the Dry Density of Autoclaved Aerated Concrete, Turkish Standard Institute, Ankara, Turkey.
- TS EN 1354, (2007) Determination of compressive strength of lightweight aggregate concrete with open structure, Turkish Standard Institute, Ankara, Turkey.
- TS EN 12390-6, (2009) Testing hardened concrete - Part 6: Tensile splitting strength of test specimens, Turkish Standard Institute, Ankara, Turkey.

TS EN 12667, 2003. Thermal performance of building materials and products- Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods-Products of high and medium thermal resistance, Turkish Standard Institute, Ankara, Turkey.

Valore, R. C., (1954) Cellular concretes Part 1 composition and methods of preparation. In Journal Proceedings (Vol. 50, No. 5, pp. 773-796).



EXPLORING THE EFFECTS OF STITCHING PROCESS ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF THREE- DIMENSIONAL (3D) STITCHED UNIDIRECTIONAL COMPOSITES

Mehmet KORKMAZ*

Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

Keywords

Stitching,
Unidirectional Fabric,
Carbon Fiber,
Mechanical Tests,
Polymer Composites.

Abstract

The stitching process has obvious effects on the out- of- plane mechanical properties of composites such as impact damage mechanism or impact energy absorption. However, the effects on the in- plane mechanical properties of composites have been under discussion and need to be clarified. In the previous studies, tensile, shear and bending behaviors of 3D stitched biaxial woven carbon composite were investigated. The unidirectional carbon woven fabrics constitute the significant part of raw materials in the composite industry. For this reason, the research study was expanded to examine the in- plane mechanics of 3D stitched unidirectional carbon woven composites. In this study, the unstitched and 3D stitched unidirectional woven carbon composites were manufactured and tested under the shear, tensile and bending loads. While the stitching process improved the tensile and shear modulus of composite, it could not create the significant difference in the bending behavior. The highest module and maximum stress values were obtained in the tensile test. The bending and shear test results follow them, respectively. Moreover, it was proven that the fabric architecture of stitched composite layer has the substantial effect on the tensile properties of 3D stitched composite.

DİKİM İŞLEMİNİN ÜÇ BOYUTLU (3B), DİKİLMİŞ TEK EKSENLİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Anahtar Kelimeler

Dikme,
Tek Eksenli Kumaş,
Karbon Lifi,
Mekanik Test,
Polimer Kompozit.

Öz

Dikme işlemi kompozitin kalınlığı yönündeki darbe hasar dayanımı ya da darbe enerjisi emilimi gibi mekanik özellikleri üzerine belirlenmiş etkilere sahiptir. Bu duruma karşın dikme işleminin kompozitin düzlemi yönündeki mekanik özellikleri üzerine etkileri hala tartışılmakta ve aydınlatılması ihtiyacı duyulmaktadır. Önceki dönemlerde yapılan çalışmalarda iki eksenli karbon dokuma kumaşların dikilmesi ile üretilmiş 3B kompozitin çekme, düzlemsel kayma ve eğilme özellikleri incelenmiştir. Tek eksenli karbon dokuma kumaşlar kompozit endüstrisinde kullanılan ham maddelerin önemli bir bölümünü temsil etmektedir. Tek eksenli karbon dokuma kumaşların dikilmesi ile üretilmiş olan 3B kompozitin düzlemsel mekanik özelliklerinin incelenmesi amacı ile çalışma genişletilmiştir. Bu çalışmada, tek eksenli karbon dokuma kumaşlar ile dikilmiş ve dikilmemiş kompozitler üretilmiş ve çekme, düzlemsel kayma ve eğilme yükleri altında test edilmişlerdir. Dikme işlemi kompozitin çekme ve düzlemsel kayma modüllerini arttırırken eğilme davranışında önemli bir fark yaratamamıştır. En yüksek modül ve yük değerleri çekme testinde elde edilmiştir. Eğilme ve kayma test sonuçları sırası ile bu değerleri takip etmiştir. Bu sonucun yanı sıra dikilmiş kompozit katmanının sahip olduğu kumaş mimarisinin kompozit çekme özellikleri üzerine önemli bir etkisinin olduğu belirlenmiştir.

Alıntı / Cite

Korkmaz, M. (2024). Exploring the Effects of Stitching Process on the Mechanical Properties of Three- Dimensional (3D) Stitched Unidirectional Composites, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 12(3), 595-602.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

M. Korkmaz, 0000-0001-7000-0653

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	18.03.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date	30.08.2024
Kabul Tarihi / Accepted Date	09.09.2024
Yayın Tarihi / Published Date	26.09.2024

*İlgili yazar / Corresponding author: mehmet.korkmaz@deu.edu.tr, +90-232-301-7707

EXPLORING THE EFFECTS OF STITCHING PROCESS ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF THREE- DIMENSIONAL (3D) STITCHED UNIDIRECTIONAL COMPOSITES

Mehmet KORKMAZ[†]

Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

Highlights

- The stitching improves the tensile and shear modulus of SUD composites,
- The fabric architecture of composite layer has the substantial effects on the mechanics of SUD,
- The stitching process do not have statistically meaningful effects on the maximum stress values of SUD,

Graphical Abstract

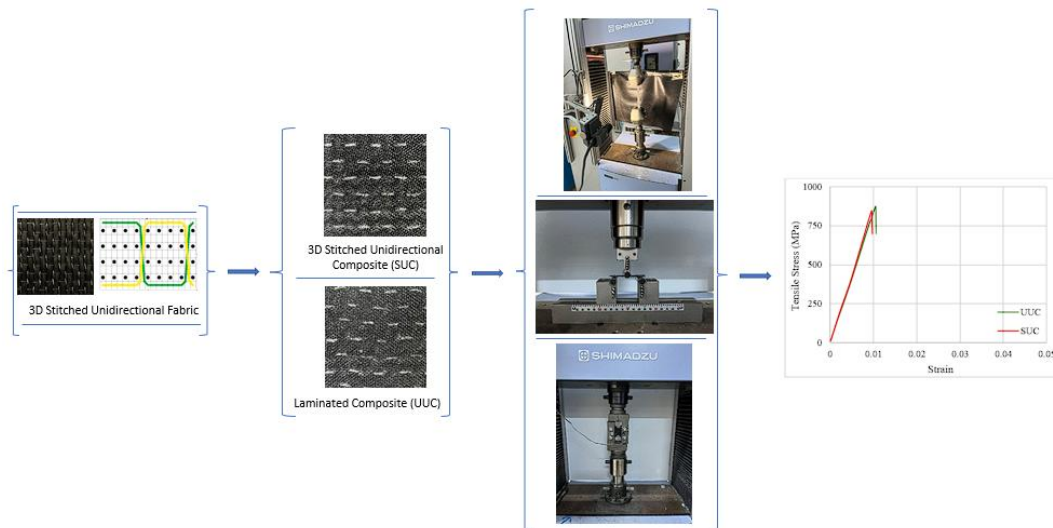


Figure. Investigation The Effects Of Stitching Process On The Mechanical Properties Of 3D Stitched Unidirectional Composite

Purpose and Scope

The effects of stitching process on the in- plane mechanical properties of composites have been under discussion and need to be elucidated for the 3D stitched unidirectional woven composites.

Design/methodology/approach

The 3D stitched unidirectional woven and traditional laminated composites were produced and tested under the shear, tensile and bending loads.

Findings

The maximum tensile, in- plane shear, bending stress and module values of 3D stitched unidirectional woven composites were determined. While the stitching process did not change the maximum stress values of composites, the process improved the tensile and shear module values. In addition, the result proven that the tensile properties of 3D stitch composite are affected by the fabric architecture of composite layer.

Originality

Several studies were carried out to elucidate the effects of stitching process on the in- plane mechanical properties of stitched biaxial woven composites. Because of the multiple effects of stitching process, the contradictory results were obtained from the studies. The unidirectional woven fabrics constitute the significant part of raw materials in the composite industry. Therefore, the effects of stitching process on the 3D unidirectional woven composites were elucidated thanks to this study. Moreover, the results were compared with the previous studies to show the effects of fabric architecture on the composite mechanics.

[†] Corresponding author: mehmet.korkmaz@deu.edu.tr, +90-232-301-7707

1. Introduction

The specific structural properties of three-dimensional (3D) textiles gain outstanding properties to the composites. The separated fiber or yarn group, which is placed in the third direction of fabric, improves the mechanical behaviors in their thickness. The 3D textiles can be obtained by the weaving, knitting, braiding, tufting, stitching or non-woven production methods. Among the production methods, the stitching has special importance thanks to its easy to apply. The 3D stitching process impart the outstanding damage tolerance and acceptable fatigue performance to the polymer composites (Larsson, 1997).

The PRSEUS concept (The Pultruded Rod Stitched Efficient Unitized Structure), which was developed by the NASA, Boeing and the United State Air Force, expanded the awareness and run-up the publications about 3D stitched composites (Velicki and Jegley, 2014). The pattern of stitch, the stitch yarn linear density, the density of stitch, pretension, the type of stitch, the twist of stitch yarn, ply orientation or the raw material of stitch yarn have been under examination to clarify their effect on the mechanical properties of 3D stitched composites. Moreover, the number studies have focused on the effects of stitch yarn linear density (Yalkın et al., 2015; Xu et al., 2015; Tan et al., 2012) and stitch density (Tan et al., 2013; Lascoup et al., 2010; Pingkarawat et al., 2013) because both parameters are strongly related with the mechanical behaviors of composite (Drake et al., 2021).

Reis et al. (2024) produced 3D stitched and laminated composites to investigate their three-point bending, Charpy impact, double cantilever beam and short beam shear properties. The obtained results show that the stitching process improve the fracture toughness of composite. Li et al. (2021) stitched unidirectional carbon fibers with the ultra-thin continuous nanotube belts. Afterward, double beam cantilever beam, end notch flexure, tensile and bending tests were carried out. It was concluded that while the stitching did not affect the tensile and bending properties, the process improved mode I and mode II interlaminar toughness of composites. Kaya et al. (2022) produced unreinforced and stitched 3D carbon composites and examined their flexural properties. Although the stitching process reduced the flexural strength and modulus of composites, the process improved the toughness of stitched 3D composite.

The effects of stitching process on the in-plane mechanical properties of composites are not clear and need to be elucidated. For this reason, studies have been conducted to clarify the mechanical behaviors of 3D stitched composites for last decade. For instance, while some studies (Aymerich et al., 2003) were concluded the stitching improves the composites tensile properties, number of studies (Shah Khan and Mouritz, 1996) determined that the stitching degrades the tensile properties. Moreover, the several studies (Larsson, 1997; Kang and Lee, 1994) showed that the process does not change the composites tensile properties. It is possible to extend the contradictory results for other mechanical properties.

The contradictory results of in-plane mechanical properties of stitched composites are originated from the multiple effects of stitching process on the composites. This process can change the thickness of composite, local or total fiber volume fraction of composite, in-plane yarns' crimp ratios, in-plane yarns' orientations or damage the in-plane yarns. This phenomenon makes more complicate the predicting in-plane mechanical behaviors of stitched composites and cause to obtain the contradictory results.

The unidirectional carbon woven fabrics constitute the significant part of raw materials in the composite industry. They are especially demanded by the aerospace industry thanks to their high strength in the fiber direction and easy to model their structure (Heidari-Rarani et al., 2018; Reinforcements, 2024). However, the biaxial woven fabrics were mostly preferred (Kirmasha et al., 2020; Saboktain et al., 2022; Tarfaoui et al., 2019) to constitute the layers of 3D stitched composites. The few numbers of studies (Abdelal and Donaldson, 2018) were conducted to determine the mechanics of 3D stitched unidirectional carbon woven composites (SUC) and need to be elucidated.

In the previous studies (Korkmaz, 2024; Korkmaz 2023), the tensile, in-plane shear, quasi-static indentation and bending properties of 3D stitched biaxial carbon woven composite (SBC) were investigated. As clarifying the contradictory results in-plane mechanics of stitched composites and observe the effects of fabric architecture, the research was extended and carried out on the SUC. The same stitching conditions, which are the stitch yarn type, the stitch density and stitch length, were applied to obtain the SUC.

In the study, the SUC was produced and applied the shear, tensile and bending load. Moreover, the unstitched unidirectional traditional laminated composite (UUC) was manufactured and characterized to make comparison. Therefore, the effects of stitching process on the in-plane mechanical properties of composite could be clarified under the diversified loads.

2. Material and Method

2.1. 3D Stitched Unidirectional Fabric

The unidirectional woven fabric was used in the study to obtain 3D stitch unidirectional fabric. This kind of woven fabrics include the main yarns at just warp direction. The monofilament glass yarns were placed at the weft direction to keep together the warp yarns and give them the fabric form. Thanks to the low diameter value of monofilament glass yarns, the warp yarns has almost the non-crimp structure. Therefore, they can transfer their strength to the composites with the minimum loss. The unidirectional woven fabric was constituted by the 12k-carbon yarns (800 Tex) and has 200 g/m² unit weight. The 3k-carbon yarn (200 Tex) was preferred to apply hand stitch to four layers of fabrics. Density of stitch yarn was 2.5 yarns/cm and length were 8 mm. Front appearance of SUC and its schematic cross section are presented in Figure 1. In cross-section view, which was created by the WiseTex program (WiseTex suite, 2024), stitch yarns are represented with the green and yellow lines. The weft yarns of unidirectional fabrics, which is monofilament glass yarn, are identified with the black dots. The figure does not include the warp yarns.

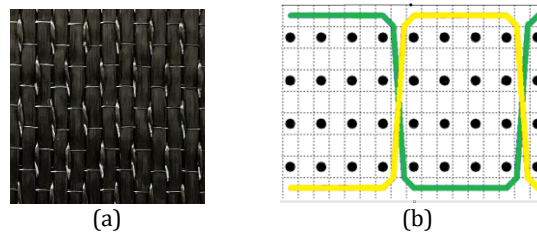
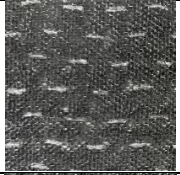
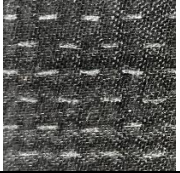


Figure 1. The 3D Stitched Unidirectional Fabric (A) Front Appearance, (B) The Cross Section

2.2. Production The Composites

In the composite production stage, the VARIM method was preferred and hardener to epoxy proportion was adjusted at 1:3. The matrix had been cured at 80°C for eight hours. Moreover, four layers unidirectional laminated carbon composite was manufactured for comparison. The areal densities of structures are similar and have almost 900 g/m². The thickness, density values, fiber volume fractions and surface appearances of composites are shown with their standard deviations (S.D) in Table 1.

Table 1. Properties of Composites

Type of Composite	Fiber volume fraction (%)	S.D	Thickness (mm)	S.D	Density (g/ cm ³)	S.D	Photograph
Unstitched unidirectional composite (UUC)	54.45	0.008	0.83	0.01	1.63	0.06	
3D stitched unidirectional composite (SUC)	57.37	0.008	0.94	0.01	1.51	0.05	

2.3. Test of the Composites

2.3.1 Tensile Test

The composites were tested based on ASTM-D3039/D3039M-14. Shimadzu Autograph AG-X 100 kN testing device was used the tests were applied for just warp direction. The five test samples were prepared for every type of composite at 250 × 25 mm dimensions. Tensile test was carried out with the extensometer to measure displacement values. Tensile modulus and maximum stress values were determined for both composites. Test machine and extensometer equipment are shown in Figure 2(a) and 2(b), respectively.

2.3.2. Bending Test

The bending test was conducted according to ASTM D790 with Shimadzu Autograph AG-X 100 kN. The depth-to-thickness ratio was settled at 32:1. Five specimens, which has 12.5 x 65 mm dimensions, were tested for every type of composite. The bending apparatus is presented in 2(c).

In the test, bending force and deflection values were obtained. Afterward, the bending stress, strain and modulus values were calculated thanks to the equations 1, 2 and 3 (ASTM D790, 2017), respectively.

$$S_f = 3PL/2bd^2 \quad (1)$$

$$e_f = 6Dd/L^2 \quad (2)$$

$$E_B = L^3m/4bd^3 \quad (3)$$

In the equations, S_f is stress in the outer fibers at midpoint (MPa), P is load at a given point on the load-deflection curve (N), L is support span (mm), b is width of beam tested (mm), d is the thickness of beam tested (mm), e_f is the strain in the outer surface (mm/mm), D is maximum deflection of the center of the beam (mm), E_B is modulus of elasticity in bending (MPa), and m is slope of the tangent to the initial straight-line portion of the force-deflection curve (N/mm).

2.3.3. In-Plane Shear Test

The V-Notched Rail shear test was applied to the composites according to the ASTM-D7078/D7078M-19 standard by the Shimadzu Autograph AG-X 100 kN test machine. The shear apparatus is presented in Figure 2(d).

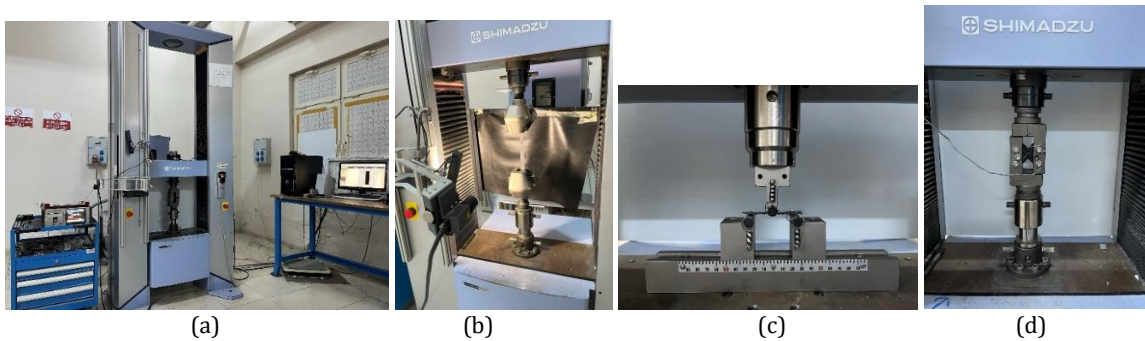


Figure 2. Testing Machine and Apparatus (A) Shimadzu Autograph AG-X 100 Kn, (B) Tensile Test With Using Of Extensometer, (C) Bending Apparatus, (D) Shear Apparatus

The strain-gage was used to measure strain values in the test. For every type of composite, the five specimens were prepared. The sizes of shear sample are shown in Figure 3. Shear strength and modulus values of composite were calculated with the equation 4 and 5 (ASTM D7078M-19, 2020), respectively.

$$\tau_{12} = \frac{P}{A} \quad (4)$$

$$G_{12} = \frac{\tau_{12}}{\gamma_{12}} \quad (5)$$

In the equations, τ_{12} is shear stress (MPa), P is force (N), A is cross section area (mm²), G_{12} is shear modulus (MPa) and γ_{12} is shear strain.

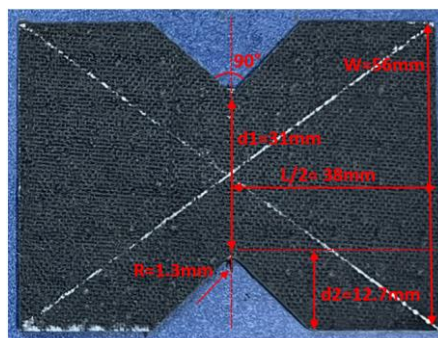


Figure 3. Dimensions Of Shear Test Specimen

3. Results and Discussions

3.1. Tensile Test Results of Composites

The tensile stress- strain graphs of composites are shown in Figure 4. While the red line represents SUC, the UUC is identified with the green line in the figure. In addition, the obtained tensile modulus and maximum tensile stress values of composites are shown in Figure 5. Stitching did not impress maximum tensile stress values of composites. On the other hand, the process enhanced the tensile modulus of composite. It is possible to explain this phenomenon with that the stitching helps the yarns to do not disturb their direction in the composite production stage.

In the previous study (Korkmaz, 2024), stitching process reduce the fiber volume fraction and degrade the tensile module of SBC along the stitching direction. However, the opposite behavior was observed in the SUC and improve the tensile module value. The obtained result proven that the fabric architecture of stitch composite layer has the significant effect on tensile properties of stitched composite.

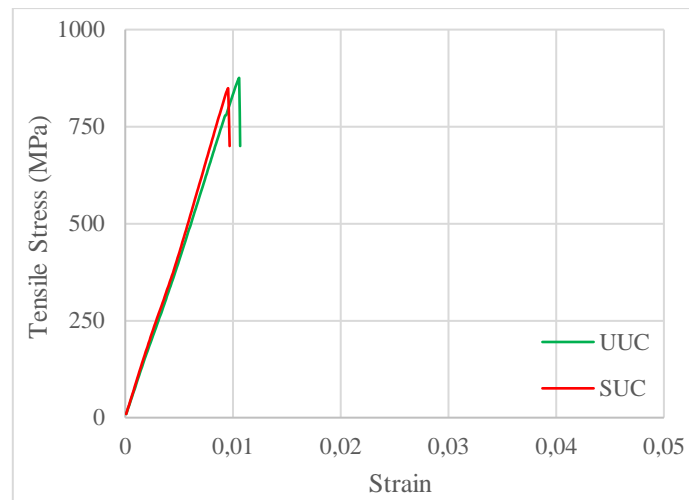


Figure 4. The Stress- Strain Graphs of Composites

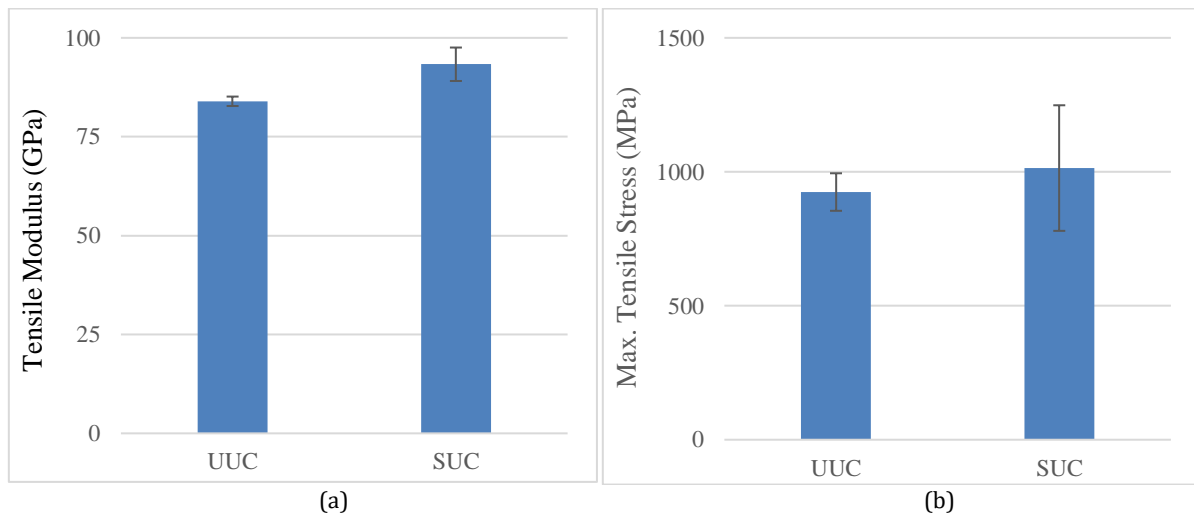


Figure 5. Tensile Graphs of Composites (A) Tensile Modulus Values, (B) Max. Tensile Stress Values

3.2. Bending Test Results of Composites

Bending modules and maximum bending stress values of composites are presented in Figure 6. The stitching process did not create statistically significant differences in bending module and maximum stress values. In previous study (Korkmaz, 2023), the same behavior was observed in the SBC and the stitching process did not chance the maximum bending stress and bending module of composite.

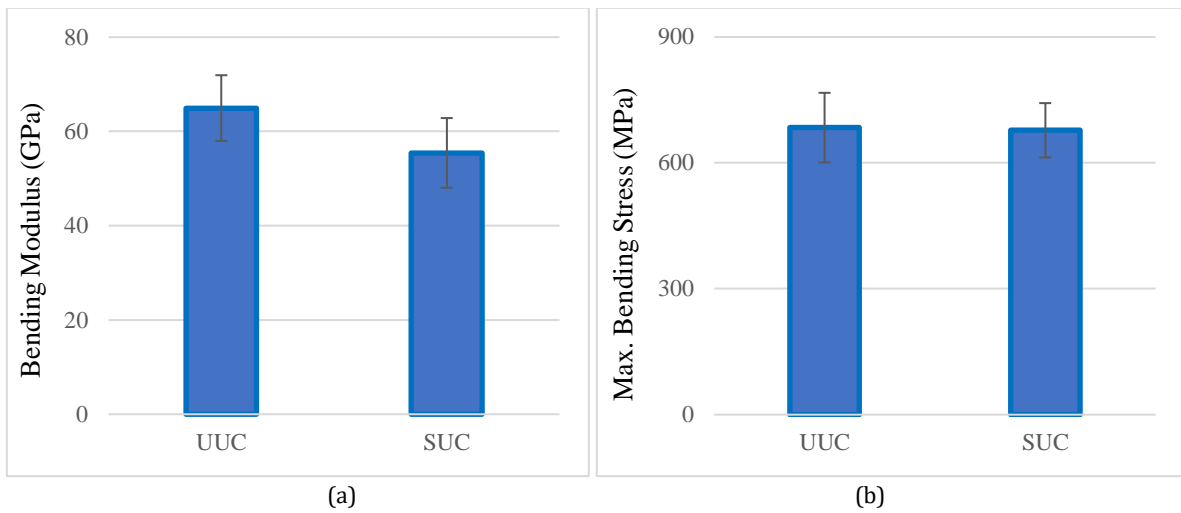


Figure 6. Bending Graphs of Composites (A) Bending Modulus Values, (B) Max. Bending Stress Values

3.3. In- Plane Shear Test Results of Composites

Shear modulus and maximum shear stress values of composites are presented in Figure 7. Although stitching process did not create statistically significant difference in the maximum shear stress values, the shear modulus of composite was increased almost two times.

In the unidirectional woven fabrics, glass monofilament yarn was used as weft yarns. Therefore, unidirectional yarns can gain fabric form and make easier the producers for composite manufacturing. The shear properties of composites are mainly characterized by the intra and inter- layer frictions of fabric layers. Stitching process create interlacement points between in- plane and stitching yarns. As result, the maximum shear stress was not influenced by the process. However, the created interlacement points almost two times improved the shear modulus of composite. In the previous study (Korkmaz, 2024), the same behavior was observed in the SBC. While stitching process improved shear module, process did not change maximum shear stress value of composite.

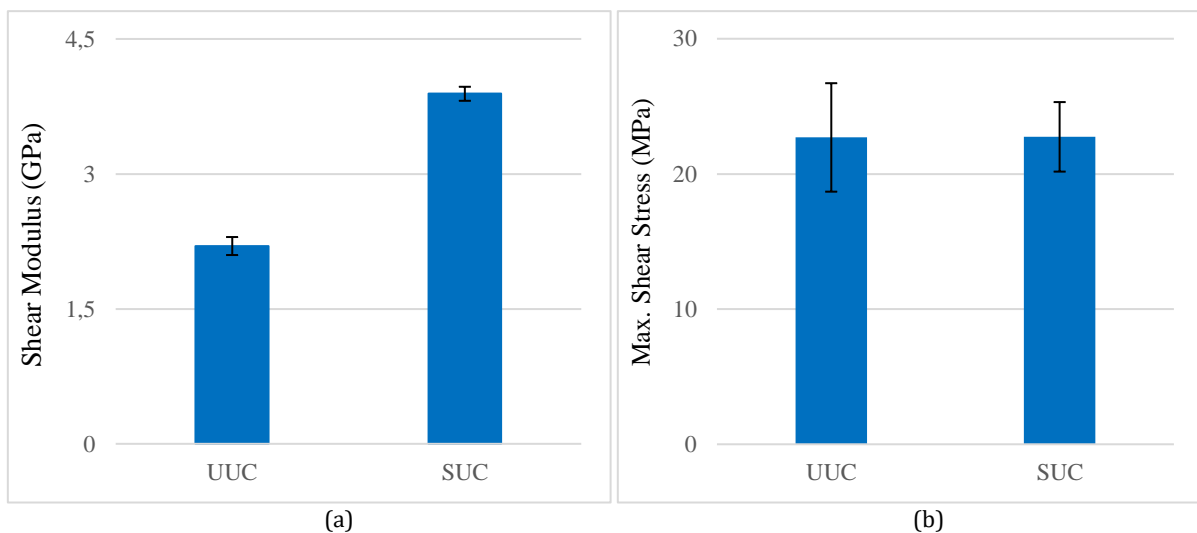


Figure 7. Shear Graphs of Composites (A) Shear Modulus Values, (B) Max. Shear Stress Values

4. Conclusions

The 3D stitched unidirectional carbon composite was manufactured and tested under the shear, tensile and bending loads in the study. Moreover, a laminated unstitched carbon composite was manufactured and tested to for comparison. Modulus and maximum stress values of composites were determined for every type of mechanical test.

While stitching process did not change maximum stress values of composites, process improved tensile and shear module values. According to the module and maximum stress values, the highest results were obtained from the tensile test. The results of bending and shear tests follow them, respectively. Moreover, the obtained results were

compared with the previous studies, which were carried out on the SBC with the same stitching conditions. Although the stitching decreased the tensile module of SBC, the opposite behavior was observed in the SUC. The result proven that tensile properties of 3D stitch composite is affected by fabric architecture of composite layer.

Acknowledgement

The author would like to thanks to Mrs. Ceren Saygın and Rasa Mühendislik İnş. Ve Tic. Ltd. for providing the unidirectional carbon woven fabrics.

Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the author.

References

- American Composite Manufacturers Association/ Reinforcements, <https://discovercomposites.com/what-are-composites/materials/reinforcements/index.html>, 10.01.2024
- ASTM D790. 2017. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials
- ASTM D7078M-19. 2020. Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by V-Notched Rail Shear Method.
- Abdelal N.R. and Donaldson, S.L. 2018. Interlaminar fracture toughness and electromagnetic interference shielding of hybrid-stitched carbon fiber composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 37, no. 18, pp. 1131–1141.
- Aymerich, F., Priolo, P. and Sun, C.T. 2003. Static and fatigue behaviour of stitched graphite/epoxy composite laminates. *Compos Sci Technol*, vol. 63, no. 6, pp. 907–917.
- Drake, D.A., Sullivan, R.W., Lovejoy, A.E., Clay, S.B. and Jegley, D.C. 2021. Influence of stitching on the out-of-plane behavior of composite materials – A mechanistic review. *Journal of Composite Materials*, vol. 55, no. 23, pp. 3307–3321.
- Heidari-Rarani, M., Bashandeh-Khodaee-Naeini, K. and Mirkhalaf, S.M. 2018. Micromechanical modeling of the mechanical behavior of unidirectional composites – A comparative study. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 37, no. 16, pp. 1051–1071.
- Kang, T.J. and Lee, S.H. 1994. Effect of stitching on the mechanical and impact properties of woven laminate composite. *J Compos Mater*, vol. 28, no. 16, pp. 1574–1587.
- Kaya, G., Soutis, C. and Potluri, P. 2022. Flexural Behaviour of Unreinforced and Z-Fibre Reinforced 3D Carbon/Epoxy Composites. *Appl Comp Mater*, vol. 29, pp. 387-404.
- Kirmasha, Y.K., Sharba, M.J., Leman, Z. and Sultan, M.T.H. 2020. Mechanical performance of unstitched and silk fiber-stitched woven kenaf fiber-reinforced Epoxy composites. *Materials*, vol. 13, no. 21, pp. 1–16.
- Korkmaz, M. 2024. In and off- axes mechanical properties of three- dimensional textile reinforced carbon composites. *J Compos Mater*, vol. 58, no. 4, pp. 479-487.
- Korkmaz, M. 2023. Investigation of the bending and quasi-static indentation properties of three-dimensional (3D) textile-reinforced composites. *Polym Compos*, vol. 45, no. 2, pp. 1703-1714.
- Larsson, F. 1997. Damage tolerance of a stitched carbon/epoxy laminate. *Composite Part A*, vol. 28, no. A, pp. 923–934.
- Lascoup, B., Aboura, Z., Khellil, K. and Benzeggagh, M. 2010. Impact response of three-dimensional stitched sandwich composite. *Compos Struct*, vol. 92, no. 2, pp. 347–353.
- Li, H., Yu, Y., Xu, X., Chen, T. and Lu, W. 2021. Enhancing the fracture toughness of laminated composites through carbon nanotube belt stitching. *Comp Sci and Tech*, vol. 204, pp. 108632.
- Pingkarawat, K., Wang, C.H., Varley, R.J. and Mouritz, A.P. 2013. Effect of mendable polymer stitch density on the toughening and healing of delamination cracks in carbon-epoxy laminates,” *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 50, pp. 22–30.
- Reis, L.M.M., Ribeiro, M.L, Madureira, F. et al. 2024. An experimental investigation of the mechanical properties and failure mode of 3D stitched composites. *Jour of Mater Res and Tech*, vol. 29, pp. 90-100.
- Saboktakin, A., Kalaoglu, F., Shahrooz, M., Spitas, C. and Farahat, S. 2022. Failure analysis of 3D stitched composite using multi-scale approach for aerospace structures. *Journal of the Textile Institute*, vol. 113, no. 5, pp. 943–951.
- Shah Khan M.Z. and Mouritz, A.P. 1996. Fatigue Behavior of Stitched Grp Laminates, vol. 56, no. 6, pp. 695-701.
- Tarfaoui, M., Nachtane, M. and El Moumen, A. 2019. Energy dissipation of stitched and unstitched woven composite materials during dynamic compression test. *Composites Part B: Engineering*, vol. 167.
- Tan, K.T., Watanabe, N., Iwahori, Y. and Ishikawa, T. 2012. Understanding effectiveness of stitching in suppression of impact damage: An empirical delamination reduction trend for stitched composites. *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 43, no. 6, pp. 823–832.
- Tan, K.T., Yoshimura, A., Watanabe, N., Iwahori, Y. and Ishikawa, T. 2013. Effect of stitch density and stitch thread thickness on damage progression and failure characteristics of stitched composites under out-of-plane loading. *Compos Sci Technol*, vol. 74, pp. 194–204.
- Velicki, A. and Jegley, D. 2014. PRSEUS Structural Concept Development, in 52nd Aerospace Science Meeting, AIAA, Jan.
- WiseTex suite - Department of Materials Engineering, [Online]. Available: <https://www.mtm.kuleuven.be/english/research/scalint/cmg/software/wisetex/>, 10.01.2024.
- Xu, H., Zhang, L. and Cheng, L. 2015. The effect of Z-yarn density on the in-plane shear property of three-dimensional stitched carbon fiber reinforced silicon carbide composites. *Compos Sci Technol*, vol. 106, pp. 120–126.
- Yalkin, H.E., Icten, B.M. and Alpyildiz, T. 2015. Enhanced mechanical performance of foam core sandwich composites with through the thickness reinforced core. *Compos B Eng*, vol. 79, pp. 383–391.