

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ



The Design and Technology Journal, which is part of the Gazi University Journal of Sciences family as Part C, aims to deliver the most up-to-date scientific and technological developments in engineering sciences to researchers, engineers and interested audiences. Our journal, which includes both experimental and theoretical studies in basic engineering fields, gives priority to the publication of articles related to the rapidly developing fields of engineering.

First published in 2013



2022, Volume 10, Issue 2 Content

1. Effect of Nitriding Process on Wear Behavior of Dual Phase (Ferrite+Martensite) Ductile Cast Iron (Araştırma Makalesi), Volkan KILIÇLI, Elif ERDOĞAN, Şeval Meliha TOY, Sevilay KESKİN, Ömer ŞAHİN, Ahmet UYAR, Page: 164-176
2. Battery Energy Storage System Sizing, Lifetime and Techno-Economic Evaluation for Primary Frequency Control: A Data-driven Case Study for Turkey (Araştırma Makalesi), Ümit ÇETİNKAYA, Ramazan BAYINDIR, Ezgi AVCI, Samet AYIK, Page: 177-194
3. Enhancement of impact toughness properties of Al 7075 alloy via double aging heat treatment (Araştırma Makalesi), Onur ALTUNTAŞ, Page: 195-202
4. LoRa Modulation based Soccer Pitch Lighting System Application (Araştırma Makalesi), Hidayet OĞRAŞ, Emre ERKAN, Şehmus FİDAN, Page: 203-215
5. An EBSD Study on Crystallization of CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ (CMAS) Glass (Araştırma Makalesi), Sinem BAŞKUT, Emrah DÖLEKÇEKİÇ, Gökтуğ GÜNKAYA, Taner KAVAS, Page: 216-229
6. Experimental Determination of the Engine Vibration and Mechanical Noise Depending on Vehicle Speed (Araştırma Makalesi), Tolga TOPGÜL, Çağatay ZAMAN, Suat SARIDEMİR, Page: 230-241
7. Depthwise Separable Convolution Based Residual Network Architecture for Hyperspectral Image Classification (Araştırma Makalesi), Hüseyin FIRAT, Mehmet Emin ASKER Akan, Davut HANBAY, Page: 242-258
8. Investigation of The Effect of Different Layouts of Reinforced Shear Walls On Building Behavior (Araştırma Makalesi), Elif BORU, Page: 259-272
9. The Effect of Sintering Number on Crystallographic and Microhardness Properties of MgB₂ Samples Obtained by Mixing Ready MgB₂ Powders and Mg and B Powders (Araştırma Makalesi), Naki KAYA, Serap SAFRAN, Page: 273-285
10. Generative Adversarial Network for Generating Synthetic Infrared Image from Visible Image (Araştırma Makalesi), Utku ULUSOY, Koray YILMAZ, Gülay ÖZŞAHİN, Page: 286-299
11. Investigation of Mechanical Behavior of Pre-Heat Treated Wooden Beams in Different Climate Conditions (Araştırma Makalesi), Mehmet GÜNEŞ, Mustafa ALTUNOK, Page: 300-313
12. Analysis of the Efficiency of the Information Security Policies of Public Institutions in terms of Ensuring Corporate Information Security (Araştırma Makalesi), Samime MERAL, Halil İbrahim BÜLBÜL, Page: 314-329
13. An Overview of Classification of Electrooculography (EOG) Signals by Machine Learning Methods (Derleme Makalesi), Alihan SUIÇMEZ, Cengiz TEPE, Mehmet Serhat ODABAŞ, Page: 330-338
14. Design and Analysis of Novel Ring UWB Antenna, Kayhan ÇELİK, Page: 339-347
15. Polimerik Yara Örtülerinde 3B Baskı Teknolojisi Uygulamaları (Araştırma Makalesi), Ayşe DEMİRAL, Faruk MERT, Page: 348-359
16. Irrigation in Agriculture and Automation Based Irrigation Systems (Mini-Derleme makalesi), Mustafa ARIK, İhsan KORKUT, Page: 360-367
17. Seçici Lazer Ergitme (SLM) Yöntemi ile Üretilen AlSi10Mg Alaşımli Parçalarda Kusurlar, Mekanik Özellikler ve Yüzey Pürüzlülüğü- Bir Araştırma (Derleme Makalesi), Yusuf SİYAMBAŞ, Yakup TURGUT, Page: 368-390

Editor in Chief

Prof. Dr. Ahmet GÜRAL, Gazi University

Assistant Editors

Hanifi ÇİNİCİ, Gazi University

Orhan KAPLAN, Gazi University

Editorial Assistance

Çağrı SUIÇMEZ, Gazi University

Ahmet ERDAĞ, Gazi University

Onur POLAT, Gazi University

Field Editors

Barış AVAR, Zonguldak, Bülent Ecevit University

Sertaç BAYHAN, Qatar Environment and Energy Research Institute

Ramazan CAKIROGLU, Gazi University

Kazım YILDIZ, Marmara University

Alpay ÖZER, Gazi University

İsmail ÖZTÜRK, Pamukkale University

Saadin OYUCU, Adıyaman University

İlyas ÇANKAYA, Ankara Yıldırım Beyazıt University

Barış AVAR, Zonguldak, Bülent Ecevit University


Ozer SEVİM, Kırıkkale University

Cemal KOÇAK, Gazi University

Mehmet BUDAKÇI, Düzce University

Fehim KÖYLÜ, Erciyes University

Effect of Nitriding Process on Wear Behavior of Dual Phase (Ferrite+Martensite) Ductile Cast Iron

Elif ERDOĞAN¹ , Şeval Meliha TOY¹ , Sevilay KESKİN¹ , Ömer ŞAHİN¹ , Ahmet UYAR² , Volkan KILIÇLI^{1,*} 

¹ Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 06560, Yenimahalle/ANKARA

² Hacettepe Üniversitesi, Başkent OSB Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 06909, Malıköy, Sincan ANKARA

Graphical/Tabular Abstract

Article Info

Research article
Received: 15/02/2022
Revision: 01/04/2022
Accepted: 05/04/2022

Keywords

Dual-phase ductile cast iron
Ferrite+martensitic structure
Nitriding
Wear behavior

Anahtar Kelimeler

Çift fazlı küresel grafitli dökme demir
Ferrit+martensitik yapı
Nitrüleme
Aşınma davranışı

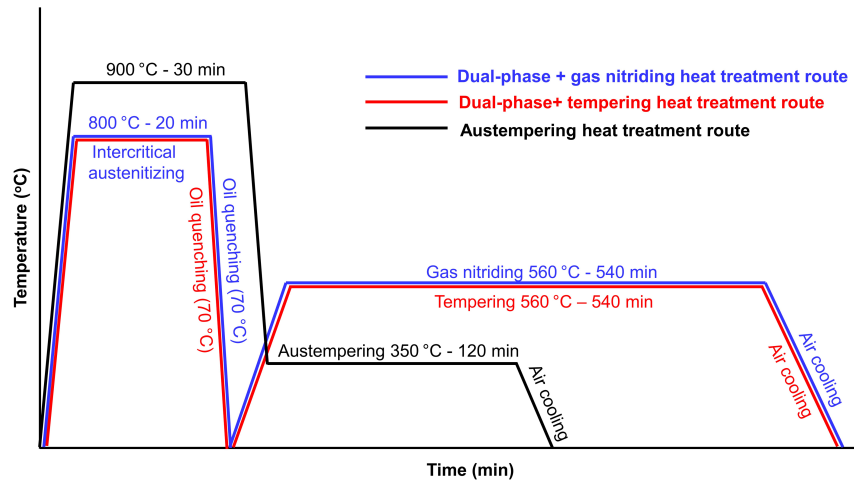


Figure. Schematic representation of the heat treatment routes to produce surface nitrided dual phase ductile cast iron (blue line)

Purpose: In this study, it was aimed to improve the surface hardness by applying gas nitriding treatment to dual-phase ductile cast iron and to produce ductile cast irons with a good strength-ductility combination. Thus, it has been tried to develop a ductile cast iron with high wear resistance, strength, and ductility.

Theory and Methods: Ductile cast iron specimens with a dual-phase microstructure consisting of ferrite + martensite were produced by oil quenching at 70 °C after intercritical austenitizing at 800 °C in the ferrite + austenite zone. Instead of the tempering process, nitriding treatment was applied to the dual-phase ductile cast iron specimens at 560 °C for 540 minutes. Optical microscope and XRD analysis were performed for microstructural characterization of nitrided dual-phase ductile cast iron specimens. The wear properties were tested with a tribometer.

Results: In ductile cast iron, microstructures consist of a hard nitride layer (10 µm white layer) on the surface and a ferrite + tempered martensite (43% martensite volume fraction) structure in the center can be produced by oil quenching from intercritical austenitizing and nitriding treatment. Surface hardness of 510 HV in nitrided dual-phase ductile cast iron, 193 HV in dual-phase ductile cast iron, and 353 HV in austempered KGDD were obtained. The lowest weight loss and coefficient of friction were obtained in nitrided dual-phase ductile cast iron. The highest weight loss and friction coefficient values with wear were obtained in dual-phase ductile cast iron.

Conclusion: It can be concluded that the wear resistance of nitrided dual-phase ductile cast iron is 2 times higher than that of dual-phase ductile cast iron and austempered ductile cast iron.



Effect of Nitriding Process on Wear Behavior of Dual Phase (Ferrite+Martensite) Ductile Cast Iron

Elif ERDOĞAN¹, Şeval Meliha TOY¹, Sevilay KESKİN¹, Ömer ŞAHİN¹, Ahmet UYAR², Volkan KILIÇLI^{1,*}

¹ Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 06560, Yenimahalle/ANKARA

² Hacettepe Üniversitesi, Başkent OSB Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 06909, Malıköy, Sincan ANKARA

Article Info

Research article
Received: 22/02/2021
Revision: 14/04/2021
Accepted: 20/04/2021

Keywords

Dual-phase ductile cast iron
Ferrite+martensitic structure
Nitriding
Wear behavior

Anahtar Kelimeler

Çift fazlı küresel grafitli dökme demir
Ferrit+martensitik yapı
Nitrüleme
Aşınma davranışı

Abstract

In this study, it was aimed to improve the surface hardness by applying gas nitriding treatment to dual-phase ductile cast iron and to produce ductile cast irons with a good strength-ductility combination. Thus, it has been tried to develop a ductile cast iron with high wear resistance, strength, and ductility. Ductile cast iron specimens with a dual-phase microstructure consisting of ferrite + martensite were produced by oil quenching at 70 °C after intercritical austenitizing at 800 °C in the ferrite + austenite zone. Instead of the tempering process, nitriding treatment was applied to the dual-phase ductile cast iron specimens at 560 °C for 540 minutes. The tempering process required to be applied to the martensitic structure was also performed by the nitriding process and a hard 10 µm thick nitride layer was obtained on the surface. Optical microscope and XRD analysis were performed for microstructural characterization of nitrided dual-phase ductile cast iron specimens. The wear properties were tested with a tribometer. For comparison reasons, microstructural characterization and wear tests were also performed on non-nitrided dual-phase ductile cast iron. In ductile cast iron, microstructures consist of a hard nitride layer (10 µm white layer) on the surface and a ferrite + tempered martensite (43% martensite volume fraction) structure in the center can be produced by oil quenching from intercritical austenitizing and nitriding treatment. Surface hardness of 510 HV in nitrided dual-phase ductile cast iron, 193 HV in dual-phase ductile cast iron, and 353 HV in austempered KGDD were obtained. The lowest weight loss and coefficient of friction were obtained in nitrided dual-phase ductile cast iron. The highest weight loss and friction coefficient values with wear were obtained in dual-phase ductile cast iron. The wear resistance of nitrided dual-phase ductile cast iron is 2 times higher than that of dual-phase ductile cast iron and austempered ductile cast iron.

Nitrüleme İşleminin Çift Fazlı (Ferrit+Martensit) Küresel Grafitli Dökme Demirin Aşınma Davranışı Üzerine Etkisi

Öz

Bu çalışmada, çift fazlı KGDD'lere gaz nitrüleme işlemi uygulanarak yüzey sertliği geliştirilip iyi dayanım ve süneklik kombinasyonuna sahip bir KGDD üretilmesi hedeflenmiştir. Böylece aşınma direnci, dayanım ve sünekliği yüksek bir KGDD geliştirilmeye çalışılmıştır. KGDD'den işlenmiş disk şeklindeki numuneler, ferrit+östenit bölgesinde 800 °C'de arakritik östenitleme sonrası 70 °C'deki yağda hızlı soğutulmuş ferrit+martensitten oluşan çift fazlı mikroyapıya sahip KGDD numuneler üretilmiştir. Temperleme işlemi yerine çift fazlı KGDD numunelere 560 °C'de 540 dk nitrüleme işlemi uygulanmıştır. Nitrüleme işlemiyle martensitik yapıya uygulanması gereken temperleme işlemi de yapılmış ve yüzeyde sert 10 µm kalınlığında nitrür tabakası elde edilmiştir. Nitrürlenmiş çift fazlı KGDD numunelere mikroyapı karakterizasyonu için optik mikroskop ve XRD analizi yapılmıştır. Aşınma özellikleri tribometre ile test edilmiştir. Karşılaştırma amacıyla nitrülenmemiş çift fazlı KGDD'lere mikroyapı karakterizasyon işlemleri ve aşınma deneyi yapılmıştır. KGDD'de arakritik östenitleme sonrası su verme ve nitrüleme işlemiyle yüzeyde sert nitrür tabakası (10 µm beyaz tabaka) ve merkezde ferrit + temperlenmiş martensitik (%43 martensit hacim oranı) yapıdan oluşan mikroyapılar üretilmektedir. Nitrülenmiş çift fazlı KGDD'de 510 HV, çift fazlı KGDD'de 193 HV ve östemperlenmiş KGDD'de 353 HV yüzey sertlik değerleri elde edilmiştir. En düşük kütle kaybı ve sürtünme katsayısı değeri nitrülenmiş çift fazlı KGDD'de elde edilmiştir. En yüksek aşınmayla ağırlık kaybı ve sürtünme katsayısı değeri çift fazlı KGDD'de elde edilmiştir. Nitrülenmiş çift fazlı KGDD'in aşınma direnci çift fazlı KGDD ve östemperlenmiş KGDD'in aşınma direncinden 2 kat fazladır.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Küresel grafitli dökme demirlere (KGDD) arakritik östenitleme ve yağda soğutma ısıl işlemi yapılarak çift fazlı (ferrit+martensit) KGDD üretilebilmektedir [1-9]. Ötektoid öncesi ferrit + martensit mikroyapısına sahip çift fazlı KGDD, Fe-C-Si faz diyagramında Ac_1 ve üst kritik sıcaklık arasında kalan $\gamma+\alpha+G$ bölgesinde kısmi östenitleme ardından hızlı soğutulmuş, bu bölgede oluşan östenitin martensite dönüşümünün sağlanması ile elde edilmektedirler. Çift fazlı KGDD'ler geleneksel östemperlenmiş KGDD'lere göre daha fazla toplam % uzama ve kırılma tokluğu sergilemektedir [8, 9].

Nitrürleme, dökme demirler ve çeliklerin aşınma direncini ve yorulma dayanımını arttırmak için yapılan bir yüzey sertleştirme ısıl işlemidir [10]. Günümüzde dişli ve valf gibi bazı dökme demir parçalar aşınma ve korozyon direncini arttırmak için nitrürlenmektedir [11]. Ancak nitrürleme işlemleri 480-550 °C'lerde 3 ila 12 saat arasında azot gazı kullanılarak yapılmaktadır. Bu işlem sıcaklık ve süreleri östemperlenmiş KGDD'nin matris mikroyapısı olan ösferritik yapının bozunmasına neden olmakta ve mekanik özelliklerde düşüşe neden olmaktadır. Bu yüzden östemperlenmiş KGDD'lerin nitrülenmesiyle ilgili sınırlı sayıda araştırma bulunmaktadır [10-12].

Priestner ve Korichi [10] KGDD'lere uygulanan değişen östemperleme parametrelerinin plazma nitrürleme ısıl işlemine etkilerini araştırmışlardır. Yüksek sıcaklıkta östemperlemeyle ösferritik mikroyapı elde etmişlerdir. Araştırmacılar farklı östemperlenmiş mikroyapıların nitrürleme sıcaklığına ısıtıldığında temperleme etkisi nedeniyle ösferritik yapının bozunduğunu ve matris mikroyapısını ferrit+sementite dönüştüğünü bildirmektedir [10]. Priestner [11], 900 °C'de 1 saat östemperlenmiş KGDD'lere plazma nitrürleme işlemi uygulamıştır. Plazma nitrürlenmiş ve plazma nitrülenmeyen östemperlenmiş KGDD'lerin çekme dayanımı, süneklik ve sertlik değişimlerini kıyaslamıştır. Priestner çalışmasında iyi süneklik sağlayan östemperlenmiş KGDD'in nitrürlenmeye iyi yanıt vermediği sonucuna varmıştır [11]. Korichi'nin [12] çalışmasında elde ettiği verilere göre mekanik özellikleri geliştirmek için Östemperlenmiş KGDD'e yapılan nitrürleme işleminin mekanik özellikleri kötüleştirdiği sonucuna varılmıştır. Araştırmacılar mekanik özelliklerdeki düşüşü 500 °C'de 12 saat yapılan nitrürleme sırasında matris mikroyapısının bozunmasına bağlamaktadırlar. Nitrürleme işlemi esnasında ösferritik yapı bozunarak ferrit+karbür (Fe₃C) dönüşmektedir. Bunun sonucunda çekme dayanımı ve toplam uzama önemli ölçüde azalmaktadır [12].

Yukarıda anlatılan önceki araştırmalardan anlaşılacağı üzere, östemperlenmiş KGDD'lere üstün mekanik özellikler kazandıran ösferritik matris mikroyapısı nitrürleme işlemi esnasında bozunduğu için östemperlenmiş KGDD'lere nitrürleme işlemi uygulanması mekanik özellik değerlerinin azalmasına neden olmaktadır. Bunun yerine ferrit+martensit matris mikroyapısına sahip çift fazlı KGDD'lere nitrürleme işlemiyle yüzeyde sert bir tabaka oluşturularak aşınma özellikleri geliştirilebileceği düşünülmüştür.

Çift fazlı KGDD'ler mekanik özellikleriyle östemperlenmiş KGDD'lere alternatif bir dökme demir grubudur [1-9]. Çift fazlı KGDD'ler elde edilen en yüksek yüzey sertliği 241 HB olup östemperlenmiş KGDD'lere göre oldukça düşüktür [8, 9]. Bu çalışmada tasarlanan ısıl işlem prosesiyle çift fazlı KGDD'lere uygulanacak nitrürleme ısıl işlemiyle yüzeyde sert bir tabaka elde edilirken aynı zamanda temperleme işlemi gerçekleştirilmiş olacaktır. Böylelikle yeni uygulanacak bu ısıl işlemle aynı süre içerisinde hem yüzey sertleştirme hem de temperleme ısıl işlemi gerçekleştirilmiş olacaktır. Yüzeyde sert ve aşınmaya dirençli bir tabaka elde etmek için nitrürleme ısıl işlemi ile çift fazlı (ferrit+martensit) yapının üstün mekanik özellikleri bir araya getirilecektir. Şimdiye kadar çift fazlı KGDD'lerde nitrürlenmeyle yüzey sertleştirmenin mikroyapı ve aşınma direnci üzerine etkisiyle ilgili herhangi bir araştırmaya rastlanmamıştır.

Bu çalışmada, gaz nitrürlenmeyle yüzey sertleştirme işleminin çift fazlı KGDD'lerin mikroyapısal özellikleri ve aşınma direnci üzerine etkisi araştırılmıştır. Çift fazlı KGDD'e gaz nitrürleme ısıl işlemi uygulanarak mikroyapı, sertlik ve aşınma özellikleri incelenmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

2.1. Malzeme (Material)

Deneyisel çalışmalarda Çizelge 2.1’de kimyasal kompozisyonu verilen EN GJS-450-10 sınıf ferritik+perlitik KGDD kullanılmıştır. KGDD malzeme sürekli dökümle üretilmiş olup, 63 mm çapında ve 1 metre boyunda silindirik halde Arya Metal Ltd. Şti. firmasından temin edilmiştir. EN GJS-450-10 sınıf ferritik+perlitik KGDD’in mikroyapısal ve mekanik özellikleri sırasıyla Çizelge 2.2 ve Çizelge 2.3’te verilmiştir.

Çizelge 2.1. Deneyisel çalışmalarda kullanılan KGDD’in kimyasal bileşimi (% ağırlıkça)

C	Si	Mn	P	S	Mg	Cr
3,685	2,493	0,305	0,025	0,012	0,045	0,021
Ni	Cu	Al	Ti	V	Co	Fe
0,015	0,524	0,005	0,012	0,005	0,018	Kalan

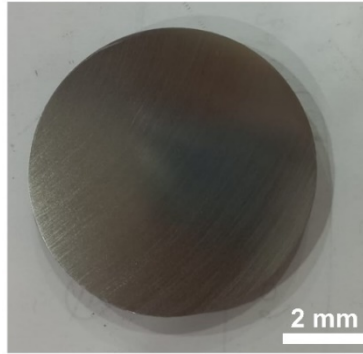
Çizelge 2.2. EN GJS-450-10 sınıf KGDD’in mikroyapısal özellikleri

Ferrit Miktarı (%)	Perlit Miktarı (%)	Nodularite (%)
61	39	95

Çizelge 2.3. EN GJS-450-10 sınıf KGDD’in mekanik özellikleri

Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Toplam Uzama (%)	Sertlik (HB)
363	565	16,3	174-197 Kenar 179-197 Merkez

Aşınma diski üretmek amacıyla talaşlı imalat ile 10 mm kalınlığında diskler kesilmiştir (Şekil 2.1).



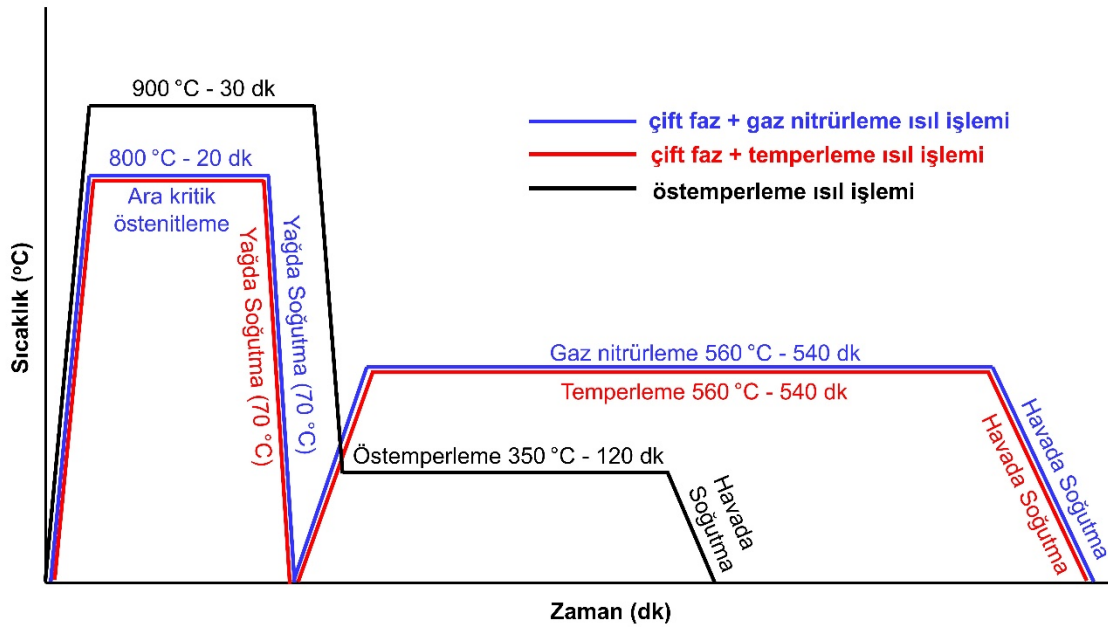
Şekil 2.1. Isıl işlem öncesi tornayla kesilmiş 10 mm kalınlığında aşınma deneyi için hazırlanan disk numune

2.2. Isıl İşlemler (Heat Treatments)

Numunelere uygulanan ısıl işlemler iki aşamada ele alınmıştır. Bunlar; çift faz ısıl işlemi ve gaz nitrüleme ısıl işlemidir. Arakritik östenitleme işlemlerinde kullanılan fırın Nevola marka olup elektrik direnci ile çalışan, maksimum 1250 °C’ye kadar tavlamanın yapılabildiği atmosfer kontrollü bir fırındır. Arakritik östenitleme işlemleri 800 °C’de 20 dakika östenitleme sonrası 70°C’deki yağ banyosunda hızla soğutulmuştur. KGDD’lerde 780-830 °C östenitleme sıcaklığı kısmi östenitleme sıcaklığı olarak bilinmektedir [2-7]. Bu çalışmada ferrit+martensit yapı üretmek için 800°C arakritik östenitleme sıcaklığı seçilmiştir. Daha sonra gaz nitrüleme işlemleri için Döksan Isıl İşlem A.Ş’de bulunan KGO marka nitrüleme fırınında 560°C’de 540 dk saat gaz nitrüleme işlemi yapılmıştır. Nitrüleme işlemleri N₂ gazından ve amonyaktan oluşan bir atmosferde 560°C’de 540 dk dakika süreyle gerçekleştirilmiştir.

Aşınma özelliklerini karşılaştırma amacıyla çift fazlı numuneler, gaz nitrürleme yapılmaksızın 560°C’de 540 dk saat temperleme ısıl işlemi yapılmıştır. Ayrıca östemperleme ısıl işlemi uygulanarak aşınma özellikleri karşılaştırılmıştır. Östemperleme ısıl işlemi, 900 °C’de 30 dk östenitleme sonrası 350 °C’deki KNO₃ +NaNO₃ karışımından oluşan tuz banyosunda 120 dk izotermal bekleme yapılmak suretiyle gerçekleştirilmiştir. Östemperleme sıcaklığı ve süresi olarak en iyi mekanik özelliklerin elde edildiği 350 °C’de 120 dk olarak seçilmiştir [13]. Atmosfer kontrolsüz ısıl işlem nedeniyle numunelerin yüzeyinde oluşan 100 µm dekarbürizasyon tabakası aşınma disklerinin yüzeyi taşlanarak uzaklaştırılmıştır.

KGDD aşınma diski numunelerine uygulanan çift faz ısıl işlemi + gaz nitrürleme ısıl işlemi mavi çizgiyle, çift faz ısıl işlemi + temperleme ısıl işlemi kırmızı çizgiyle ve östemperleme ısıl işlemi siyah çizgiyle şematik olarak zaman sıcaklık diyagramında Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. KGDD aşınma diski numunelere uygulanan ısıl işlemlerin zaman –sıcaklık diyagramında şematik olarak gösterimi

2.3. Mikroyapı Karakterizasyon Çalışmaları (Microstructural Characterization Studies)

2.3.1 Metalografik hazırlık (Metallographic preparation)

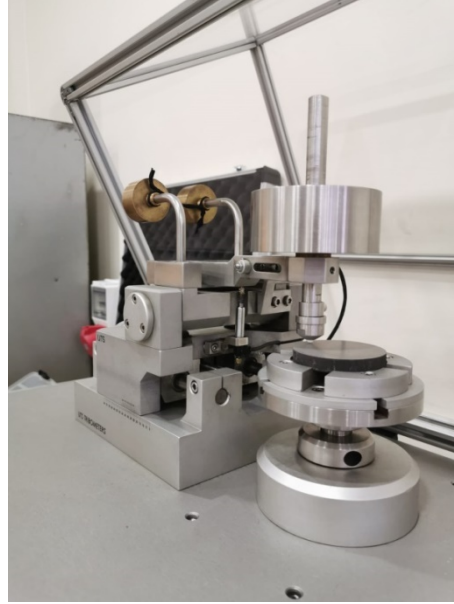
Numuneler standart metalografik yöntemlerle (zımparalama+polisaj) mikroyapı incelemesi için hazırlanmıştır. Zımparalama sırasıyla 240, 400, 800 ve 1200 kum zımparalar kullanılarak yapılmıştır. Parlatmalar sırasıyla 9 µm, 3 µm ve 1 µm elmas süspansiyonlar kullanılarak yapılmıştır. Mikroyapıların açığa çıkarılması için dağlayıcı olarak %2 Nital (2 ml HNO₃ + 98 ml CH₃OH) çözeltisi kullanılmıştır. Metalografik hazırlığı yapılmış numunelerin mikroyapıları Leica DFC 360 dijital kamera bağlantılı Leica DMI5000M optik mikroskop kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

2.3.2. XRD analizi (XRD analysis)

XRD desenleri Bruker D8 Advance XRD cihazı kullanılarak elde edilmiştir. Numuneler 2θ 40-100° aralığında 0,05°/s tarama hızında taranmıştır.

2.4. Aşınma Deneyi (*Wear test*)

Aşınma deneyleri ASTM G99-17 standardına [14] uygun olarak UTS 10/20 model tribometre cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.4.). Aşınma deneylerinde disk numune 318 devir/dak hızla döndürülerek toplam 500 m mesafe boyunca hareket ettirilmiştir (Çizelge 2.4). Aşındırıcı olarak Ø6 mm Al₂O₃ bilya 20 N yük uygulanarak disk numune üzerinde sabit tutulmuştur.



Şekil 3.4. Aşınma deneylerinde kullanılan UTS10/20 model tribometre

Çizelge 2.4. Disk üzeri bilya (pin-on-disk) aşınma deney parametreleri

Aşındırıcı malzeme	Ø 6 mm çapında Al ₂ O ₃ seramik bilya
Numune boyutları	Ø 63 mm çapında 10 mm kalınlığında KGDD disk
Yük	20 N
Kayma koşulları	Kuru
Kayma mesafesi	500 m
Kayma çapı	40 mm
Kayma hızı	0,80 m/s
Dönme hızı	318 dev/dak
Ortam Sıcaklığı	22 °C
Ortam Bağıl Nem	%40

Aşınma deneyleri sonrası numunelerin aşınma hızı Eşitlik 2.1'de verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır [15].

$$W (mg/N.m) = \frac{M (mg)}{F (N) \cdot D(m)} \quad (2.1.)$$

Burada; W, aşınma hızı (mg/Nm), M; kütle kaybı (mg), F; yük (N), D; toplam kayma mesafesi (m) olarak verilmiştir.

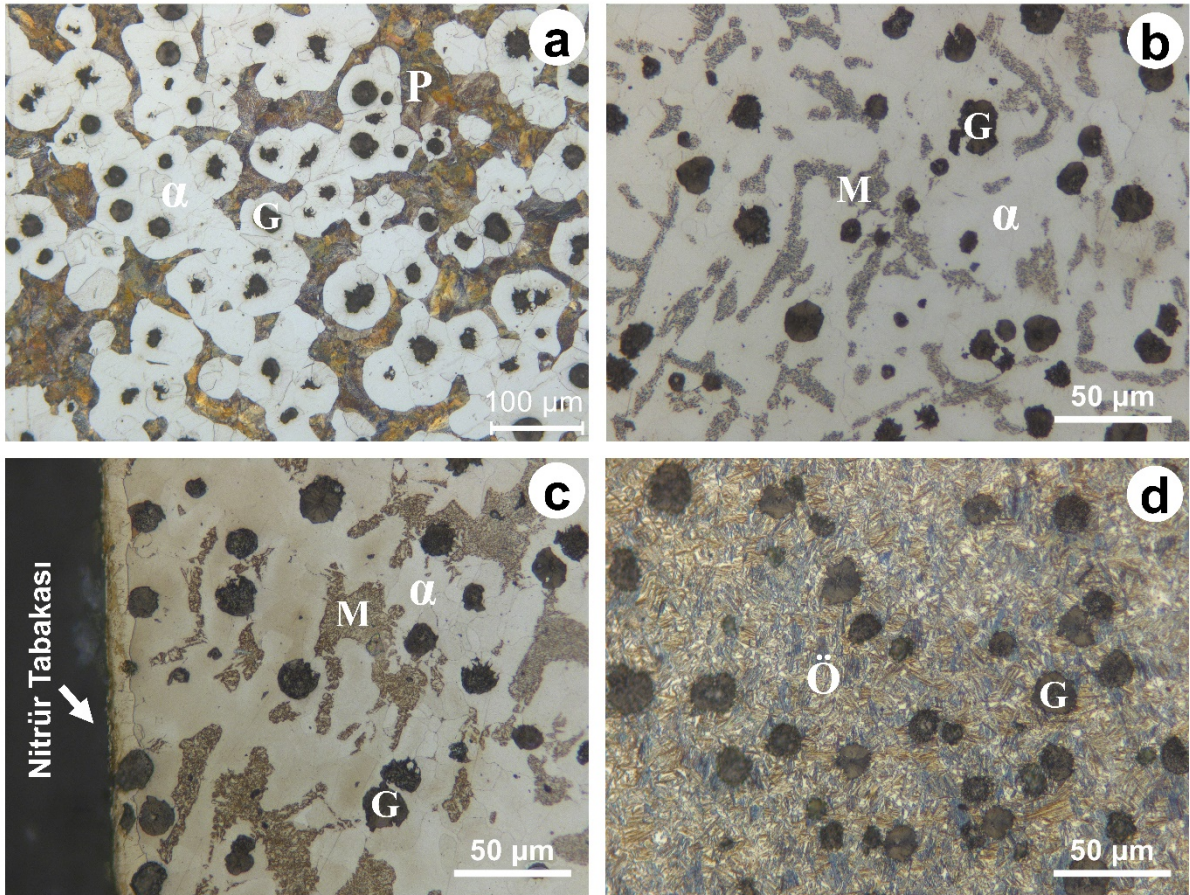
2.5. Sertlik Deneyi (Hardness Test)

Sertlik testleri, Vickers sertlik yöntemi ile Qness 30M model sertlik test cihazı kullanılarak yapılmıştır. Yüzeysel sertliğinin belirlenmesinde 3 kgf yükte Vickers (HV) sertlik yöntemi kullanılmıştır. Numunelerin yüzeysel sertliğinin belirlenmesi için 5 farklı bölgeden sertlik ölçümleri yapıldı ve ortalama değerler sunuldu. Nitrürlenmiş çift fazlı KGDD numunenin sertlik profili için 0,3 kgf yükte Vickers (HV) yöntemi kullanılmıştır. Yüzeysel 100 µm aralıklarla sertlik ölçümleri yapılmıştır. Nitrürlenmiş tabaka derinliği (Nht) matris sertliğine +50 HV ilave edilerek yüzeysel 100 µm aralıklarla bu sertlik değerine karşılık gelen mesafe olarak belirlenmiştir [16].

3. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSIONS)

3.1. Mikroyapılar (Microstructures)

Numunelerin optik mikroyapıları Şekil 3.1’de verilmiştir. Dökülmüş koşullardaki KGDD’in ferrit+perlitik yapıdan oluştuğu gözlenmiştir (Şekil 3.1.a). Ara kritik östenitleme sıcaklıklarından su verilmiş küresel grafitli dökme demir mikroyapısında ferrit + martensitten oluşan çift fazlı matris mikroyapısı gözlenmiştir (Şekil 3.1.b). Nitrürlenme sonrası yüzeysel yaklaşık 10 µm kalınlığında beyaz nitrür tabakası gözlenmiştir. Nitrürlenme esnasında 560 °C’de 540 dk bekleme sonucu martensitik yapının bozunduğu tespit edilmiştir (Şekil 3.1.c). Östemperlenmiş KGDD’in mikroyapısında ise tamamen ösferritik ($\alpha_b + \gamma_{yk}$) yapıdan oluştuğu gözlenmiştir (Şekil 3.1.d).

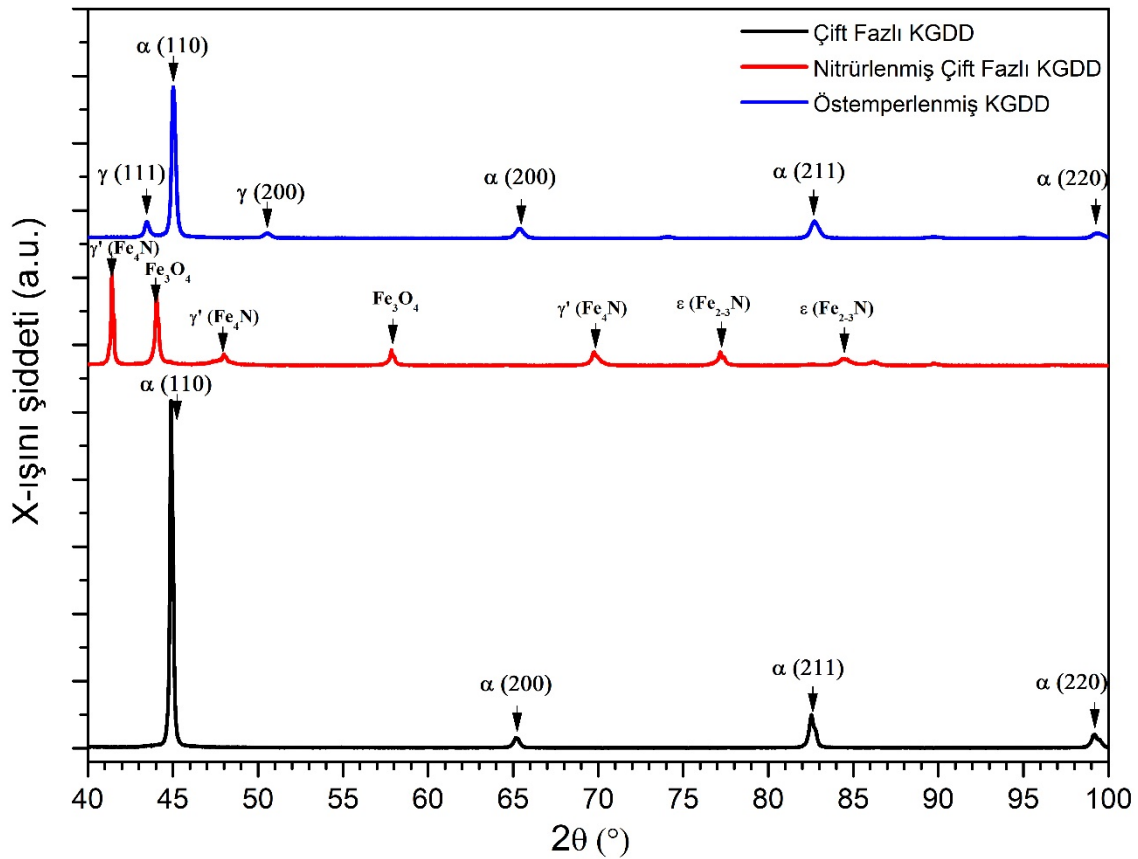


Şekil 3.1. Numunelerin optik mikroyapıları; a) dökülmüş halde, b) Çift fazlı KGDD, c) nitrürlenmiş çift fazlı KGDD ve d) östemperlenmiş KGDD (α : ötektoid öncesi ferrit, G: grafit, Ö: ösferrit ve M: temperlenmiş martensit,)

3.2. XRD Analizi Sonuçları (XRD Analysis Results)

Numunelerin X ışınları kırınım (XRD) desen analizleri Şekil 3.2’de verilmiştir. Çift fazlı KGDD’in XRD deseninin ferrit pikleri varlığı gözlenmiştir. Östemperlenmiş KGDD’in XRD deseninde ise kalıntı östenit (yüksek karbonlu östenit) ve ferrit piklerinin varlığı gözlenmiştir. Bu pikler östemperlenmiş KGDD’lerin mikroyapısını oluşturan ösferritik ($\alpha_b + \gamma_{yk}$) yapı ile uyumludur. Araştırmacılar [13, 17-19] östemperlenmiş KGDD’in mikroyapısında elde edilen kalıntı östenitin karbonca zengin olduğunu ve bu yüksek karbonlu östenitin mekanik özellikler ve aşınma direnci üzerinde çok önemli etkiye sahip olduğu bildirilmektedir. Ayrıca kalıntı östenitin içerdiği karbon miktarı, dayanım ve aşınma direncini de doğrudan etkilemektedir [7, 20]. Araştırmacılar östemperlenmiş KGDD’lerde 90-150 dakikalık östemperleme sürelerinde en yüksek kalıntı östenit hacim oranı ve karbon içeriği elde edildiğini bildirmektedir [13].

Nitrürlenmiş çift fazlı KGDD’in nitrürlenmiş yüzeyinden elde edilen XRD deseninde ise γ (Fe_4N) ve ϵ ($Fe_{2-3}N$) nitrür piklerinin varlığı belirgin bir şekilde gözlenmiştir. Bu çalışmada elde edilen XRD desenlerinin önceki yapılan araştırmalarla uyumlu olduğu tespit edilmiştir [1, 12, 13].



Şekil 3.2. Çift fazlı KGDD, nitrürlenmiş çift fazlı KGDD ve östemperlenmiş KGDD numunelerinin XRD analiz desenleri

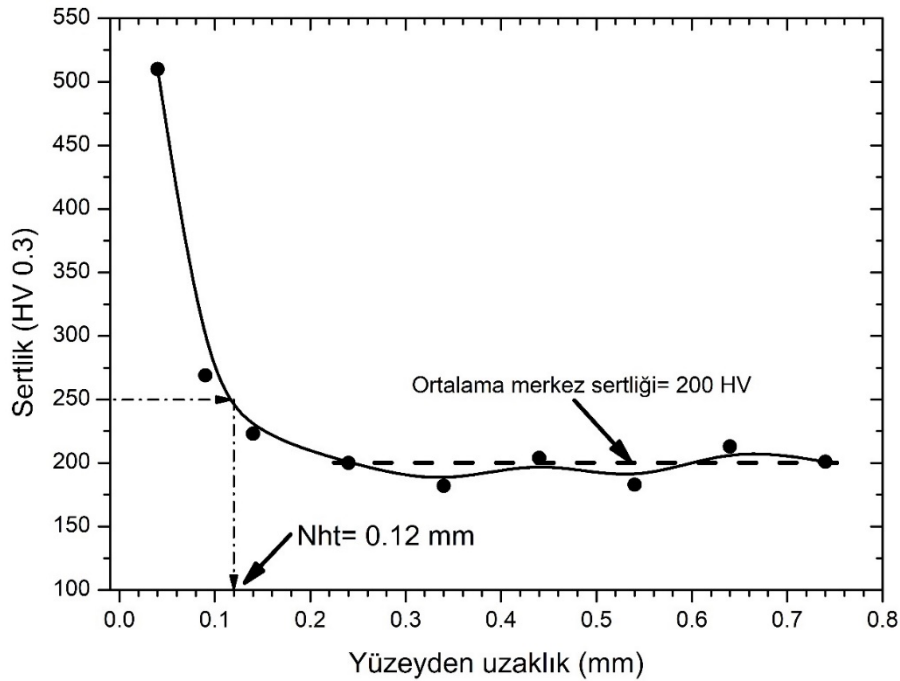
3.3. Sertlik Sonuçları (Hardness Results)

Numunelerin yüzey sertlik değerleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Çizelgeden görülebileceği üzere en yüksek sertlik değeri nitrürlenmiş çift fazlı KGDD’de (510 HV) ve en düşük sertlik değeri çift fazlı KGDD’de (193 HV) elde edilmiştir. Çift fazlı KGDD’in düşük yüzey sertliği nitrürlenme işleminde 560 °C’deki uzun süreli ısıl işlemin neden olduğu temperleme etkisinden dolayı meydana gelmiştir. Östemperlenmiş KGDD’de elde edilen 353 HV sertlik önceki araştırmalarla uyumludur [17-19].

Çizelge 3.1. Numunelerin yüzey sertlik değerleri

Numune adı	Sertlik (HV3)
Çift fazlı KGDD	193 ± 2,9
Nitrürlenmiş çift fazlı KGDD	510 ± 23,9
Östemperlenmiş KGDD	353 ± 12,3

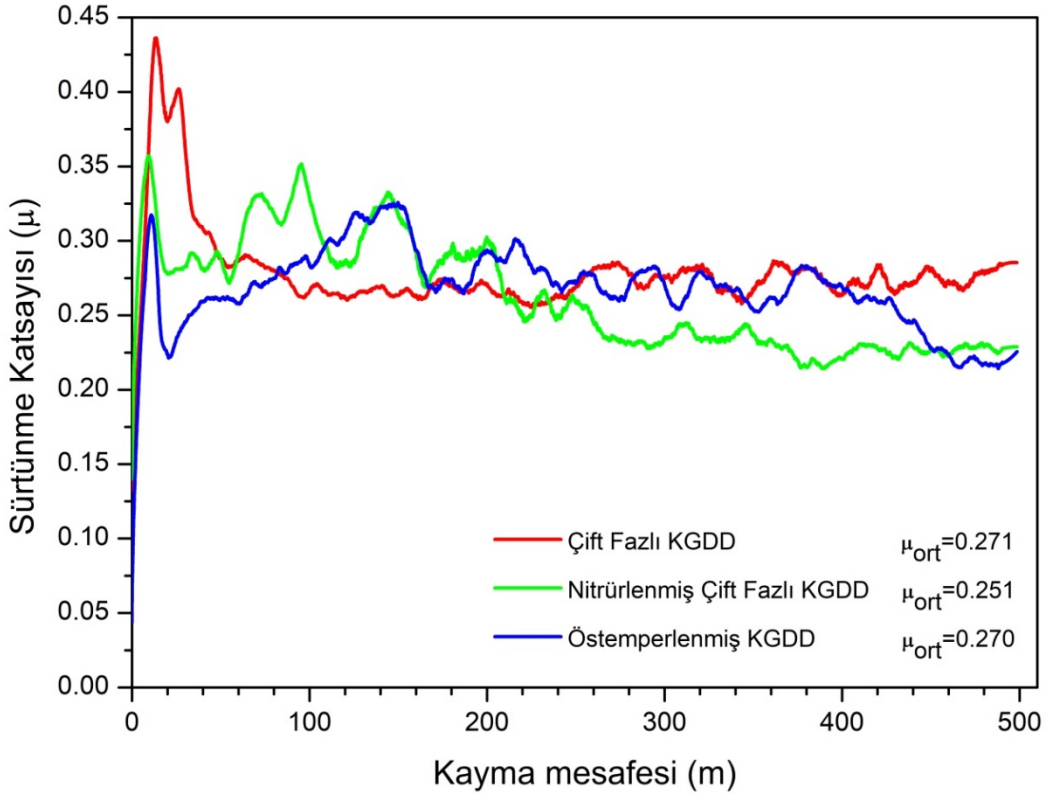
Nitrürlenmiş çift fazlı KGDD'in yüzeyden merkeze doğru sertlik profili Şekil 3.3'de verilmiştir. Şekilden görülebileceği üzere nitrürlenmiş tabaka derinliği (Nht) 0,12 mm olarak belirlenmiştir. Merkez bölgesinin ortalama sertliği 200 HV olarak tespit edilmiştir. Priestner [11] östemperlenmiş KGDD'in nitrürlenmesi sonucu matris sertliğinin 350 HV'ye kadar azaldığını bildirmektedir. Bu çalışmada daha düşük matris sertliği elde edilmesi çift fazlı KGDD'in mikroyapısında sünek ve yumuşak ötektoid öncesi ferritin varlığına atfedilmiştir [17-21].



Şekil 3.3. Nitrürlenmiş çift fazlı KGDD numunenin sertlik profili

3.4. Aşınma Deneyi Sonuçları (Wear Test Results)

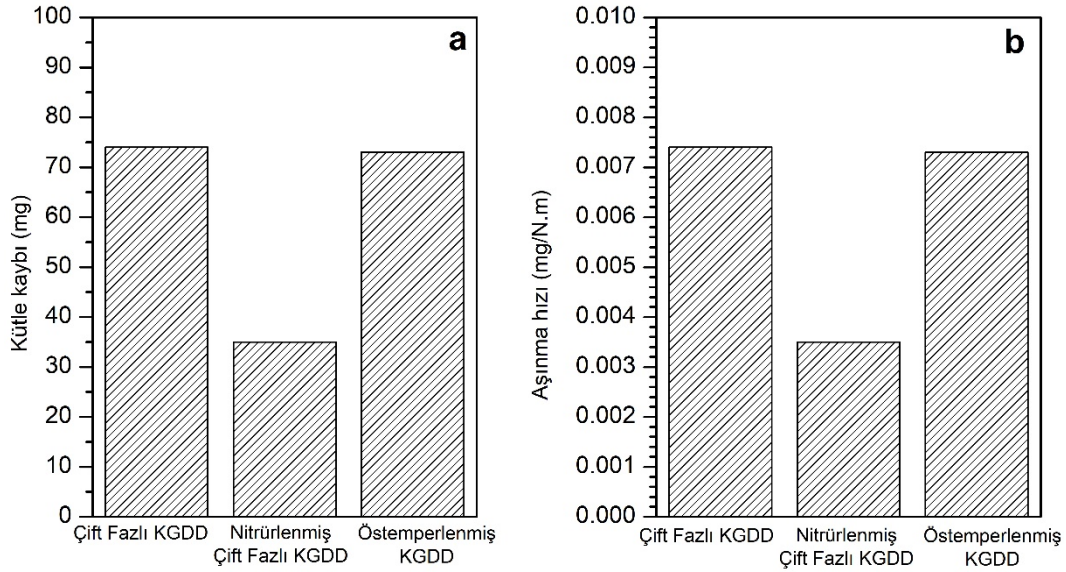
Numunelerin kuru kaymalı aşınma deneyinde kayma mesafesine bağlı olarak sürtünme katsayısı değerleri Şekil 3.4'te verilmiştir. Şekil 3.4'ten görülebileceği üzere 80 metre kayma mesafesinden sonra sürtünme katsayısında önemli düşüş gözlemlenmiştir. Sürtünme katsayısındaki bu düşüş Hertzman temas kuvvetinin azalması sonucunda meydana gelmektedir. 80 metre kayma mesafesinden sonra tribofilm oluşumu sonucu sürtünme katsayılarını kararlı hale gelmiştir. Ortalama sürtünme katsayıları Şekil 3.4'te verilmiştir. Şekil 3.4'ten gözlenebileceği üzere en yüksek aşınma katsayısı ($\mu=0.271$) çift fazlı KGDD numunede yapılmıştır. Daha sonra en yüksek sürtünme katsayısı ($\mu=0.27$) östemperlenmiş KGDD'de görülmüştür. En düşük sürtünme katsayısı ($\mu=0.251$) ise nitrürlenmiş çift fazlı KGDD'de elde edilmiştir. Nitrür tabakasının yüksek sertliğinden dolayı en düşük sürtünme katsayısı nitrürlenmiş çift fazlı KGDD'de elde edilmiştir.



Şekil 3.4. Numunelerin kayma mesafesiyle ortalama sürtünme katsayısının değişimi

Numunelerin sabit aşınma koşullarında aşınmayla kütle kayıplarının ve aşınma hızlarının karşılaştırılması Şekil 3.5'te verilmiştir. Bilindiği üzere ortalama sürtünme katsayısı aşınmayla kütle kaybını doğrudan etkilemektedir. Isıl işlemin aşınma özellikleri üzerine etkisini araştırmak amacıyla aşınma deney parametreleri (aşındırıcı disk, yük ve mesafe) sabit tutulmuştur. Bu yüzden aşınma hızları değerleri, aşınmayla kütle kaybı değeriyle benzerlik göstermektedir. Şekil 3.5.b'den görülebileceği üzere en düşük aşınma hızı nitrürlenmiş çift fazlı KGDD numunede elde edilmiştir. Buna karşın en yüksek aşınma hızı ise çift fazlı KGDD numunede elde edilmiştir.

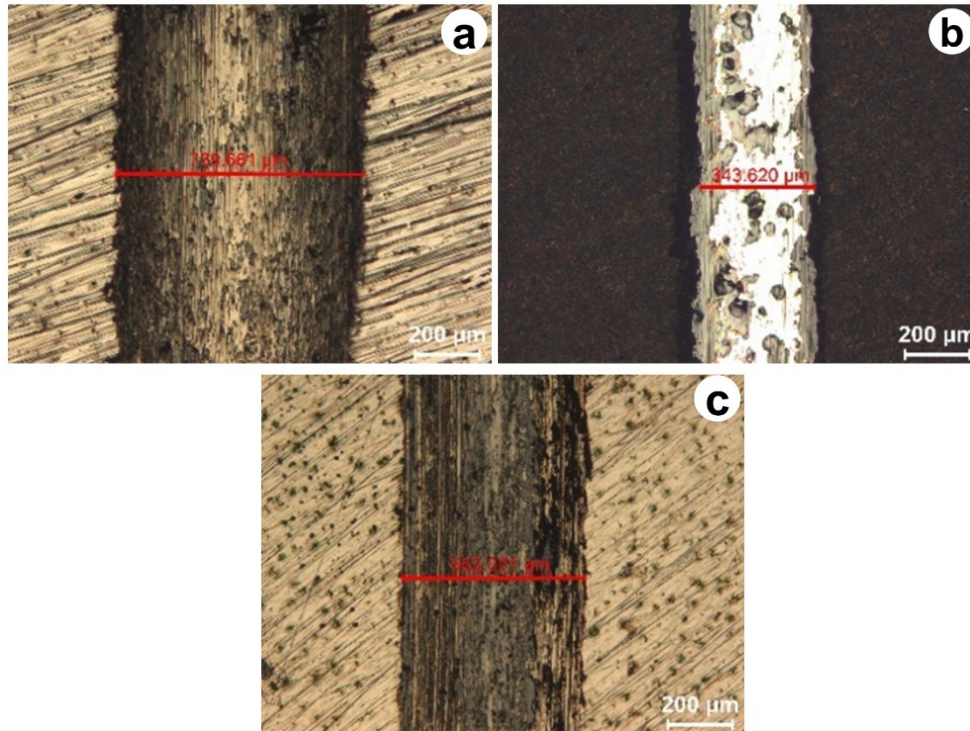
Sertlikleri farklı olan çift fazlı KGDD ve östemperlenmiş KGDD numunelerde birbirine yakın aşınmayla kütle kaybı ve aşınma hızı değerleri elde edilmiştir (Şekil 3.5.) Bu durum, bu numunelerin benzer sürtünme katsayısına ($\mu=0.270-0.271$) sahip olmasıyla açıklanabilir. Çift fazlı KGDD'deki ferrit+temperlenmiş martensit yapı ve östemperlenmiş KGDD'deki ösferritik matris yapılar birbirine yakın sürtünme katsayısı değerleri üretmiştir. Benzer duruma önceki araştırmalarda da rastlanılmıştır [7, 20]. Ayrıca, arakritik östenitleme sıcaklıklarından yağda hızlı soğutma ile üretilen çift fazlı (ferrit + martensitik) mikroyapının ösferritik yapıya sahip östemperlenmiş KGDD'den daha iyi aşınma direnci sergilediği bildirilmektedir [7].



Şekil 3.5. Numunelerin aşınmayla, a) kütle kayıplarının karşılaştırılması ve b) aşınma hızlarının karşılaştırılması

3.5. Aşınmış Yüzeylerin Değerlendirilmesi (Evaluation of Worn Surfaces)

Aşınma deney sonrası numunelerin aşınma iz genişlikleri değişimi Resim 3.7’de verilmiştir. Şekilden görülebileceği üzere en yüksek aşınma direnci sergileyen nitrürlenmiş çift fazlı KGDD’in aşınma iz genişliği en küçük (343,62 μm) elde edilmiştir. Buna karşın en yüksek aşınma iz genişliği (739,681 μm) çift fazlı KGDD’de elde edilmiştir. Numunelerin aşınma iz genişliklerinin numunelerin aşınma kütle kayıpları ile orantılı değiştiği tespit edilmiştir.



Resim 3.7. Numunelerin aşınma iz genişlikleri (a) Çift fazlı KGDD, (b) nitrürlenmiş çift fazlı KGDD ve (c) östemperlenmiş KGDD

4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada, gaz nitrürleme işleminin çift fazlı (ferrit+martensit) küresel grafitli dökme demirin aşınma davranışı üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir;

1. KGDD'e uygulanan 800°C arakritik östenitleme sıcaklıklarından yağda hızlı soğutma ısıl işlemiyle çift fazlı (ferrit + %43 martensit) yapı elde edilmiştir.
2. XRD analizine göre nitrürlenmiş çift fazlı KGDD'in yapısında γ' (Fe_4N) ve ϵ (Fe_{2-3}N) nitrür piklerinin varlığı belirgin bir şekilde gözlenirken, östemperlenmiş KGDD'de ise ösferritik ($\alpha_b + \gamma_{yk}$) yapının delili olan ferrit (α_b) ve kalıntı östenit (γ_{yk}) pikleri gözlenmiştir.
3. Nitrürleme işlemi sonucunda çift fazlı KGDD'in yüzeyinde 10 μm kalınlığında nitrür tabakası elde edilmiş olup nitrürlenmiş tabaka derinliği (Nht) 0,12 mm olarak belirlenmiştir.
4. Uzun süreli (540 dk) nitrürleme işlemi çift fazlı KGDD'in mikroyapısında martensitik yapının bozunmasına ve matris sertliğinin azalmasına (193-200HV) neden olmuştur.
5. Nitrürlenmiş çift fazlı KGDD'de 510 HV, çift fazlı KGDD'de 193 HV ve östemperlenmiş KGDD'de 353 HV yüzey sertlik değerleri elde edilmiştir.
6. Sabit aşınma koşullarında, en düşük aşınmayla kütle kaybı, en düşük sürtünme katsayısı ve en düşük aşınma hızı nitrürlenmiş çift fazlı KGDD'de elde edilmiştir. En yüksek aşınmayla kütle kaybı ve en yüksek sürtünme katsayısı çift fazlı KGDD'de elde edilmiştir. Nitrürlenmiş çift fazlı KGDD'in aşınma direnci, çift fazlı KGDD ve östemperlenmiş KGDD'in aşınma direncinden 2 kat daha fazladır.
7. En yüksek aşınma direnci sergileyen nitrürlenmiş çift fazlı KGDD'in aşınma iz genişliği en küçük (343,62 μm) elde edilmiştir. Buna karşın en yüksek aşınma iz genişliği (739,681 μm) çift fazlı KGDD'de elde edilmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Nitrürleme işleminde yardımlarından dolayı DÖKSAN Isıl İşlem ve AR-GE merkezi A.Ş. yönetimine ve AR-GE müdürü Sayın Ayşe ERKAN'a teşekkür ederiz. TÜBİTAK 2209-B Üniversite Öğrencileri Sanayiye Yönelik Araştırma Projeleri Desteği Programı kapsamında vermiş oldukları destekten dolayı TÜBİTAK'a teşekkürü bir borç biliriz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Nalçacı, B., Kılıçlı, V., and Erdoğan, M., Çift fazlı ($\alpha + M$) küresel grafitli dökme demirlerde martenzit hacim oranı-mekanik özellikler-dislokasyon yoğunluğu arasındaki ilişkilerin incelenmesi, Politeknik Dergisi, (2022) Baskıda.
- [2] Cerah, M., Kocatepe, K. and Erdogan, M., Influence of martensite volume fraction and tempering time on tensile properties of partially austenitized in the ($\alpha + \gamma$) temperature range and quenched + tempered ferritic ductile iron, Journal of Materials Science, 40 (2005) 3453-3459.
- [3] Kocatepe, K., Cerah, M., and Erdogan, M., Effect of martensite volume fraction and its morphology on the tensile properties of ferritic ductile iron with dual matrix structures, Journal of Materials Processing Technology, 178 (2006) 44-51.
- [4] Erdogan, M., Cerah, M., and Kocatepe, K. Influence of intercritical austenitising, tempering time and martensite volume fraction on the tensile properties of ferritic ductile iron with dual matrix structure, International Journal Of Cast Metals Research, 19 (2006) 248-253.
- [5] Kocatepe, K., Cerah, M., and Erdogan, M., The tensile fracture behaviour of intercritically annealed and quenched + tempered ferritic ductile iron with dual matrix structure, Materials & Design, 28 (2007), 172-181.

- [6] Şahin, Y., Erdogan, M. and Cerah, M., Effect of martensite volume fraction and tempering time on abrasive wear of ferritic ductile iron with dual matrix, *Wear*, 265 (2008) 196-202.
- [7] Şahin, Y., Kilicli V., Ozer, M., and Erdogan, M., Comparison of abrasive wear behavior of ductile iron with different dual matrix structures, *Wear*, 268 (2010) 153-165.
- [8] Aristizabal, R., Foley, R. and Druschitz, A., Intercritically austenitized quenched and tempered ductile iron, *International Journal of Metalcasting*, 6 (2012) 7-14.
- [9] Basso, A. and Sikora, J., Review on production processes and mechanical properties of dual phase austempered ductile iron, *International Journal of Metalcasting*, 6 (2012) 7-14.
- [10] Priestner R., Korichi S. Plasma Nitriding and nitrocarburizing of austempered S.G. cast iron, Meguid S.A. (ed.) (1990) 208-217, *Surface Engineering*, Springer, Dordrecht, Holland.
- [11] Priestner, R., and Priestner, D.M., Importance of substrate in surface engineering, *Surface Engineering*, 7 (1991) 53-60.
- [12] Korichi, S. and Priestner, R., High temperature decomposition of austempered microstructures in spheroidal graphite cast iron, *Materials Science and Technology*, 11 (1995) 901-907.
- [13] Uyar, A., Sahin, O., Nalcaci, B., and Kilicli, V. Effect of austempering times on the microstructures and mechanical properties of dual-matrix structure austempered ductile iron (DMS-ADI). *International Journal of Metalcasting*, 16 (2022) 407-418.
- [14] ASTM G99-17, Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus, (2017) ASTM International.
- [15] Kızılkaya E. ve Ovalı İ., AISI 4140 çeliğine uygulanan sığ kriyojenik işleminin mekanik özellikler üzerindeki etkisi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6 (2018), 137-148.
- [16] DIN 50190-3, Hardness depth of heat-treated parts; determination of the effective depth of hardening after nitriding, (1979).
- [17] Kilicli V., and Erdogan M., The strain-hardening behavior of partially austenitized and austempered ductile iron with dual matrix structures, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 17 (2008) 240-249.
- [18] Kilicli V., and Erdogan M., Effect of ausferrite volume fraction and morphology on tensile properties of partially austenitized and austempered ductile irons with dual matrix structures, *International Journal of Cast Metal Research*, 20 (2007) 202-214.
- [19] Kilicli V., and Erdogan M., Tensile properties of partially austenitized and austempered ductile irons with dual matrix structures, *Materials Science and Technology*, 22 (2006) 919-928.
- [20] Sahin Y., Erdogan M., and Kilicli V., Wear behaviour of austempered ductile irons with dual matrix structures, *Materials Science and Engineering A*, 444 (2007), 31-38.
- [21] Oktay E., Kılıçlı V., ve Erdoğan M., Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerde indüksiyonla yüzey sertleştirmenin yorulma sınırı üzerine etkisi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6 (2018) 668-679.



Battery Energy Storage System Sizing, Lifetime and Techno-Economic Evaluation for Primary Frequency Control: A Data-driven Case Study for Turkey

Ümit ÇETİNKAYA^{1*} Ramazan BAYINDIR¹ Ezgi AVCI² Samet AYIK¹

¹Gazi University Faculty of Technology Department of Electrical- Electronic Engineering, 06560, Yenimahalle/ANKARA

²Middle East Technical University Graduate School of Informatics, 06800, Çankaya/ANKARA

Article Info

Research article
Received: 08/12/2021
Revision: 14/04/2022
Accepted: 19 /04/2022

Keywords

Battery Energy Storage System (BESS)
Primary Frequency Control (PFC)
Lifetime
Capacity Fading
Cycles Calculation
Techno-Economic Evaluation

Abstract

The share of renewable energy sources (RES) in power systems has been increasing in recent years. Future power systems will have lower inertia and difficult controllability, especially due to intermittent and variable renewable energy that is not dispatchable easily due to its fluctuating nature. Thus, it is necessary to increase the grid's flexibility to ensure system stability. For this need, new technologies such as battery energy storage systems (BESS) are widely discussed. It is thought to be very useful to create a fast and accurate response in frequency control services with BESSs, especially in low inertia grid conditions. The sizing, charge-discharge control, and lifetime of a BESS providing frequency control service depend heavily on the changes that may occur in the power systems. So, it is a very complex issue to decide during the investment phase. In this study, the optimum sizing, lifetime, and techno-economic evaluations of BESS providing primary frequency control (PFC) service have been made by grid's frequency data-driven. For this purpose, firstly; the BESS design providing PFC is created for Turkey's electricity system. Secondly, with the developed algorithm, the number of charge-discharge cycles of the BESS is calculated and the lifetime and capacity fading of the BESS are determined according to the frequency deviation. Finally, economic evaluations have been made for BESS considering the investment- operating costs and PFC market prices.

1. INTRODUCTION

In recent years, most of the global electricity needs are met from RES and the renewable generation capacity is constantly increasing. Since the beginning of 2020, the total capacity of RESs globally has exceeded 2.7 TW. Hydro energy has the highest capacity with 1.2 TW, followed respectively by wind energy (732 GW), solar energy (709 GW), and bioenergy (127 GW) in Figure 1 [1]. However, the biggest increase in capacity in recent years is seen from wind and solar energy. It is estimated that the total wind and solar capacity will double by 2025, and with this growth may surpass the installed capacity of natural gas and coal. However, this increase in capacity creates new problems and needs in terms of ensuring the supply security of the grid. Supply of energy from intermittent and variable sources such as wind and solar causes fluctuations in energy production [2], [3]. The power systems need to increase flexibility to tackle increasing contributions from variable renewable energy (VRE). In general, the control of imbalances that may occur in the power systems could be ensured by many compensatory measures. Flexibility alternatives for efficient VRE integration are allocated on the demand and supply side of the energy system, respectively: highly flexible conventional power plants, energy storage systems, curtailment of renewable surplus generation, demand-side management, grid expansion, virtual power plants [4].

Although the estimation studies for imbalance projects caused by RESs have progressed at an acceptable level, they have not reached a sufficient point yet. In this process of change occurring in modern power systems, it will have a very important place for grid operators and consumers in the supply process of electricity storage system [5]–[7]. According to SHURA energy conversion center report for Turkey, the long-term electricity system planning purposes the contribution of Turkey, in 2023 the basic field goals and strategies, both short and long term, we need an integrated energy and climate change strategy determination. In the report, where wind and solar installations stand out as the least costly options, it is emphasized that policies to increase energy efficiency that provide versatile cost-effective benefits should be considered together with other policies that encourage renewable energy and protect the environment and follow a holistic approach. On the other hand, energy storage technologies that provide flexibility to the system for more renewable energy integration are recommended to be supported by market mechanisms [8].

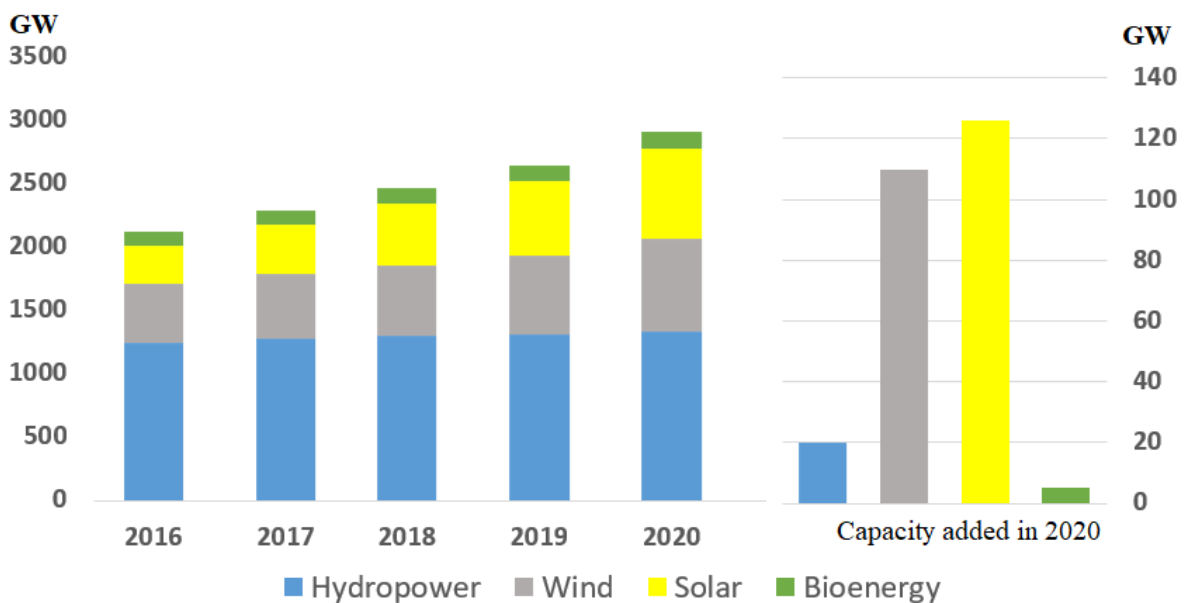


Figure 1. Renewable power capacity growth over the world [1].

Electricity storage (ES) can be used for many different services needs with many different technologies and application architectures. Generally, ESs could be generally classified according to their functions and methods of stored energy. Basically, we can define ESs in five groups according to the technology type: chemical, electrical, electro-chemical, electro-mechanical and thermal [9]. ES technologies mainly used today: pumped hydro storage (PHS), compressed air energy storage, flywheel, supercapacitor energy storage; electrochemical energy storage including lead-acid, nickel-cadmium, sodium-sulfur, lithium-ion (Li-ion), and flow battery energy storage. The main factors that separate ES technologies according to their intended use are energy-power density, lifetime, cost, efficiency, technology maturity, response time, self-discharge time, power rating, discharge time, and environmental impacts. PHS has the highest rate with a capacity of about 170 GW today and is mostly used in energy shifting service. Also, they have some difficulties such as site dependence, limited capacity, or response capabilities. However, Electrochemical energy storage can provide the capacity, positioning and fast response flexibility required to meet a much wider range of service options than many other storage technologies. Thermal, electro-chemical and electro-mechanical energy storage power capacity by main-use case and technology group are shown in Figure 2 [10], [11]. As shown in Figure 2, electro-chemical storage, that is batteries, are more widely used in frequency regulation services because they provide fast frequency response due to their short response times. Thus, the using of BESS in the frequency regulation market is rapidly increasing in next years.

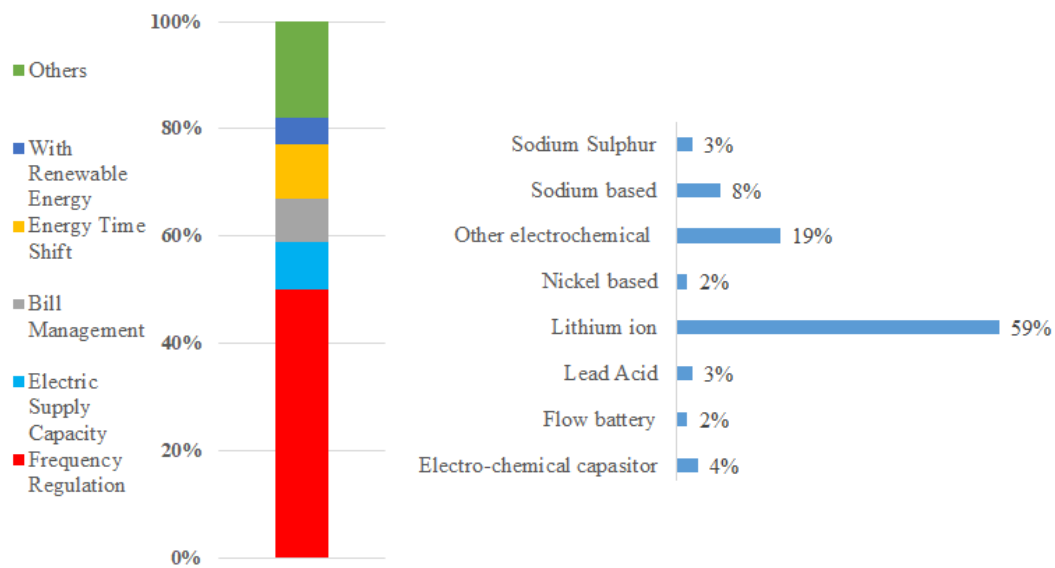


Figure 2. The main usage services of electrochemical energy storage

Power systems need reserve power capacity to operate stably and securely, and this capacity requirement varies according to the size of the grid and the dispatch speed. The determination and management of the reserve capacity is usually done by the transmission system operators (TSOs) according to the grid code. TSO is also responsible for maintaining system stability. The reserve capacity in a power system is mainly used for two main functions. First one; It is used to provide frequency control in supply and demand unbalance. With the change of frequency, the generation units must be in continuous operation and control their load to maintain the balance between supply and demand. Later, it is used in emergency situations to maintain system stability in sudden situations such as power loss or line openings that may occur in the grid. For emergencies, each TSO may have a different response time and application according to the grid code. However, in emergency situations, frequency control is generally managed in three sub-systems as primary, secondary, and tertiary. The PFC reserve is to stop the sudden frequency change at the beginning of the transient. Secondary frequency control (SFC) reserve should bring the frequency back to nominal level and void the primary reserves. Finally, it is the replacement for the previous one for the Tertiary frequency control (TFC) reserve. So, to simplify with a single sentence; The main role of the primary reserve is to stop the frequency drop during a transient state; Secondary control should bring the frequency back to the nominal level and release the primary reserves and the tertiary reserves can be seen as a substitute for the previous one. It aims to prevent frequency drops that may occur with PFC in milliseconds before reaching the lowest frequency limit of the grid. As a priority, it is to be able to provide frequency stability within the range of grid frequency limits. BESSs are one of the most important alternatives to provide fast frequency control response. The European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E) and Turkey must be operated in the range of 49.8 to 50.2 Hz frequency for the grid. In ± 200 mHz variation step changes, the reserves are required to react within the time specified. Primary reserve units should be provided with primary reserve support in any change in the frequency. There is no frequency dead band in primary reserves obtained from existing conventional sources. Similarly, in case of PFC from BESS, charge and discharge control is provided according to frequency deviation. It is necessary to measure the BESS correctly to provide charge-discharge control of BESSs according to the frequency change and to provide the required reserve capacity of BESSs.

It is important for both system operators and investors to correctly find an optimum size of utility-scale batteries intended for the grid services and to estimate the lifetime. System operators want to know the availability of each facility for short- and long-term planning. Likewise, every case should be taken into consideration both technically and economically for investors and the right decision should be made before the investment. The forecasting of state of charge (SoC), depth of discharge (DoD), and cycle number of batteries under operating conditions would be very useful before implementation, especially when

considering frequency control services. Therefore, there are many studies conducted investigating the sizing and lifetime of BESS for power systems and investors. With a pilot application project in Thailand, the general arrangement of BESSs according to battery types has been explained to give a general idea [10]. Similarly, the comparative analysis of fast frequency response with BESS in Germany, Great Britain, and Sweden is presented to show technical regulatory frameworks[12]. In [13], a sensitivity analysis of frequency control reserve of BESS with different operational conditions in Germany is made within this project hybrid BESS with five different battery technologies. To support solar power with BESS for PFC in the Colombian power system., the BESS sizing strategy is proposed by optimizing energy capacity and operation set point of SoC [14]. In [15], the economic evaluation of solar power using hydrogen storage and battery solar power is studied for Poland. A hybrid form of BESS and solar installed in a football stadium is demonstrated as techno-economic aspects considering of Norwegian economic and regulatory framework [16]. A life prediction model is developed based on test results to use extrapolate lifetime for grid-connected Li-ion BESS. This study showed that the life model can be used to optimize the overall life-cycle benefit of integrating BESS on the grid [17]. With a different approach, the capacity degradation of BESSs is made by a statistical capacity aging model [18]. The life Cycle Estimation of BESS using PFC is made on basis of grid frequency analysis. It used time series analysis for frequency samples and estimated the number of charging/discharging cycles using the rain-flow procedure [19]. In [20], the capacity aging of providing PFC using a 1MW/1MWh BESS in Eastern Denmark is calculated according to the number of charge-discharge cycles. In [21], it is found the optimal economical size of BESS to minimize life cycle cost using different battery technologies and parameters. The comparative economic analysis between hydrogen storage and battery storage with a grid-connected photovoltaic system is studied. This study considers the rule-based operation strategy and scenarios based on pessimism and optimism [22] . It is investigated the economic benefits of the primary frequency control with BESS. It used to determine the sizing of BESS using a methodology of both basic and hysteresis frequency control based on small and large dead bands on the Powerfactory model. According to simulation results, the optimum energy capacity of BESS is obtained [23]. Similarly, to improve frequency response in TSO the optimal sizing of a utility-scale energy storage system is made by using grid model on Powerfactory [24]. Economic availability of BESS considering sizing and aging is tested by a model developed on distribution grids to stack ancillary services. As a results, this methodology could be benefit for the flexibility, safety, reliability and quality of the grid [25].

In this study, technical and economic evaluation of a storage system providing PFC is performed using historical frequency data driven. BESS optimal sizing is determined based on the frequency control limits of Turkey's grid. According to the frequency data of the past two years; SoC, DoD and energy changes of BESS have been observed. According to the results obtained, the cycle number of BESS has been calculated with the developed algorithm, and according to these values, BESS aging and lifetime have been predicted. Finally, the economic evaluation of BESS according to investment and operating costs has been shown.

2.MATERIALS AND METHODS

2.1.OPTIMAL BESS SIZING FOR PFC ACCORDING TO TURKEY GRID CODE

To determine the optimum capacity of the BESS to be used in the PFC service, the PFC operating principles of the priority grid should be determined, and the energy and installed power capacity of the required BESS should be determined accordingly. In grid of Turkey, there is no battery facility in those who are engaged in business activities, legislation studies have been made for the use of battery systems in recent years. There are no grid requirements for battery systems and battery systems to participate in frequency control. However, for any plant the main technical requirements for PFC as stated by the TSO TEIAS are [26]:

- PFC must be activated within a “few” seconds of a frequency deviation. The measurement error and regulation sensitivity should be less than ± 10 mhz.
- PFC must be fully activated at frequency deviations higher or equal to ± 200 mHz, be achieved within 30 seconds and be maintained for at least 15 minutes.

As batteries both not have any primary supply sources and have a limited storage capacity, they need a continuous charging process. For they can be used in continuous services such as PFC, the required energy capacity must be determined for the initial state. To ensure PFC reserve by BESS, it need to enough energy capacity to meet alert and normal state of grid frequency. Accordingly, BESS must provide energy for alert states in frequency deviation more than ± 200 mHz during minimum 15 minutes. To do this, it must have energy capacity required for alert states during minimum 15 minutes according to Equation 1.

$$E_{\max} = 2 \times \frac{15_{\min}}{60} \times P_{BESS} \quad [MWh] \quad (1)$$

According to Equation 1, a minimum of 0.5 MWh energy capacity is required to provide 1 MW PFC reserve for alert state in both directions. Similarly, BESS must support frequency deviations lower than ± 200 mHz in the normal state between 49.8 to 50.2 Hz. Thus, it can ensure frequency deviation and balance its energy state according to state according to frequency transitions. To make this, it is reserved $2 \times 0.2 \text{ Hz} \times P_{BESS} = 0.4 \text{ MWh}$ [27], [28]. In this direction, we could determine the optimum required total energy capacity to provide 1 MW of PFC is 0.9MWh as per unit value Turkey grid code.

2.2.THE LIFE CYCLE OF BESS AND CHARGE / DISCHARGE CYCLE COUNTING ALGORITHM

The lifetime of the BESS depends on the number of charge-discharge cycles that the battery can provide with decreasing the initial capacity of the battery. Depending on the frequency change of the grid and the possible operating conditions, the total number of cycles of the BESS must be estimated, because the BESS continuously discharge/charge in PFC. As each battery is used and recharged, it decreases the ability to use to its original capacity in time. Thus, the lifetime for a battery is the number of charge-discharge. And the lifetime depends on the types, materials of battery and how to use it.

The DoD shows the percentage of discharged energy relative to the battery's total capacity that it defines as the discharged energy capacity from a fully charged capacity divided by the nominal capacity. Generally, the more charge-discharge a battery is, the less its lifetime can be. At the same time, the faster and larger the DoD rate, the shorter the lifetime. In most cases, manufacturers of batteries determine and limit DoD of battery such as %60 or %80 according to the intended use. However, some manufacturers have rated their batteries with a 100% DoD that it could use the maximum capacity without excessively damaging the battery. Even if the DoD and SoC behavior of each electrochemical battery is different, the higher DoD and SoC affect the lifetime of the battery. The long-term use of BESS can be provided as a standard depending on the DoD and the operating range of the SoC. Figure 3 and Table 1 show basic examples of these features [29], [30].

Table 1. Life cycle characteristic of a battery depending on DoD and the operation range of SoC

DoD (%)	Operation range of battery SoC (%)	Cycles
100	0-100	4000
75	25-100	5651
50	50-100	7746
	25-75	11,556
30	50-80	20,317

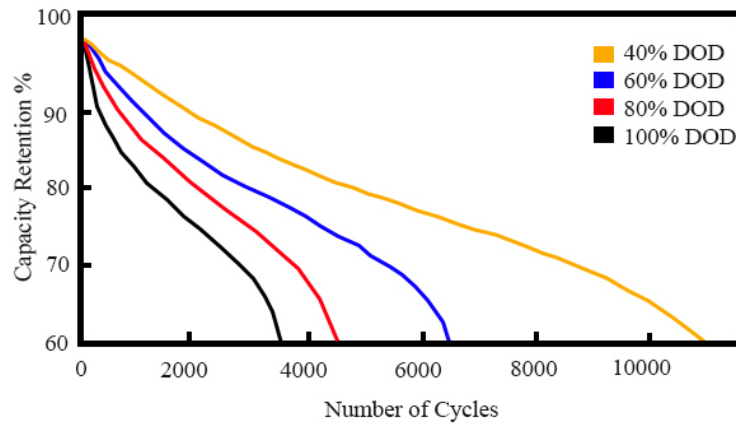


Figure 3. Capacity retention according to number of cycles

The battery life is affected by the number of charge-discharge cycles. Thus, estimating battery life is important for maximizing return on investment for grid-scale battery energy storage applications. In this paper, to approximate the number of battery full charge / discharge cycles, a fast battery cycle counting method is used for grid-connected BESS that exposed to micro cycles. This method calculates the variable power BESS irregular charge-discharge cycles due to the actual grid frequency variation. As shown in Diagram 1[31], the fast cycle counting method is used to find approximate the number of complete cycles of a battery using historical BESS PFC data. The method is explained as follows:

- The algorithm loops through historical PFC data over a specified period.
- In the first step, the values of the PFC are obtained for every second.
- According to the algorithm used in this article, if it is greater than zero, the battery is charging; If it is less than zero, the battery is discharged; or if it equals zero, the battery is resting.
- In the second step, the sum of all charge indexes creates the battery Charge data set, and the sum of all discharge indexes creates the battery Discharge data set.
- In the third step, when each one equals 100%, the battery charge and discharge cycle is increased by 0.5 independently which is a parameter to indicate the charge and discharge of the battery. When it is added to the counter twice so one of it is for charging and the other one is for discharging in the algorithm, the battery completes one cycle.
- The algorithm is iterated over the history of the PFC data considered and obtains the Total Cycle data.

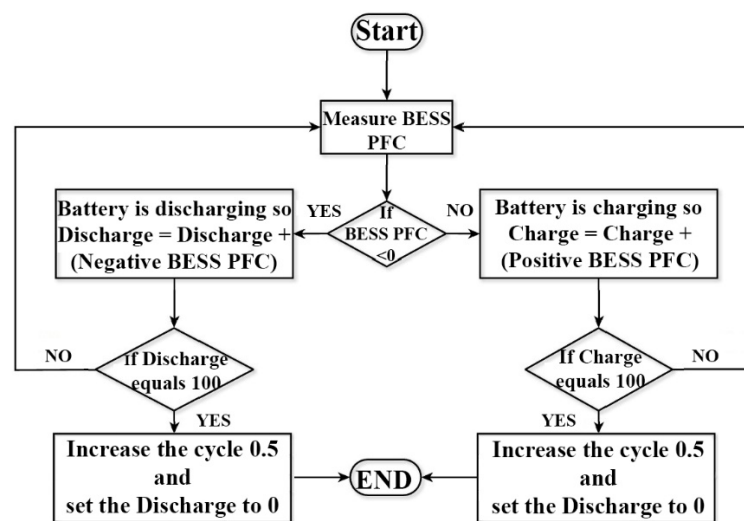


Diagram 1. Flow chart of fast battery cycle count estimation method used for a grid-connected battery energy storage system which exposed to micro cycles.

2.3.ASSESSMENT OF BESS AGING

As with all electrochemical applications, aging is an inevitable process in batteries due to different side effects. The main factors that cause this aging are cycle number, fast charge, temperature and SoC. However, in general, we can define aging for BESS as calendaring aging and cycling aging. Calendaring aging: It is aging that occurs regardless of use, known as the shelf life of the battery. Cycling aging is the aging that occurs depending on the number of cycles and the depth of discharge each cycle. In other words, it is the decrease of energy capacity and efficiency of BESS [32], [33]. Calculation of the capacity loss of BESS depending on both factors can be estimated according to the SoC changes of BESS [34]. Basically, in the calculation of the capacity loss of a BESS should be made according to both factors. However, with the assumption that there will be a continuously charge / discharge change in frequency control services, calendaring aging can be neglected [35]. Based on the number of cycles of BESS, we can calculate the capacity loss according to Equation 2.

$$Cycle_Aging = 0.021 \times e^{-0.0194 \times SOC_average} \times DOD_{MAX}^{0,7162} \times N_cycles^{0.5} \tag{2}$$

In this study, the monthly average of SoC and maximum DoD are calculated with the Charge / Discharge Cycle Counting Algorithm of BESS designed for PFC. By using this information, the capacity loss of BESS is determined monthly and yearly.

2.4.INVESTMENT-OPERATIONAL COST AND ECONOMIC EVALUATION

BESS generally consists of four main parts: battery system, power conversion, energy management and balance of system. The battery system includes the management system and battery cells. In this section, the cells are combined in groups to create the whole battery system. Management between cells and cell groups is provided by the battery management system. With the battery management system, all information is transferred to the BESS energy management system. The energy management system provides the control of charge and discharges management according to the grid service of BESS. The power conversion system is used for DC-AC conversion under charge-discharge conditions. Finally, balance of system can be defined as other necessary hardware, security and infrastructure parts that make up the BESS [36].

The cost calculation of BESS was determined according to the investment cost ($CAPEX_{BESS}$), annual processing and maintenance expense ($OPEX_{BESS}$) and the estimated lifetime (T_{years}). Basically, $CAPEX_{BESS}$ is calculated using unit prices of installed power rated (P_{BESS}) and energy capacity (E_{BESS}), other software, any engineering, procurement, and construction (EPC) costs. For the lithium-ion battery, these unit prices (UP) are decreasing every year. In the last decade, the total investment cost of 1 MWh capacity BESS has decreased by more than 80%. This value, which was 587 \$ / kWh in 2017, was observed to be around 400 \$ / kWh in 2020. It is expected that this decrease will continue in the coming years [37]–[40]. As can be seen in Figure 4, approximately 70% of the investment cost of BESS consists of balance of system and battery cost.

$$CAPEX_{BESS} = UP_{P_BESS(MW)} + UP_{E_BESS(MWh)} + COST_{EPC_and_SOFTWARE} \tag{3}$$

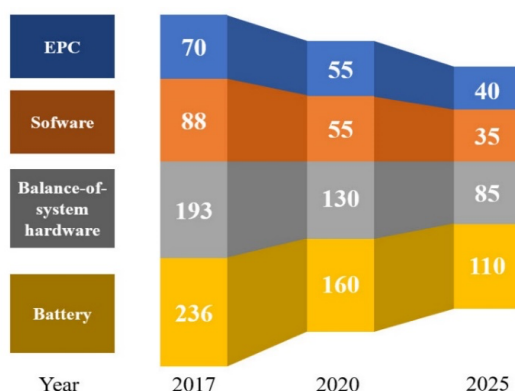


Figure 4. Unit prices of BESS Capex

BESSs provide two-way frequency control service up and down, and the PFC cost is calculated by the reserved power (MW) they provide. Pricing is made according to the hourly reserve power. However, in some countries, frequency reserves and pricing could be operated separately upward and downward. In Turkey, PFC reserve service and capacity pricing are made in two directions. Therefore, as BESS provides two-way control, the charging cost can be calculated cumulatively. In this study, the charging cost is neglected in the BESS income account for this reason. The income account of BESS is calculated according to Equation 4.

$$BESS_Income = P_BESS(MW) \times Hourly_PFC_Price \quad (4)$$

One of the methods used in profitability analysis and economic evaluation of an investment is the Net Present Value (NPV) method. NPV shows the difference between investment income and expenses with their present value over a period. NPV is based on a discount rate that can be derived from the cost of capital required to make the investment. Discount rate reveals the risk level of the investment and the investor's attitude towards risk depending on the region where the investment is made. But basically, a positive NPV is expected from a project. Any investment with a negative NPV should be avoided [15], [41].

$$NPV = \sum_{t=0}^N \frac{NI}{(1+R)^t} \quad (5)$$

NI: Net income in period t (all income minus all expenses)

R: Discount Rate

N: Total number of periods in which income and expenses are evaluated

Another economic indicator is the internal rate of return (IRR). The IRR equates the NPV of an investment project to zero. It is the ratio that equates the NPV of incomes to the NPV of expenses. It is expected that the IRR value will be high in making an investment decision.

$$\sum_{t=0}^T \frac{NIS_T}{(1+IRR)^T} = 0 \quad (6)$$

NIS: Net income stream in period t (all income minus all expenses)

Finally, it is necessary to know the total income expected from an investment and the return of the investment. Return of investment (ROI) determines the profit-loss situation by considering the total profit and investment cost from the investment. In this way, the efficiency and sustainability of the investment are revealed.

$$ROI = \frac{(NII - CoI)}{CoI} \quad (7)$$

NII = Net Investment Income, CoI = Total Cost of Investment

3.RESULTS

In this study, the real measurement data of grid frequency of Turkey is used. The frequency data in one-second resolution for 2019 and 2020 years are shared as open source by the TSO of Turkey. The frequency data of two years are shown in Figure 5. For each year, there are over 31,5 million data points.

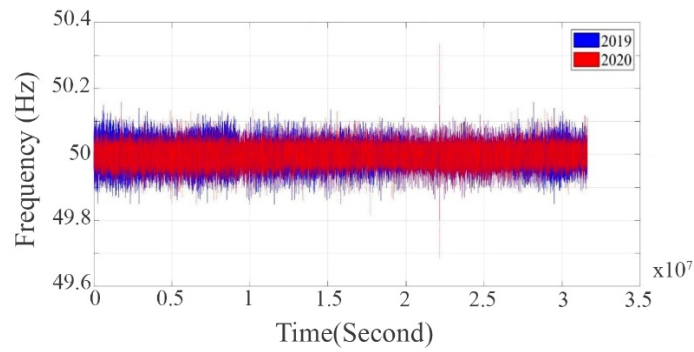


Figure 5. The grid frequency data in one second resolution

Based on the frequency data, to see how intense, the frequency is at which values, the frequency density graph is given in Figure 6.

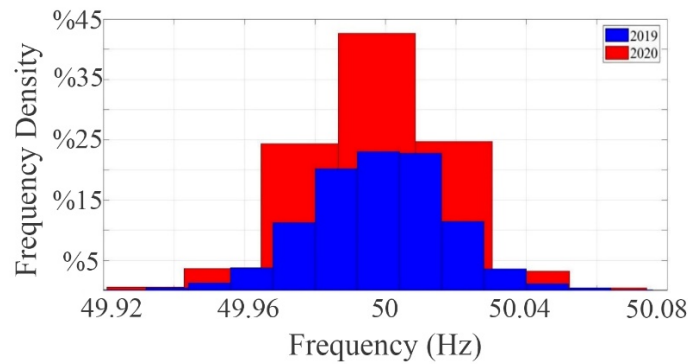


Figure 6. Frequency density graph

Using the frequency change values, the SoC parameter of the BESS is obtained with the help of the following equations.

$$\text{Frequency Change } (\Delta f) = f(t) - f(t + 1) \tag{8}$$

$$\text{Frequency Change Rate} = \frac{\Delta f}{f_{\text{nominal}}} \tag{9}$$

$$\text{Participation of BESS PFC} = \frac{\Delta f}{f_{\text{nominal}}} \times P_{\text{BESS}} \tag{10}$$

$$\text{SoC}_{\text{end}} = \text{SoC}_{\text{Previous one}} + \left(\frac{\Delta f}{f_{\text{nominal}}} \times P_{\text{BESS}} \right) \tag{11}$$

As stated before, there is no dead band or any limit in PFC in Turkey. Also, there has not been any regulation related to using BESS in PFC of Turkey's Grid Code. However, dead band in frequency control services of BESS have been examined and applied in projects and regulation studies for different countries [42], [43]. Thus, in this study, the analyzes of BESS for Turkey have been examined separately according to three different dead bands: 0, ±10 mHz and ±20 mHz. Dead band is considered to be zero change in each frequency range. Based on this principle, the response characteristic of BESS for PFC are given in Figure 7 according to three different dead bands.

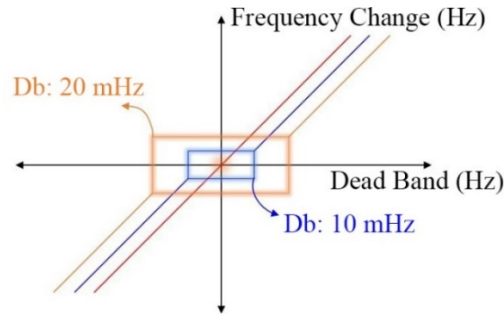


Figure 7. The response characteristic of the BESS for PFC

PFC participation of BESS is examined according to frequency change in seconds resolution according to grid frequency data. In Figure 8, The change of SoC of the BESS is given respectively according to the dead bands. As can be seen from here, as the dead band increases, the change in the SoC of the BESS decreases.

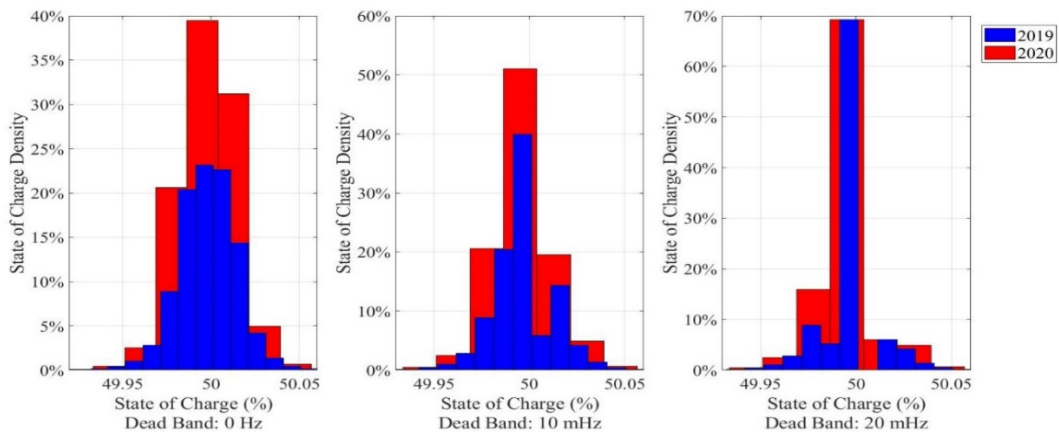


Figure 8. Density of SoC according to dead bands.

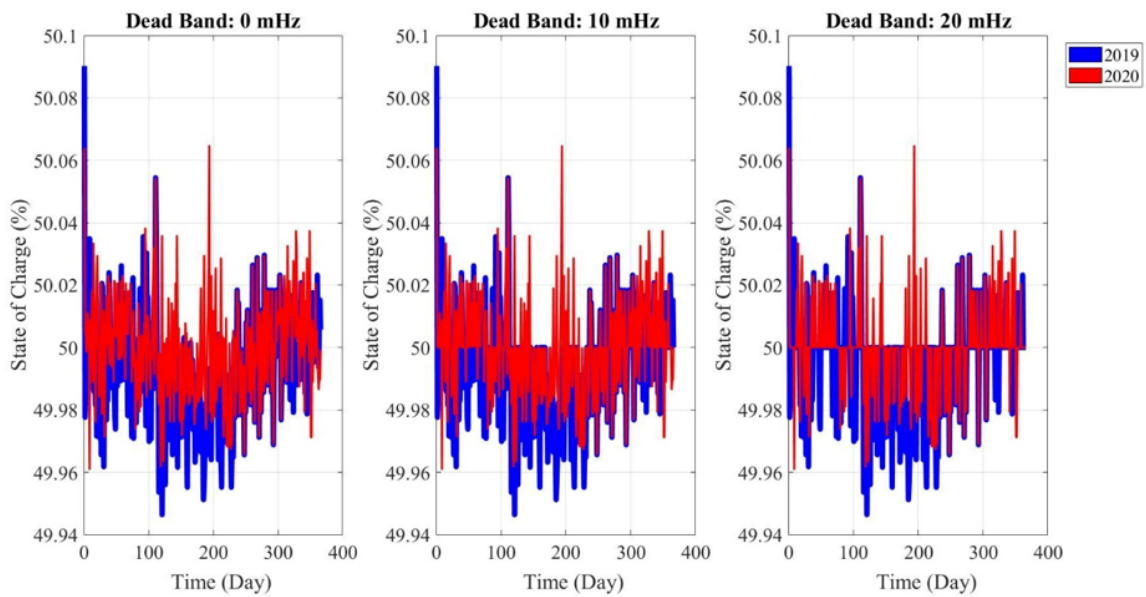


Figure 9. Daily Maximum SoC

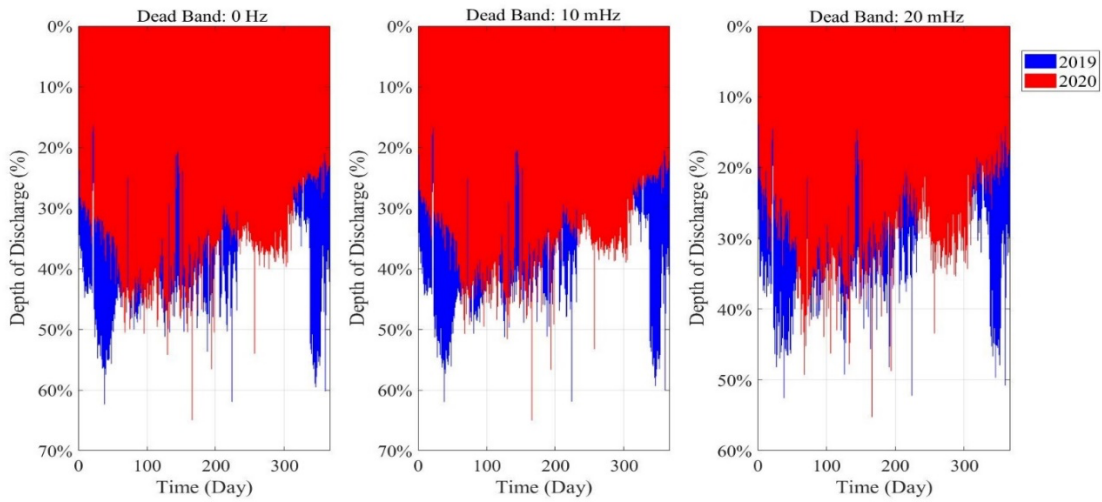


Figure 10. DoDs According to dead bands.

Based on the algorithm given in Diagram 1, the total number of cycles of the BESS on a monthly for a year is given according to dead band in Figure 11. At the same time, the total number of cycles for the whole year, as well as monthly, is given in Figure 12.

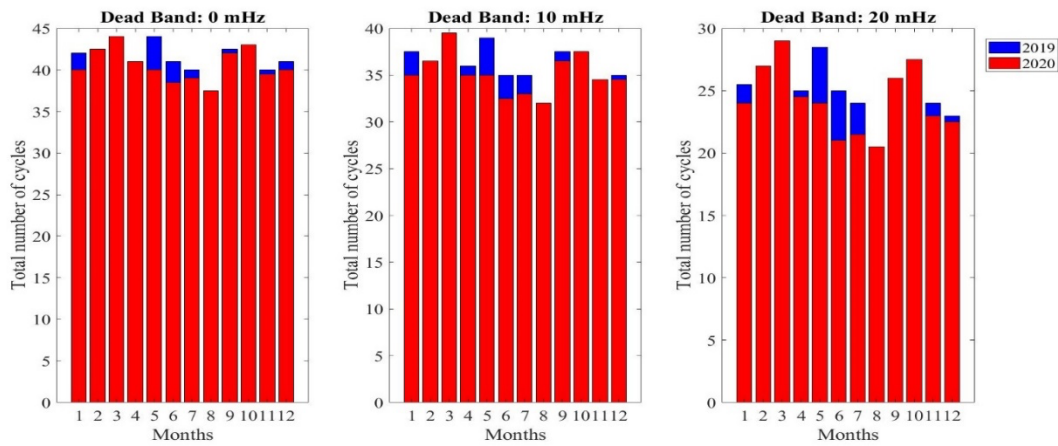


Figure 11. Total number of cycles per month according to dead bands

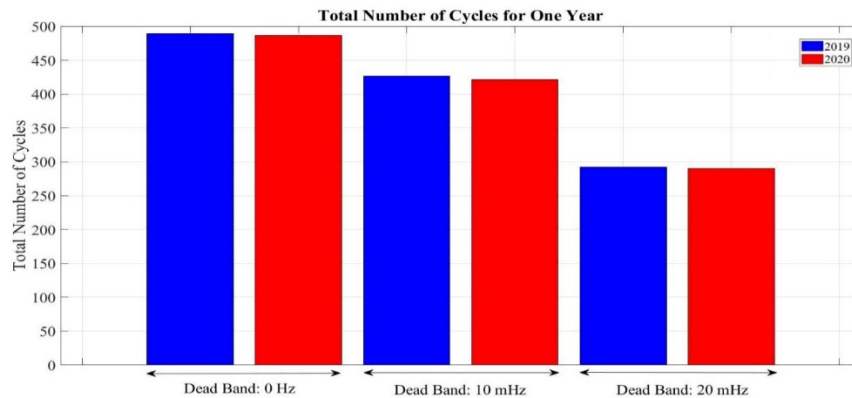


Figure 12. Total number of cycles according to dead bands

As seen in the examinations made according to the grid frequency data; when accepted that BESS has been taking part in the PFC continuously for two years; we observed that the SoC of BESS ranged from 49.9% to 50.1% and the SoC changed less with the dead-band expanded. Also, the number of cycles calculated

with the algorithm used in the study varies according to the PFC dead band. The daily cycles calculated are 1.4 when there is no dead band, 1.2 when the dead band is ± 10 mHz, and less than 1.0 when the dead band is ± 20 mHz. In line with these results and the information in Table 1; if assumed that the change of the grid frequency will proceed similarly; the lifetime of the BESS to be established in Turkey could exceed 10,000 cycles in participation in PFC services. In other words, it could be used up to 15 years according to the total number of cycles per year, and if the dead band is applied, the lifetime could be further increased and guaranteed.

Capacity fading of BESS is calculated according to Equation 2. The capacity fading that will occur at the end of two years based on the monthly average SoC, max DoD, and cycle numbers is shown in Figure 13. Capacity fading rate according to operating conditions of BESS: 1.6% in 0 dead band, 1.45% in ± 10 mHz and 1.12% in ± 20 mHz. Dead bandwidth in PFC reduces the capacity fading of BESS. According to these results, the optimum energy capacity of BESS should be established approximately 15-25% more according to the dead band of PFC to ensure the usability of BESS for 15 years in PFC participation.

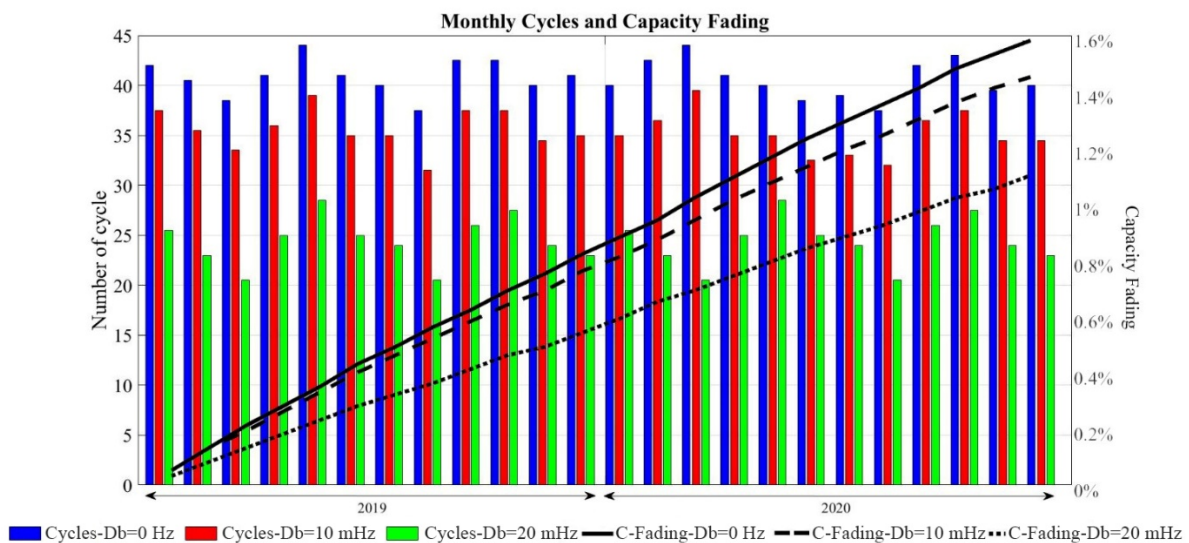


Figure 13. Capacity fading of BESS

After BESS sizing, lifetime, and capacity fading calculations; the economic evaluations have been made for BESS, which meet the primary frequency reserve requirements of the Turkish grid and have a service life of 15 years. Table 2 shows the scaled BESS capacity and financial basis values. To guarantee a life of 15 years, the energy capacity of BESS has been determined 20% more according to the calculated capacity fading. For the PFC income account of BESS, primary frequency capacity unit prices of the ancillary services market of Turkey are taken as a reference.

Table 2. The scaled BESS capacity and financial basis values

BESS Rated power	1 MW
BESS Energy Capacity	1.1 MWh
CAPEX	416000 USD
OPEX	For the first five years (%1*CAPEX) For later years (%2*CAPEX)
Lifetime	15 years
Discount Rate	%10

The primary frequency capacity market in Turkey is auctioned every day in blocks of four hours. For this reason, the actual prices for every four hours are published in Turkish Lira. The average PFC unit price are determined in USD, considering the unit prices for the years 2019-2020 and the monthly average exchange rate. Figure 14 shows the monthly average prices.

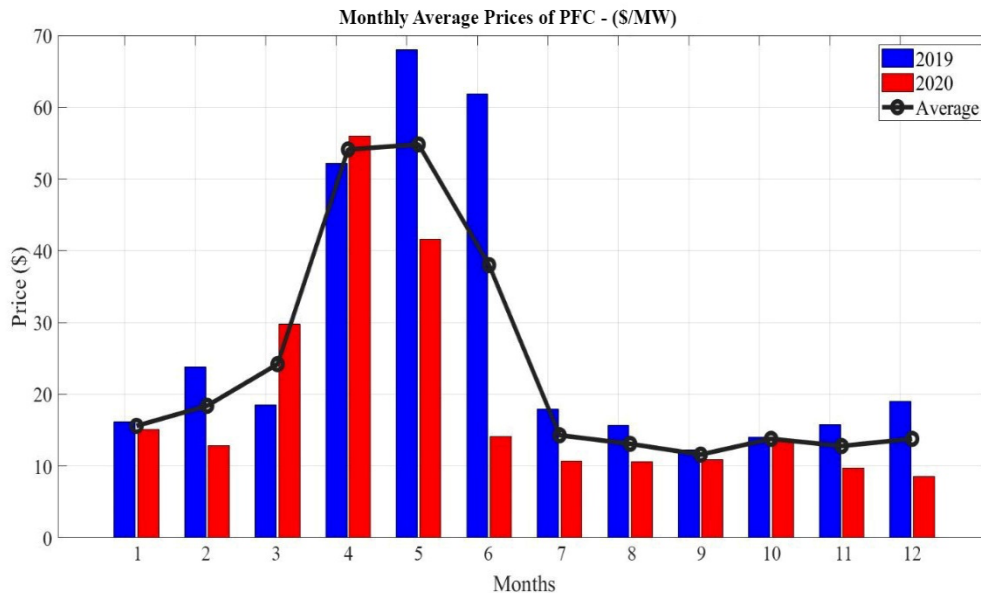


Figure 14. Monthly average prices of PFC

According to the monthly average prices, the monthly income of BESS has been calculated according to the PFC capacity, and the total annual income is foreseen. The economic evaluation of BESS has been made in three different scenarios. In the optimistic scenario, BESS provides the PFC service throughout the year. In the reasonable scenario, it participates in a maximum of five-block bidding periods each day. In the pessimistic scenario, it participates in a maximum four-block bidding period per day. For each scenario, the annual income is calculated according to the monthly average PFC prices, and the annual NPV is determined. The NPV and IRR values of the net income obtained at the end of 15 years are determined. The results of the economic evaluation are shown in Table 3.

Table 3. The results of economic evaluation

Scenarios	Optimistic	Reasonable	Pessimistic
Total Net Profit (NPV- \$)	1.036.360,52	786.381,61	536.402,71
IRR (%)	32,8	25,5	17,9
ROI (%)	149	89	28,9

According to the results, it seems that BESS could derive a profit under the conditions of three scenarios. According to the grid frequency data, it is possible to participate in the PFC throughout the year, except for maintenance and failure conditions. Therefore, high profitability can be expected for optimistic conditions. However, when at least four and five blocks of tender participation are achieved per day, BESS can be positive in terms of investment depending on CAPEX.

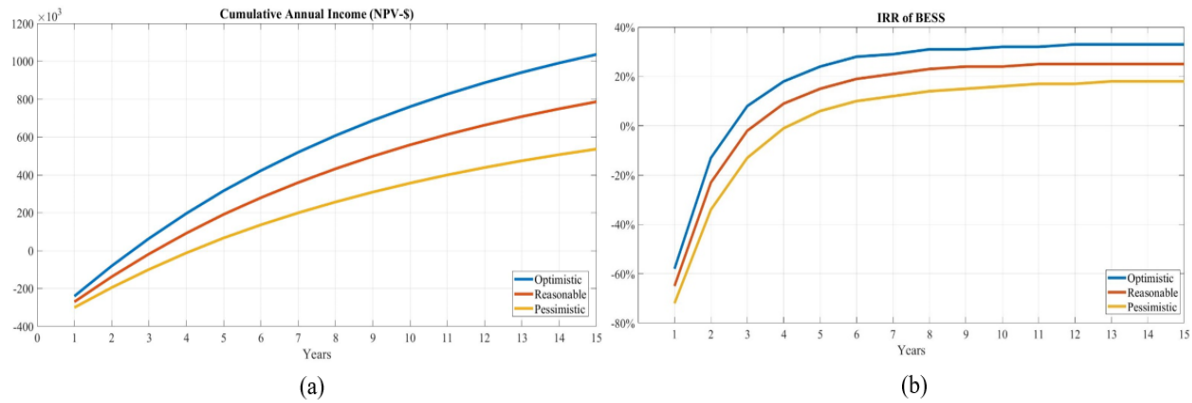


Figure 15. (a) Cumulative annual income (b) IRR of BESS

The annual cumulative income and IRR in all three scenarios are shown in Figure 15. Considering the 15-years lifetime; even in the pessimistic scenario, it is seen that positive earnings can be obtained after four years. The IRR is higher than the discount rate based on economic evaluations in all three scenarios, and it can be said that the investment can be profitable depending on the investor.

4.CONCLUSIONS

It is thought that the increase of RES, especially wind and solar, will create problems in terms of grid operations. To ensure frequency and voltage stability, grid flexibility must be increased. When viewed from this aspect, energy storage systems are one of the leading solutions. Especially with the developing technology in recent years, battery storage systems come to the fore as a grid-scale or distributed system. However, there are still potential concerns for system operators and investors regarding its implementation. In this study, the technical and economic evaluation of BESS, which provides PFC service, has been shown based on past frequency data. To sum up the following conclusions could be made:

- For frequency control services, the sizing and investment evaluation of BESS could be made according to past frequency data. In this way, the pre-evaluation can be provided for high investments.
- Before investment decisions, it is important to determine the lifetime and capacity fading of BESS according to the grid operating conditions. In this study, SoC and DoD changes of BESS according to the frequency deviations in seconds are examined; the lifetime and capacity fading of BESS has been successfully evaluated monthly and yearly. The calculated capacity fading can be used as a reference to the extra energy capacity that will be needed from the initial phase of the investment
- In terms of Turkey's grid and market conditions; the economic evaluation of BESS has been made. It can be said that a profit can be gained from the BESS investment according to the market participation scenarios foreseen in consideration of the past PFC average unit prices. However, with the foreseen BESS investment cost decreasing in the coming years, the predicted optimistic gains will not be difficult to realize.
- It has been shown that the dead band in PFC can affect the lifetime of BESS. According to the results, it will be beneficial to apply a dead band in frequency control of BESS in Turkey.

The methodology and motivations of this study will be a useful example for the power grids where BESS will be implemented newly. However, looking for future research; it would be beneficial to carry out similar studies according to different storage technologies such as flywheels, fuel cell, supercapacitor. Especially for Turkey, optimum battery reserve capacity should be studied for frequency reserve capacity of grid. Similarly, the use of renewable energy peak shaving and arbitrage usage for consumers can be examined according to the battery prices in the future.

Each new application like energy storage systems could be a new opportunity, but it will require to better commercialization status of these options to apply. As in many countries, storage systems can create new

opportunities and new challenges in Turkey. BESS can be beneficial, and its prices may decrease in the coming years. But the investments of BESS will be difficult to implement in Turkey if battery supply is not possible economically. Similarly, new regulations and changes need to be made to implement energy storage systems in the existing electricity and market management. For this reason, it is of great importance to carry out preliminary studies for energy storage systems based on different technology, usable services, market, and operational regulation in Turkey.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank TEIAS which is transmission system operator in Turkey for sharing system frequency data of grid and primary frequency capacity prices (<https://www.teias.gov.tr/>).

REFERENCES

- [1] The International Renewable Energy Agency (IRENA), ‘Renewable capacity highlights’, The International Renewable Energy Agency (IRENA). Accessed: Jan. 28, 2022. [Online]. Available: www.irena.org/Statistics
- [2] H. A. Behabtu *et al.*, ‘A Review of Energy Storage Technologies’ Application Potentials in Renewable Energy Sources Grid Integration’, *Sustainability*, vol. 12, no. 24, Art. no. 24, Jan. 2020, doi: 10.3390/su122410511.
- [3] ‘IEA, Renewables 2020’, *IEA*. <https://www.iea.org/reports/renewables-2020> (accessed Apr. 06, 2021).
- [4] H. Kondziella and T. Bruckner, ‘Flexibility requirements of renewable energy based electricity systems – a review of research results and methodologies’, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 53, pp. 10–22, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.07.199.
- [5] M. C. Kocer *et al.*, ‘Assessment of Battery Storage Technologies for a Turkish Power Network’, *Sustainability*, vol. 11, no. 13, Art. no. 13, Jan. 2019, doi: 10.3390/su11133669.
- [6] ‘Electricity storage and renewables: Costs and markets to 2030’, IRENA, IRENA, 2017. Accessed: Apr. 06, 2021. [Online]. Available: [/publications/2017/Oct/Electricity-storage-and-renewables-costs-and-markets](http://publications/2017/Oct/Electricity-storage-and-renewables-costs-and-markets)
- [7] İslam Şafak BAYRAM, ‘Akıllı Şebekelerde Rassal Modelleme ile Enerji Depolama Sistemi Kapasite Hesaplaması’, vol. 7, no. 1, 225AD, doi: DOI: 10.29109/gujsc.498838.
- [8] SHURA, ‘Costs and benefits of options to increase system flexibility’, Shura Enerji Dönüşü Merkezi, Jul. 2020.
- [9] J. Liu, C. Hu, A. Kimber, and Z. Wang, ‘Uses, Cost-Benefit Analysis, and Markets of Energy Storage Systems for Electric Grid Applications’, *J. Energy Storage*, vol. 32, p. 101731, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101731.
- [10] N. Chatrungs, ‘Battery Energy Storage System (BESS) and Development of Grid Scale BESS in EGAT’, in *2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia (GTD Asia)*, Mar. 2019, pp. 589–593. doi: 10.1109/GTDAsia.2019.8715953.
- [11] M. T. Lawder *et al.*, ‘Battery Energy Storage System (BESS) and Battery Management System (BMS) for Grid-Scale Applications’, *Proc. IEEE*, vol. 102, no. 6, pp. 1014–1030, Jun. 2014, doi: 10.1109/JPROC.2014.2317451.
- [12] R. Hollinger, A. M. Cortes, and T. Erge, ‘Fast Frequency Response with BESS: A Comparative Analysis of Germany, Great Britain and Sweden’, in *2018 15th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, Jun. 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/EEM.2018.8469998.

- [13] T. Thien, D. Schweer, D. vom Stein, A. Moser, and D. U. Sauer, 'Real-world operating strategy and sensitivity analysis of frequency containment reserve provision with battery energy storage systems in the german market', *J. Energy Storage*, vol. 13, pp. 143–163, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.est.2017.06.012.
- [14] D. Mejía-Giraldo, G. Velásquez-Gomez, N. Muñoz-Galeano, J. B. Cano-Quintero, and S. Lemos-Cano, 'A BESS Sizing Strategy for Primary Frequency Regulation Support of Solar Photovoltaic Plants', *Energies*, vol. 12, no. 2, Art. no. 2, Jan. 2019, doi: 10.3390/en12020317.
- [15] B. Knutel, A. Pierzyńska, M. Dębowski, P. Bukowski, and A. Dyjakon, 'Assessment of Energy Storage from Photovoltaic Installations in Poland Using Batteries or Hydrogen', *Energies*, vol. 13, no. 15, Art. no. 15, Jan. 2020, doi: 10.3390/en13154023.
- [16] K. Berg, M. Resch, T. Weniger, and S. Simonsen, 'Economic evaluation of operation strategies for battery systems in football stadiums: A Norwegian case study', *J. Energy Storage*, vol. 34, p. 102190, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.est.2020.102190.
- [17] K. Smith, A. Saxon, M. Keyser, B. Lundstrom, Z. Cao, and A. Roc, 'Life prediction model for grid-connected Li-ion battery energy storage system', in *2017 American Control Conference (ACC)*, May 2017, pp. 4062–4068. doi: 10.23919/ACC.2017.7963578.
- [18] M. Mureddu, A. Facchini, and A. Damiano, 'A Statistical Approach for Modeling the Aging Effects in Li-Ion Energy Storage Systems', *IEEE Access*, vol. 6, pp. 42196–42206, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2859817.
- [19] N. Andrenacci, E. Chiodo, D. Lauria, and F. Mottola, 'Life Cycle Estimation of Battery Energy Storage Systems for Primary Frequency Regulation', *Energies*, vol. 11, no. 12, Art. no. 12, Dec. 2018, doi: 10.3390/en11123320.
- [20] A. Filippa, S. Hashemi, and C. Træholt, 'Economic Evaluation of Frequency Reserve Provision using Battery Energy Storage', in *2019 IEEE 2nd International Conference on Renewable Energy and Power Engineering (REPE)*, Nov. 2019, pp. 160–165. doi: 10.1109/REPE48501.2019.9025133.
- [21] B. Marchi, M. Pasetti, and S. Zanoni, 'Life Cycle Cost Analysis for BESS Optimal Sizing', *Energy Procedia*, vol. 113, pp. 127–134, May 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.04.034.
- [22] Y. Zhang, P. E. Campana, A. Lundblad, and J. Yan, 'Comparative study of hydrogen storage and battery storage in grid connected photovoltaic system: Storage sizing and rule-based operation', *Appl. Energy*, vol. 201, pp. 397–411, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.03.123.
- [23] K. S. Agbli, S. Portebos, and M. Salomon, 'Battery Energy Storage System Economic Benefits Assessment on a Network Frequency Control', *Int. J. Energy Power Eng.*, vol. 14, no. 10, pp. 326–336, Sep. 2020.
- [24] C. K. Das *et al.*, 'Optimal sizing of a utility-scale energy storage system in transmission networks to improve frequency response', *J. Energy Storage*, vol. 29, p. 101315, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101315.
- [25] L. Maeyaert, L. Vandeveld, and T. Döring, 'Battery Storage for Ancillary Services in Smart Distribution Grids', *J. Energy Storage*, vol. 30, p. 101524, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101524.
- [26] EMRA | Energy Market Regulatory Authority, *Turkey Electricity Grid Codes*. Accessed: Apr. 19, 2021. [Online]. Available: <https://www.epdk.gov.tr/Home/En>
- [27] S. Jansson, *Evaluation of KPIs and Battery Usage of Li-ion BESS for FCR Application*. 2019. Accessed: Apr. 19, 2021. [Online]. Available: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:uu:diva-394015>

- [28] M. Koller, M. González Vayá, A. Chacko, T. Borsche, and A. Ulbig, 'Primary control reserves provision with battery energy storage systems in the largest European ancillary services cooperation', in *Set of papers, CIGRE session 46 : 21-26 August 2016, Paris*, 2016, p. 361. Accessed: Apr. 30, 2021. [Online]. Available: <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/120615>
- [29] G. Yan, D. Liu, J. Li, and G. Mu, 'A cost accounting method of the Li-ion battery energy storage system for frequency regulation considering the effect of life degradation', *Prot. Control Mod. Power Syst.*, vol. 3, no. 1, p. 4, Feb. 2018, doi: 10.1186/s41601-018-0076-2.
- [30] W. Y. Choi, K. S. Kook, and G. R. Yu, 'Control Strategy of BESS for Providing Both Virtual Inertia and Primary Frequency Response in the Korean Power System', *Energies*, vol. 12, no. 21, Art. no. 21, Jan. 2019, doi: 10.3390/en12214060.
- [31] B. Gundogdu and D. T. Gladwin, 'A Fast Battery Cycle Counting Method for Grid-Tied Battery Energy Storage System Subjected to Microcycles', in *2018 International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, Mar. 2018, pp. 1–4. doi: 10.1109/IEECON.2018.8712263.
- [32] L. Cupelli, N. Barve, and A. Monti, 'Optimal sizing of data center battery energy storage system for provision of frequency containment reserve', in *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Oct. 2017, pp. 7185–7190. doi: 10.1109/IECON.2017.8217257.
- [33] A. Barré, B. Deguilhem, S. Grolleau, M. Gérard, F. Suard, and D. Riu, 'A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications', *J. Power Sources*, vol. 241, pp. 680–689, Nov. 2013, doi: 10.1016/j.jpowsour.2013.05.040.
- [34] M. Sandelic, D.-I. Stroe, and F. Iov, 'Battery Storage-Based Frequency Containment Reserves in Large Wind Penetrated Scenarios: A Practical Approach to Sizing', *Energies*, vol. 11, no. 11, Art. no. 11, Nov. 2018, doi: 10.3390/en11113065.
- [35] A. Zeh, M. Müller, M. Naumann, H. C. Hesse, A. Jossen, and R. Witzmann, 'Fundamentals of Using Battery Energy Storage Systems to Provide Primary Control Reserves in Germany', *Batteries*, vol. 2, no. 3, Art. no. 3, Sep. 2016, doi: 10.3390/batteries2030029.
- [36] M. van Eck, 'BESS investment decisions', 2019. <http://localhost/handle/1874/394868> (accessed Apr. 29, 2021).
- [37] NRECA, 'Battery Energy Storage Technology Overview and Co-op Case Studies', National Rural Electric Cooperative Association, 2020. Accessed: Apr. 29, 2021. [Online]. Available: <https://www.cooperative.com/topics/distributed-energy-resources/Pages/Battery-Energy-Storage-Overview-Report.aspx>
- [38] '2020 Grid Energy Storage Technology Cost and Performance Assessment', U.S. Department of Energy's Research Technology Investment Committee, 2020. Accessed: Apr. 29, 2021. [Online]. Available: <https://www.energy.gov/energy-storage-grand-challenge/downloads/2020-grid-energy-storage-technology-cost-and-performance>
- [39] K. Mongird *et al.*, 'An Evaluation of Energy Storage Cost and Performance Characteristics', *Energies*, vol. 13, no. 13, Art. no. 13, Jan. 2020, doi: 10.3390/en13133307.
- [40] Mathew Roling, Joseph M Klobucar, PE, Lukas Rowland, PE, Carl Mannheim, and Cristina Piekarcz, '2019 Energy Storage Technology Assessment', Platte River Power Authority, <https://www.prpa.org/>. Accessed: Apr. 29, 2021. [Online]. Available: <https://www.prpa.org/wp-content/uploads/2019/10/2019-Energy-Storage-Technology-Assessment.pdf>

- [41] C. Yianni, M. Florides, S. Afxentis, V. Efthymiou, and G. E. Georghiou, 'Economic viability of battery energy storage system applications', in *2018 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*, Jun. 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/ENERGYCON.2018.8398740.
- [42] L. Meng *et al.*, 'Fast Frequency Response From Energy Storage Systems—A Review of Grid Standards, Projects and Technical Issues', *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 11, no. 2, pp. 1566–1581, Mar. 2020, doi: 10.1109/TSG.2019.2940173.
- [43] M. Świerczyński *et al.*, 'Field Experience from Li-Ion BESS Delivering Primary Frequency Regulation in the Danish Energy Market', *ECS Trans.*, vol. 61, no. 37, p. 1, Sep. 2014, doi: 10.1149/06137.0001ecst.



Enhancement of impact toughness properties of Al 7075 alloy via double aging heat treatment

Onur ALTUNTAŞ^{1*}

¹ National Defense University, Alparslan Defense Sciences and National Security Institute, Department of Warfare Weapons and Tools, Ankara, Türkiye

Article Info

Research article
Received:23/04/2022
Revision:28/04/2022
Accepted:19/05/2022

Keywords

Al 7075
double aging
microstructure
XRD analysis
impact toughness

Abstract

In this study, Charpy impact test specimens were prepared by cutting Al 7075 alloy according to ASTM-E23 standards. The prepared test specimens were dissolved in a single-phase region for 1 hour at 480°C in vacuum atmosphere and artificially aged at 120°C for 24 hours after quenching. After the first step aging heat treatment applied, the specimens were artificially aged for 5-50 hours at 180°C for the second time. Microstructural characterization and fracture surface analyzes of the specimens were determined using SEM (Scanning Electron Microscope) device, crystallographic analysis of the precipitated phases were determined using XRD (X-ray diffraction) device. The increase in the amount of η_1 phase (MgZn₂) with increasing double aging heat treatment time was effective in increasing the strength. After 10 hours of double aging heat treatment, the impact toughness value is improved by 300% compared to the single aged condition.

1. INTRODUCTION

7XXX series (Al-Zn-Mg-Cu) aluminum alloys are widely used in automobile, aerospace and defense industries due to their low density, easy formability, high mechanical and corrosive resistance [1-3]. With the increase in global fuel prices, the advantage of using aluminum alloys in vehicles comes to the fore. It has been stated that by reducing the weight of land vehicles by 10%, fuel efficiency can be increased by 5% and greenhouse gas emissions can be significantly reduced. In addition, increasing the range of electric vehicles by reducing the weight of the automobile is an important financial indicator [4,5]. Microstructure, corrosive and mechanical properties of aluminum alloys can be improved by applying aging heat treatments with different cycles, thermo-mechanical methods and retrogression and re-aging (RRA) heat treatment processes [6-10]. Sequence of precipitation of artificially aged 7000 series aluminum alloys;

Solid solution (SS) → GP zones → η' → η (MgZn₂)

It has been reported that GP regions [11,12] and metastable η' (MgZn₂) precipitates [13,14] are effective in the increase in strength of the alloy as a result of aging heat treatment. In the study by Y. Fan et al. [15] in which the effects of single and two-stage aging processes applied to Al 7075 alloy on age hardening and precipitation behavior were compared, it was reported that the hardness was 184 HV after single aging, 182 HV after double aging, and mechanical properties gave similar results. In a study by Cai, SW et al. [16] investigating the effects of single and double aging heat treatment applied to Al 7075 alloy on strength, in double aging heat treatment the hardness of the alloy is double peak and the strengthening stage of the first peak aging state is mainly high density GP regions. , and the strengthening phase of the second peak aging state was reported to be the η' (MgZn₂) phases.

Many studies [17-20] have been carried out on the thermodynamic and crystallographic formation processes of the precipitations of Al7075 alloy formed as a result of aging heat treatment, and in this study, the effects of double aging at different times on microstructural and crystallographic properties and impact toughness will be examined.

2. MATERIALS AND METHODS

Commercially purchased 10 mm thick Al 7075 sheet was used in the experimental studies. V-notched impact test specimens conforming to ASTM-E23 standard were cut with the help of Mitsubishi MV1200S CNC Wire Erosion cutting device and made ready for heat treatment. The chemical composition of the Al 7075 alloy used as the starting specimen was determined with a spectrometer (Q4 TASMEN) and presented in Table 1.

Table 1. Chemical composition of Al 7075 alloy (% by weight)

Standart (TS-EN 573-3)	wt (%)								
	Fe	Si	Mn	Cr	Ti	Cu	Mg	Zn	Al
	0,12	0,07	0,03	0,19	0,05	1,6	2,7	5,8	Balance

The dissolution of the specimens in the single-phase region and the subsequent artificial aging heat treatments were carried out in a 5×10^{-2} Pa vacuum atmosphere in a chamber type horizontal high temperature furnace. After solid solution heat treatment the specimens for 1 hour at 480°C , they were rapidly cooled in cold water to form a supersaturated solid solution structure and then artificially aged at 120°C for 24 hours. These single-aged serial specimens were coded as FA. Some FA specimens were re-aged a second time for 5-50 hours at 180°C and were coded as DA5-DA50, respectively. The schematic representation of the heat treatments applied to the specimens is given in Figure 1.

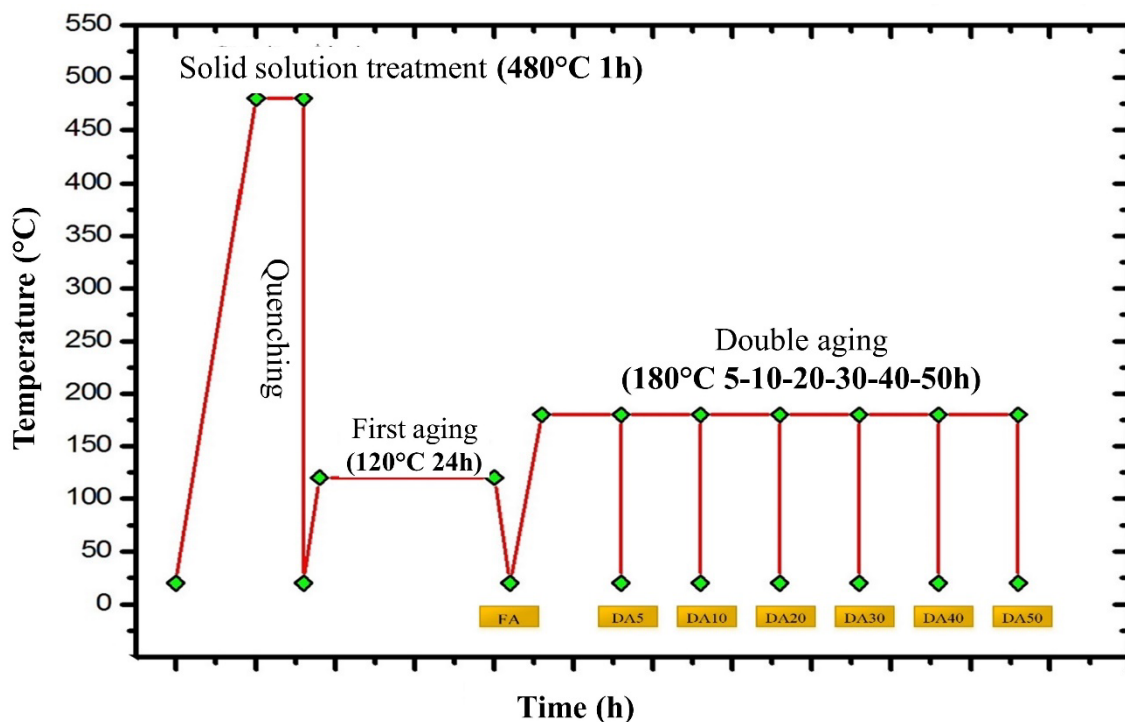


Figure 1. Schematic representation of the double aging heat treatment applied to the specimens

The HV1 Vickers macro hardness values of the specimens were determined using 1 kg (9,807N) indenter for 15s and according to the ASTM E384 with HMV-2 Shimadzu Hardness tester. The tests of V-notched Charpy impact specimens prepared according to ASTM E23 standard were carried out at room temperature in an Instron –Wolpert brand impact tester with 300 J hammer capacity. Microstructure and fracture surface analyzes were performed using the JEOL JSM-6060LV Scanning Electron Microscope (SEM). For microstructure studies, all specimens were etched with Keller solution (95% H_2O , 1.5% HCl , 1% HF and 2.5% HNO_3) after conventional metallography processes. After heat treatment detection of Al and MgZn_2

precipitated and the other possible phases were made with Bruker D8 Advanced X-ray device using CuK α ($\lambda=0.154$ nm) target and step size 0.06 $^{\circ}$ /s..

3.RESULTS

In Figure 2a, the SEM microstructure image of the FA specimen, which was treated with conventional aging heat treatment in single step, is given. It is seen that the grains due to rolling are oriented in the microstructure. Spheroidal precipitates (in circles) with an average diameter of 9 μ m in the Al matrix are thought to be metastable η_1 phases [21]. In the studies [22,23], it is supported that the very small size (<4nm) precipitates indicated by the red arrow are GP regions.

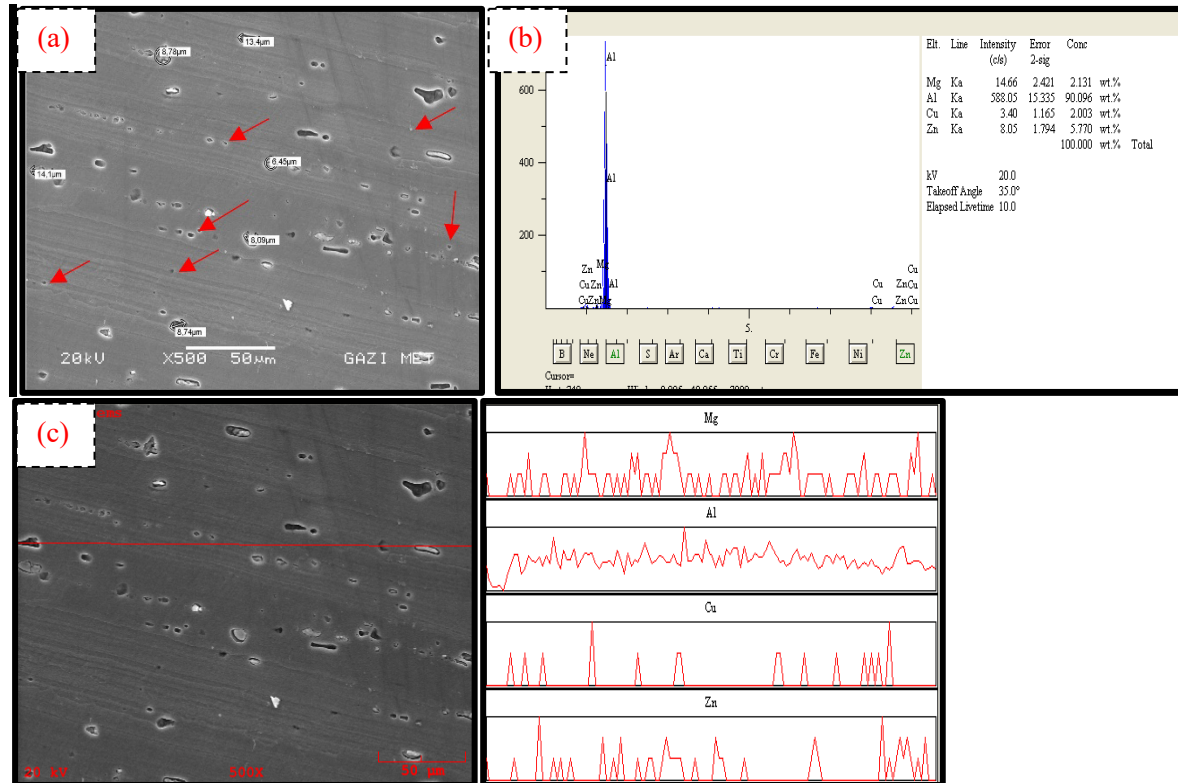


Figure 2. Microstructure images of the FA specimen (a) SEM, (b) General EDS and (c) Linear EDS

The precipitates characterization performed on both conventional single aged and double aged specimens at different times shows several disc-like stable precipitates and a large amount of fine precipitate in both of these two specimens. It was also observed that the precipitates grew with increasing second aging time. This can be explained by the Ostwald ripening, which has a more stable thermodynamic structure and small particles disappear [24,25]. As a result of coalescence and Ostwald ripening, spherical precipitates appear in the microstructures with some increase in average grain size (Fig.3d-f).

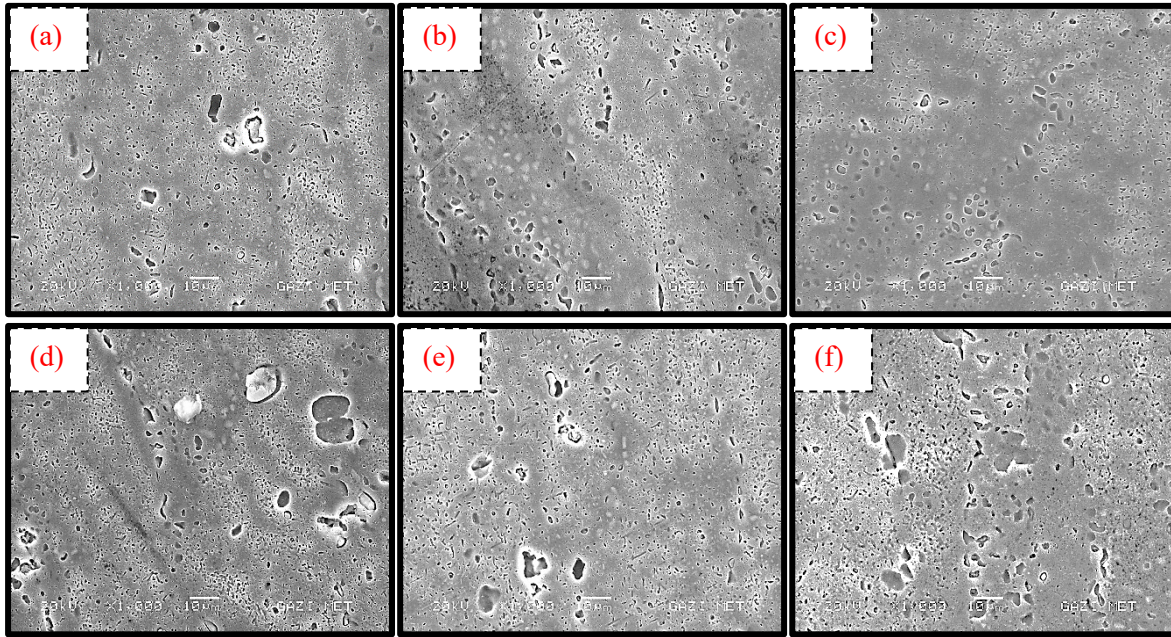


Figure 3. SEM microstructure images of specimens double aged at different times; (a) DA5, (b) DA10, (c) DA20, (d) DA30, (e) DA40, (f) DA50

In Figure 4, the impact toughness and hardness values of all specimens are presented together graphically. The impact toughness value of the DA10 specimen increased by approximately 300% compared to the initial specimen (FA). It is observed that the hardness and impact toughness increase together in the double aging heat treatment process up to 10 hours. The highest hardness and impact toughness were determined as 178 HV1 and 31 J.cm⁻² respectively in the DA10 specimen. It is thought that this situation is caused by the GP and η^1 phases, which precipitated in large amounts in the matrix. Although the hardness values of DA20-DA50 specimens decreased significantly the impact toughness values decreased relatively. This situation is thought to be caused by the η phases, which are abundant in the matrix due to over aging.

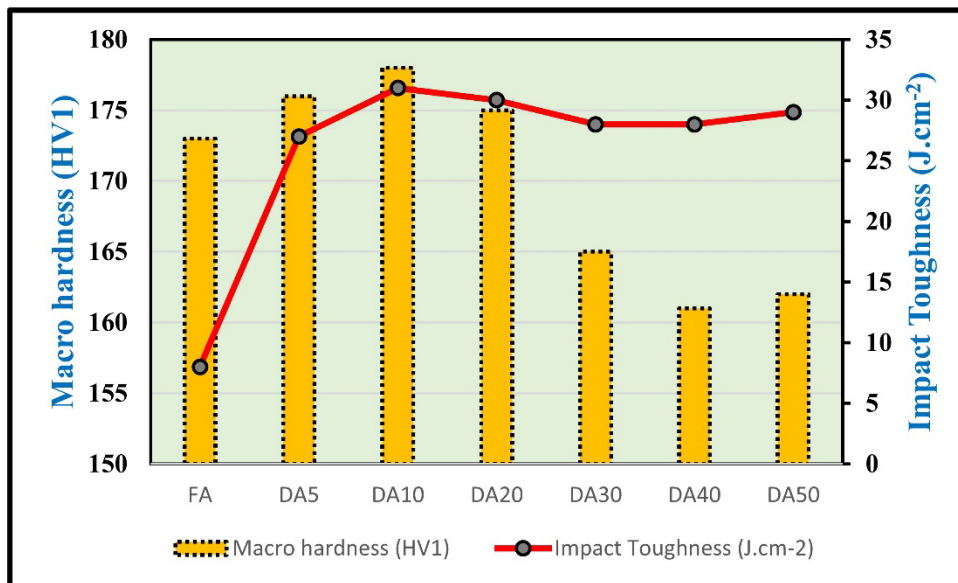


Figure 4. The graph of macro hardness (HV1) and impact toughness (J.cm⁻²) values of the specimens

Figure 5 illustrates the SEM fractograph of all specimens. In Fig.5a, in the fracture surface photograph of the FA specimen, there are very dense cleavage separations as well as a small amount of dimples. This is the most important indicator of brittle fractures due to low impact toughness. In figure 5(b-f), the fracture morphologies of the DA5-DA50 specimens which were second aged are presented respectively. The presence of very intense dimples is striking in all double-aged specimens. It shows that high impact toughness and ductile fracture are provided together. It is also observed that the dimples become larger with increasing double aging time. It is thought that the strength increases with the increase of the secondary phase particles formed in the depressions of the fracture surfaces [26,27].

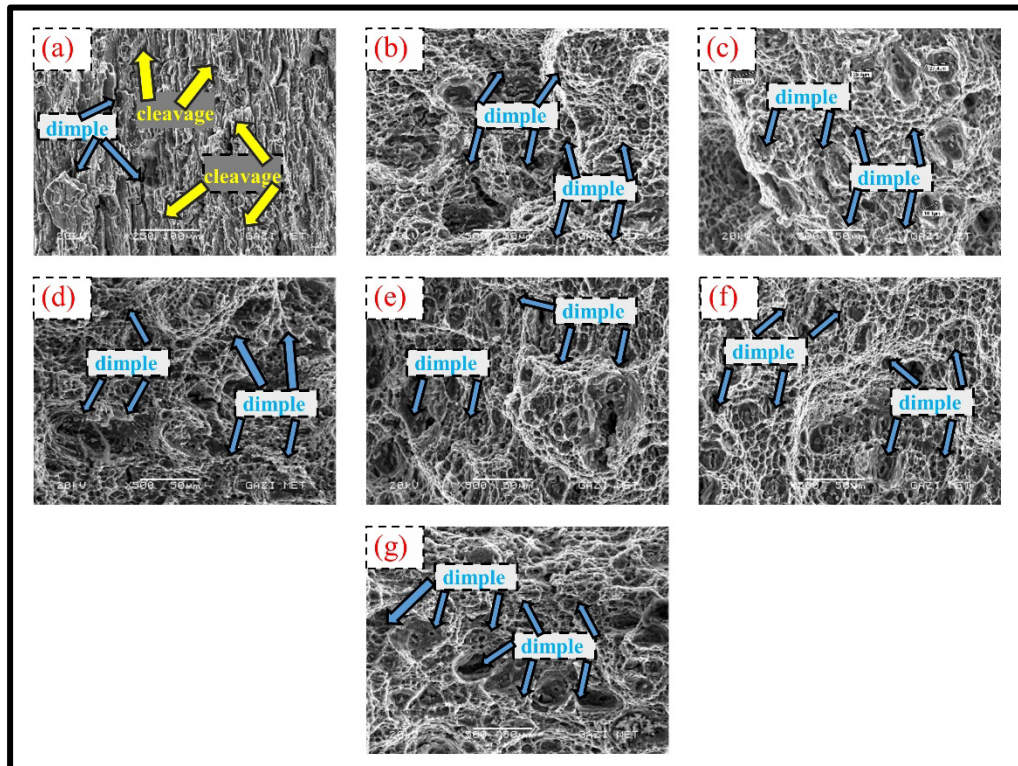


Figure 5. Fracture surface morphology of the (a) FA, (b) DA5, (c) DA10, (d) DA20, (e) DA30, (f) DA40, (g) DA50 specimens.

In Figure 6, the XRD results of the specimens are presented. In the XRD graph the main Al peaks in (111), (200), (220) and (311) planes respectively and $MgZn_2$ peaks in the form of noise are seen in all heat treatment series. This supports that the microstructure is formed by α -Al and $MgZn_2$ precipitates [28]. As a result of different heat treatment and thermo-mechanical treatments applied to the specimens the intensity and widths of the peaks can change [29,30]. As a result of the double aging process, the peak intensity of the (111) plane at 38° decreased compared to the FA specimen while all other Al peaks intensities are increased significantly.

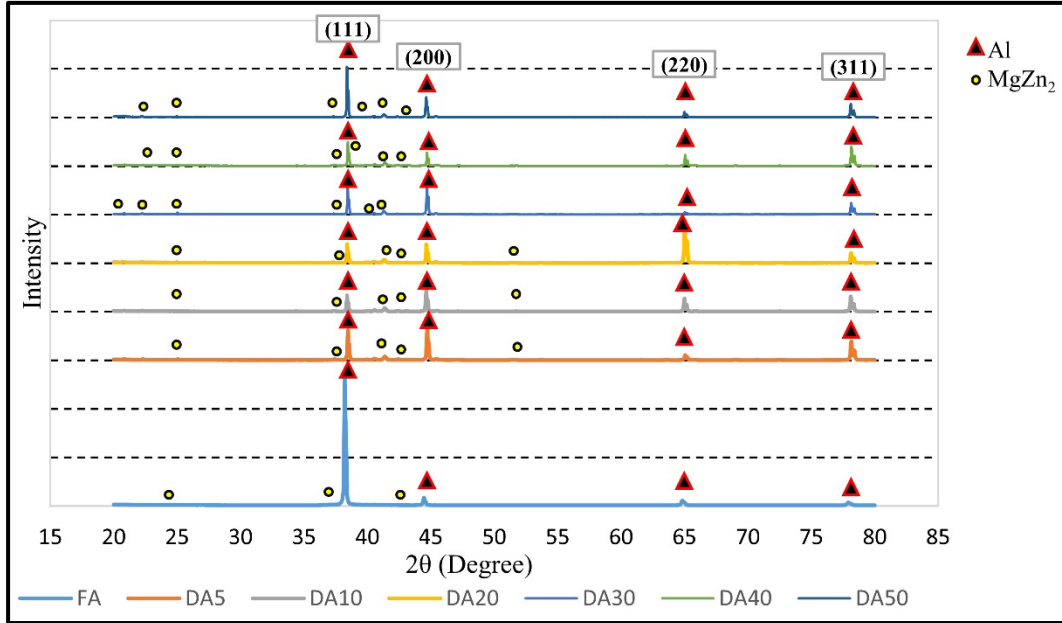


Figure 6. XRD patterns for all of specimens.

4.CONCLUSIONS

The following results were obtained for the Al 7075 alloy, which was subjected to double aging heat treatment at different times.

- 1- The highest hardness and impact toughness values were determined as 178 HV1 and 31 J.cm⁻² in the DA10 specimen respectively.
- 2- An increase was observed in the precipitated MgZn₂ phases depending on the increasing secondary heat treatment time.
- 3- It was determined by the mechanical properties that the samples exhibited over aging properties with secondary aging of 20 hours and above.
- 4- The impact toughness value of the DA10 specimen has been improved by approximately 300% compared to the initial specimen (FA).

ACKNOWLEDGEMENTS

This study has been financially supported by the Gazi University Scientific Research Projects Coordination Unit [under Project Number FGA-2021-7002].

REFERENCES

- [1] Han, N. M., et al. "Effect of solution treatment on the strength and fracture toughness of aluminum alloy 7050." *Journal of Alloys and Compounds* 509.10 (2011): 4138-4145.
- [2] Altuntaş, Gözde, and Bülent Bostan. "Al–Zn–Mg–Cu Alaşımının Kristalografisine RRA Isıl İşlemi Etkilerinin İncelenmesi." *Politeknik Dergisi*: 1-1.
- [3] Mondolfo, Lucio F. *Aluminum alloys: structure and properties*. Elsevier, 2013.

- [4] Karakoyun, F., D. Kiritsis, and K. Martinsen. "Holistic life cycle approach for lightweight automotive components." *Metallurgical Research & Technology* 111.3 (2014): 137-146.
- [5] Ma, Wenyu, et al. "Influence of solution heat treatment on mechanical response and fracture behaviour of aluminium alloy sheets: an experimental study." *Materials & Design* 88 (2015): 1119-1126.
- [6] Ozer, A., "The microstructures and mechanical properties of Al-15Si-2.5 Cu-0.5 Mg/(wt%) B₄C composites produced through hot pressing technique and subjected to hot extrusion, *Materials Chemistry and Physics*, 183, 288-296. (2016).
- [7] Srinivasan, Nedunchezian, et al. "The role of brass texture on the deformation response of 7075-T651 aluminum alloy under equi-biaxial tension." *Materials Science and Engineering: A* 812 (2021): 141133.
- [8] Aksöz, S., & Bostan, B., "Effects of ageing and cryoageing treatments on microstructure and hardness properties of AA2014–SiC MMCs" *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 71(8), 2035-2042, (2018).
- [9] Altuntaş, Gözde, Onur Altuntaş, and Bülent Bostan. "Characterization of Al-7075/T651 Alloy by RRA Heat Treatment and Different Pre-deformation Effects." *Transactions of the Indian Institute of Metals* 74.12 (2021): 3025-3033.
- [10] Kaplan, Yavuz, et al. "The effect of aging processes on tribo-metallurgy properties of Al based ternary Alloys product by P/M technique." *Science of Sintering* 52.4 (2020).
- [11] Berg, L. K., et al. "GP-zones in Al–Zn–Mg alloys and their role in artificial aging." *Acta Materialia* 49.17 (2001): 3443-3451.
- [12] Song, R. G., and Q. Z. Zhang. "Heat Treatment Optimization For 7175 Aluminum Alloy By Genetic Algorithm." *Materials Science and Engineering: C* 17.1-2 (2001): 133-137.
- [13] Liu, J. Z., et al. "Revisiting The Precipitation Sequence In Al–Zn–Mg-Based Alloys By High-Resolution Transmission Electron Microscopy." *Scripta Materialia* 63.11 (2010): 1061-1064.
- [14] Zhou, Pu, et al. "Mechanical Behavior And Deformation Mechanism Of 7075 Aluminum Alloy Under Solution Induced Dynamic Strain Aging." *Materials Science and Engineering: A* 759 (2019): 498-505.
- [15] Fan, Yun, et al. "Comparisons of Age Hardening and Precipitation Behavior in 7075 Alloy Under Single and Double-Stage Aging Treatments." *Metals and Materials International* 27.10 (2021): 4204-4215.
- [16] Cai, S. W., Y. He, and R. G. Song. "Study on the Strengthening Mechanism of Two-Stage Double-Peaks Aging in 7075 Aluminum Alloy." *Transactions of the Indian Institute of Metals* 73.1 (2020): 109-117.
- [17] Emani, S. V., et al. "Double aging and thermomechanical heat treatment of AA7075 aluminum alloy extrusions." *Journal of materials science* 44.23 (2009): 6384-6391.
- [18] Kverneland, A., et al. "Transformations and structures in the Al–Zn–Mg alloy system: A diffraction study using synchrotron radiation and electron precession." *Materials Science and Engineering: A* 528.3 (2011): 880-887.
- [19] Lechner, Wolfgang, et al. "Microstructure and vacancy-type defects in high-pressure torsion deformed Al–Cu–Mg–Mn alloy." *Scripta materialia* 61.4 (2009): 383-386.
- [20] Dai, Pan, et al. "Nano-scale precipitate evolution and mechanical properties of 7085 aluminum alloy during thermal exposure." *Materials Science and Engineering: A* 729 (2018): 411-422.

- [21] Harkness, S. D., and J. J. Hren. "An investigation of strengthening by spherical coherent GP Zones." *Metallurgical Transactions* 1.1 (1970): 43-49.
- [22] Osamura, K., et al. "Structure of GP zones in an Al-1.7 at.% Cu alloy aged for 14 years at room temperature." *Acta Metallurgica* 31.10 (1983): 1669-1673.
- [23] Liu, Siliang, et al. "On the atomic model of Guinier-Preston zones in Al-Mg-Si-Cu alloys." *Journal of Alloys and Compounds* 745 (2018): 644-650.
- [24] Jiang, Jufu, et al. "Comparison of microstructural evolution of 7075 aluminum alloy fabricated by SIMA and RAP." *Journal of Materials Processing Technology* 238 (2016): 361-372.
- [25] Fu, Jin-Long, Hong-Jun Jiang, and Kai-Kun Wang. "Influence of processing parameters on microstructural evolution and tensile properties for 7075 Al alloy prepared by an ECAP-based SIMA process." *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)* 31.4 (2018): 337-350.
- [26] Higgins R A, *The Properties of Engineering Materials*, Industrial Press Inc. (1994).
- [27] Putra, Ichsan S., and Jaap Schijve. "Crack opening stress measurements of surface cracks in 7075-T6 aluminium alloy plate specimen through electron fractography." *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 15.4 (1992): 323-338.
- [28] Mo, Taiqian, et al. "Enhancing of mechanical properties of rolled 1100/7075 Al alloys laminated metal composite by thermomechanical treatments." *Materials Science and Engineering: A* 800 (2021): 140313.
- [29] Krishna, N. Naga, et al. "Mechanical anisotropy and microstructural changes during cryorolling of Al-Mg-Si alloy." *Materials Characterization* 107 (2015): 302-308.
- [30] Liu, Yan, et al. "Heating aging behavior of Al-8.35 Zn-2.5 Mg-2.25 Cu alloy." *Materials & Design* 60 (2014): 116-124.

LoRa Modulation based Soccer Pitch Lighting System Application

Emre ERKAN¹  Şehmus FİDAN¹  Hidayet OĞRAŞ^{1,*} 

¹Batman University, Department of Electronic Communication Technology, 72100, Merkez/BATMAN

Graphical/Tabular Abstract

In this study, a communication system based on LoRa modulation is proposed to fast and economic lighting system for soccer pitches. In the proposed system, effective lighting system can be easily provided by the designed main control unit and LED projector control cards. In the application, LoRa modulated signal is transmitted wirelessly using 433 MHz frequency band.

Article Info:

Research article
Received: 03/12/2021
Revision: 20/02/2022
Accepted: 07/03/2022

Highlights

LoRaWAN Network.
Control of LED drivers.
Design of circuit boards.

Keywords

LoRa Modulation
Technique
Long Distance
Communication
Lighting of Soccer Pitch

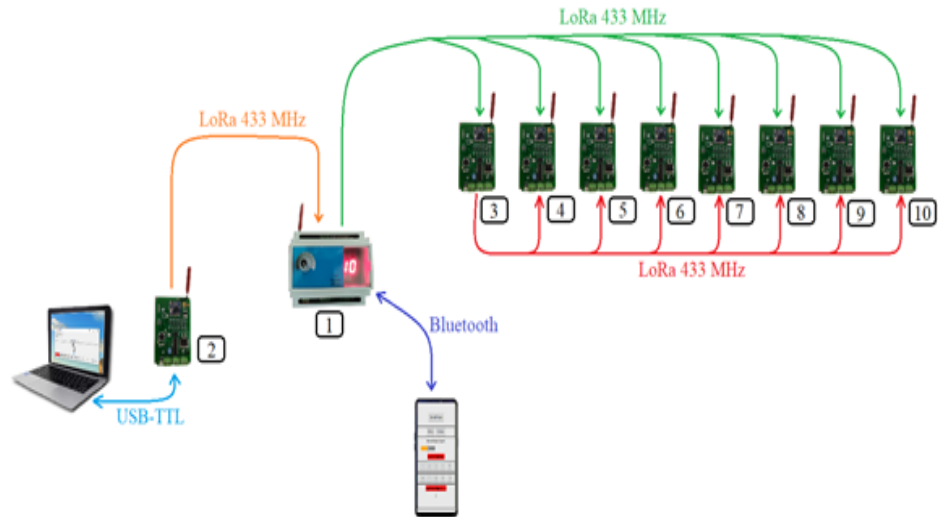


Figure A. Operating function of the proposed system

Purpose: The main purpose of the proposed system is to develop a fast, economical and easily applicable system for an efficient lighting operation in soccer pitches. The lack of the workload and having long-lasting equipment are other important advantages of this system compared to existing LED lighting systems in this field.

Theory and Methods: The proposed system includes low bit data rate with long distance communication application using LPWAN architecture. The LED projector board and the main control unit that play a major role in the operation of the system are developed and programmed to support the LoRa protocol.

Results: The developed LoRa based electronic systems have been applied in a soccer pitch in Diyarbakır. After the control tests, software and hardware problems have been solved and an effective equipment with a simple user interface emerged. The developed system has worked successfully for about 8 months without fail.

Conclusion: It is concluded that the developed system provides important advantages such as user-friendly, easy applicability and quick response. In addition, it has been observed that the developed system exhibits satisfactory performance at long distance communication.



LoRa Modulation based Soccer Pitch Lighting System Application

Emre ERKAN¹ Şehmus FİDAN¹ Hidayet OĞRAŞ^{1,*}

¹Batman University, Department of Electronic Communication Technology, 72100, Merkez/BATMAN

Abstract

With the lightening of the soccer pitch, which is not a new implementation, new improvements are needed thanks to new technology. Especially, while the concept of internet of things is gaining more and more place in our lives day by day, it is inevitable to make the lighting equipment more technologic status in this context. In cases where the lighting level of the soccer pitch needs to be changed, control signals can be transmitted as cabled or wirelessly. However, using signal cable has some disadvantages for the control of LED driver that is used on the lighting projectors of soccer pitch. In case of controlling LED drivers used for lighting soccer pitch with signal cables, the importance of carrying safe and low-cost wireless signal comes along clearly if considered the cost of the cable, labor and the environment affected by the electrical noise. With this study, the application of an innovative communication technique based on LoRa (Long Range Radio) modulation has been developed. Thus, it is aimed to establish know-how about the LoRa-based equipment in our country. Developed LoRa-based equipment has been implemented in a stadium in Diyarbakır province. After field tests, software/hardware problems have been solved and user-friendly, ready-to-use product has emerged. The developed system has worked successfully for about 8 months without collapsing. In the study, it has been shown that the LoRa-based wireless communication system has advantages of low cost, easy-assembled and less maintenance.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 03/12/2021
Düzeltilme: 20/02/2022
Kabul: 07/03/2022

Keywords

*LoRa Modulation
Technique
Long Distance
Communication
Lighting of Soccer Pitch*

Anahtar Kelimeler

*LoRa modülasyon tekniği
Uzun alan Haberleşmesi
Futbol saha aydınlatması*

LoRa Modülasyon tabanlı Saha Aydınlatma Sistemi Uygulaması

Öz

Futbol sahalarının aydınlatılması yeni bir uygulama olmamakla birlikte ilerleyen teknoloji sayesinde yeni geliştirmelere ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle nesnelerin interneti kavramı gün geçtikçe hayatımızda daha fazla yer edinirken aydınlatma ekipmanlarının da bu kapsamda daha teknolojik bir hale getirilmesi kaçınılmazdır. Futbol sahasının aydınlatma seviyesinin değiştirilmesi gereken durumlarda kontrol sinyalleri kablolu veya kablosuz olarak iletilir. Ancak futbol sahası aydınlatma projektörlerinde kullanılan LED sürücülerin kontrolü için sinyal kablosu kullanılmasının önemli dezavantajları vardır. Saha aydınlatmasında kullanılan LED sürücülerin sinyal kablolarıyla kontrol edilmesi durumunda, kablo maliyeti, işçilik ve ortamdaki elektriksel gürültülerden etkilenmesi gibi problemleri olduğundan güvenli ve düşük maliyetli kablosuz sinyal taşımının önemi net olarak ortaya çıkmaktadır. Yapılan çalışma ile LoRa (Long Range Radio) modülasyonunu temel alan yenilikçi bir haberleşme tekniğinin uygulaması geliştirilmiştir. Böylelikle ülkemizde geliştirilen donanımlar hakkında bilgi birikiminin oluşması hedeflenmiştir. Geliştirilen LoRa tabanlı donanımlar, Diyarbakır ilinde bir stadyuma uygulanmıştır. Saha testleri sonrasında yazılımsal/donanımsal eksiklikleri giderilmiş ve kullanıcı dostu, kullanıma hazır bir ürün ortaya çıkmıştır. Geliştirilen sistem fonksiyonunu kaybetmeden yaklaşık 8 ay boyunca başarılı bir şekilde çalışmıştır. Çalışmada LoRa tabanlı kablosuz haberleşme sisteminin düşük maliyetli, kolay montajlı ve az bakım gerektirmesi gibi avantajlara sahip olduğu gösterilmiştir.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde nesnelerin interneti uygulamaları oldukça popüler hale gelmiştir. Nesnelerin interneti uygulamaları ile hayatımızda bulunan birçok nesnenin birbiriyle haberleşmesi ve gerektiğinde internete açılarak insanların hayatını kolaylaştırması hedeflenir. Nesnelerin interneti günümüzde akıllı ev, enerji ölçüm, güvenlik, akıllı şehir, inşaat, kamu sektörü, sağlık, tarım, hayvan takibi, taşımacılık, kargo, denizcilik, çevre gibi birçok farklı alanlarda kullanılmaktadır [1]. Nesnelerin interneti uygulamaları Bluetooth, Zig-bee, Wi-Fi, NFC, LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) gibi birçok haberleşme protokolünü kullanmaktadır. Bu haberleşme protokolleri içinde uzak alan haberleşmesi uygulamaları için kullanılan LoRaWAN protokolünün popülerliği gün geçtikçe artmaktadır [2].

LoRa, küçük veri parçalarının düşük bit hızlarıyla iletiildiği uygulamalar için son derece ideal bir yöntemdir. Veriler, Wi-Fi veya Bluetooth gibi teknolojilere kıyasla çok daha uzun mesafelere iletilebilir. Bu özellikler, LoRa' yı düşük güç modunda çalışan sensörler ve aktüatörler için çok uygun hale getirir. LoRa, 1 GHz frekans bandının altında çalışır ve dağıtıldığı bölgeye bağlı olarak 433 MHz, 868 MHz veya 915 MHz radyo bantlarını kullanır [3].

LoRa, CSS (Chirp Spread Spectrum) modülasyon tekniğine dayalı kablosuz bir haberleşme teknolojisidir [4]. Bu teknikte iletilecek olan veriler, radyo dalgaları ile kodlanır. LoRa modülasyonu düşük güç iletişimde bile çok yollu zayıflama, kanal gürültüsü ve sinyal bozulmalarına karşı dayanıklıdır. Bu özelliği sayesinde, çok uzak mesafelerde bile sağlıklı iletişim gerçekleştirilebilir. Aynı zamanda, LoRa modülasyonu diğer kablosuz veri iletim teknolojilerine göre daha düşük bant genişliğine ihtiyaç duyduğu için daha uzun mesafelerde iletişim mümkün olmaktadır [5]. LoRa modülasyonunu temel alan LoRaWAN ağ teknolojisi ise merkez sunucu ve uç cihazlar arasında yıldız topolojisini kullanarak mesajlarının iletildiği geniş ağ yapısına verilen addır. Bu mimaride kullanılan ağ geçitleri, RF bilgi paketini IP paketine dönüştüren bir köprü olarak görev üstlenmekte ve IP bağlantısı ile merkez sunucu arasında bağlantı kurmaktadır [6].

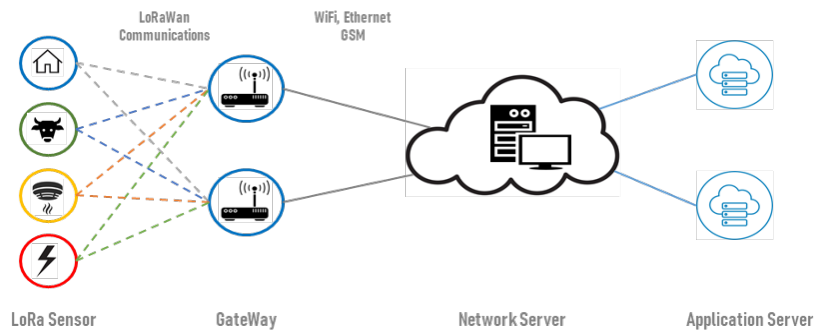
Yeni bir iletişim teknolojisi olarak kabul edilebilen LoRaWAN ağ yapısı, uzun iletim mesafeleri ve düşük güç tüketimi gibi özellikleri nedeniyle son zamanlarda daha popüler hale gelmiş ve birçok farklı alanda da kullanılmıştır. Sanchez vd. hafif tekneler ve yelkenliler için LoRa teknolojisine dayalı izleme sistemi tasarlamışlardır. Böylece düşük güç tüketimi ve bağlantı güvenilirliğe sahip oldukça gelecek vadeden sonuçlar elde ettiklerini vurgulamışlardır [7]. Bir başka çalışmada, LoRaWAN tabanlı hava kalitesi ve parçacık madde ölçülmesine yönelik uygulama gerçekleştirilmiştir [8]. Johnston vd. güç açısından verimli ve yüksek düzeyde ölçeklenebilir LoRa tabanlı bir IoT tarım sistemi tasarlamıştır [9]. Yaptıkları çalışmada sensör düğümlerinden elde ettikleri verileri uzun mesafeler boyunca LoraWan kullanarak bulut sunucuya aktarmışlardır. Catherwood vd. sağlık alanına yönelik yaptıkları çalışmada uzun mesafelerde (1.1-6 Km) idrar yolu enfeksiyonu tanısı için LoRa teknolojisini kullanmışlar [10]. Bir diğer çalışmada, LoRaWAN teknolojisi, 4G/5G mobil ağlarla sorunsuz bir şekilde entegre edilerek mobil ağ operatörlerinin mevcut altyapılarını yeniden kullanmalarına olanak tanıyan bir çözüm önerilmiştir [11]. Sonuç olarak bu çalışmalarla birlikte LoRaWAN teknolojisinin farklı endüstriyel alanlarda kullanılabilirliği öne çıkmış ve mesafe ve yüksek enerji tüketim gibi dezavantajları olan mevcut sistemlere alternatif bir çözüm sunulmuştur.

Birçok spor müsabakasının gerçekleştirildiği statlar, bir kenardan diğer kenara uzun sayılabilecek mesafelere sahiptir. Bu anlamda, saha aydınlatma sistemlerinin ışık seviyesi kontrol edilmek istendiğinde uzun mesafelerde haberleşebilen LoRa tabanlı çözüm uygun görünmektedir. Bu sebeple LoRa modülasyonunu temel alan uzun alan haberleşmesi kullanılarak kablosuz olarak bir futbol sahasının ışıklarının kontrolünü gerçekleştirmeye yönelik bir uygulama yapılmıştır. Saha aydınlatılması için kullanılan 8 adet direktte bulunan projektörler (4 direktte 8'er, 4 direktte 5'er adet) LoRa modülasyon tabanlı geliştirilen ana kontrol ünitesi ve LED projektör kontrol kartları ile kontrol edilmiştir. Uygulamanın başarısı ve etkinliği her aşamada tatmin edici bir seviyededir.

2. MATERYAL VE METOTLAR (MATERIALS AND METHODS)

2.1. LoRaWAN Ağ Protokolü (LoRaWAN Network Protocol)

LoRaWAN, LoRa modülasyon tekniği üzerine kurulmuş, düşük güçlü geniş alanlı bir ağ protokolüdür. Düşük güçlü cihazların uzun mesafeli kablosuz bağlantılar üzerinden internet bağlantılı uygulamalarla iletişim kurmasını sağlamak için tasarlanmıştır. Bu protokol temel yapı olarak cihazları kablosuz olarak internete bağlar ve uç düğüm (end-node) cihazları ile ağ geçitleri (gateway) arasındaki iletişimi yönetir. LoRaWAN'ın çok düşük güç tüketimine sahip olması, ekonomik, uzun mesafeli ve çift yönlü iletişimi desteklemesi bu sistemleri endüstriyel alanlarda kullanımını arttırmaktadır. Bu mimari yapı Şekil 1'de gösterilmiştir [22].



Şekil 1. LoRaWAN ağ mimarisi

Ağ geçitleri, standart IP bağlantıları aracılığıyla ağ sunucusuna bağlanır ve şeffaf bir köprü görevi görerek RF paketlerini IP paketlerine dönüştürür veya bunun tam tersini gerçekleştirir. Kısaca burada ağ geçitleri, sunucu ile uç cihazlar arasında çift yönlü bilgi transferi sağlar. Uç cihazlar ise yakındaki ağ geçitleriyle iletişim kurar ve tüm ağ geçitleri bir ağ sunucusuna bağlanır. LoRaWAN ağları, veri iletimi için çoklu erişim protokolü kullanır bu nedenle uç cihazların belirli ağ geçitleriyle eşleşmesine gerek yoktur. Uç cihazlardan gönderilen mesajlar, iletim kanalının boş olup olmadığına bakmadan etkili mesafe içindeki tüm ağ geçitlerinden geçerek bilgi iletişimi gerçekleşir. LoRaWAN üzerinde herhangi bir uç cihaz, ağa iki şekilde bağlanabilir: Uzaktan aktivasyon ile bir ağ anahtarı ve bir uygulama oturumunun oluşturulmasıyla veya kişisel etkinleştirmeye sağlanan basit bağlantı ile ağa eklenebilir. Bir LoRaWAN uç cihazı, genellikle pil ile çalışan bir sensör veya bir aktüatör olabilir. Sensörler, fiziksel bir hareketi veya durumu elektriksel sinyale dönüştürürken; aktüatörler ise elektriksel bir sinyalin mekanik bir duruma dönüştürülmesinden sorumludur. Dolayısıyla genellikle biri diğerini yönlendirir ve farklı sistemlerin kontrolünü gerçekleştirmek için sıklıkla beraber çalışırlar [13].

2.2. Düşük Güç Geniş Alan Ağı (Low Power Wide Area Network)

Düşük güçlü geniş alan ağı olarak adlandırılan LPWAN, sisteme bağlı cihazların düşük bit hızında uzun mesafeli iletişim yeteneklerine sahip olmasını sağlayan bir tür kablosuz telekomünikasyon ağıdır [14]. LPWAN yapısına sahip ağlar genellikle akıllı şehirlerde ve endüstriyel nesnelerin interneti dağıtımlarında izleme ve kontrol amaçlı kullanılır. LPWAN teknolojisinin aksine bilinen kablosuz haberleşme teknolojilerini kullanan geniş ağlarda, çok daha fazla veri taşınır ancak bu durumda daha fazla güç gereksinimi ortaya çıkar. LPWAN teknolojisi ise 15 km ye kadar bir çalışma aralığına sahiptir [7] ve nispeten basit ve kolay bir protokol olmasından dolayı geliştirilen cihazlar ve donanımlar daha ucuz olmaktadır. Düşük depolama seviyelerine sahip pillerle bile çalışabilen alıcı ve verici sistemler çok daha az güç kullanır ve yıllarca çalışmalarını sürdürebilirler.

LPWAN haberleşme ağına veri hızı, kullanılan bant genişliğine ve yayılma faktörüne (spreading factor, SF) bağlıdır. Bölgeye veya frekans planına bağlı olarak 125 Khz, 250 Khz veya 500 Khz bant genişliğine sahip kanalları kullanabilir [7]. Yayılma faktörü uç cihaz tarafından seçilir ve bir çerçeve bilgisinin

iletilmesi için geçen süreyi etkiler. CSS tekniği, farklı hızlarda yukarı veya aşağı hareket eden bir frekansa sahip ve chirp olarak adlandırılan sinyaller kullanır. Yayılma faktörü ise yayılım hızını belirler. Yüksek bir yayılma faktörü, büyük güç tüketimi ile birlikte yüksek radyo yayılımı ve penetrasyon demektir. Kısaca yayılma faktörü ne kadar büyük olursa, iletişim aralığı artar ve sinyal RF alıcısı tarafından hatasız olarak alınabilir ancak bununla birlikte enerji tüketimi artar ve veri hızı düşer. Diğer taraftan daha küçük yayılma faktörü ise aynı bant genişliği ve zamanda daha fazla veri iletimi demektir. Yayılma faktörü Denklem 1’de tanımlanmaktadır [15].

$$SF = \log_2(R_c/R_s) \quad (1)$$

Burada R_c ve R_s sırasıyla chirp ve sembol oranını gösterir. SF, sembol başına chirp sayısını belirtir ve 7 ile 12 arasında değişir. LoRa için veri hızı parametresi ise Denklem 2’deki gibi hesaplanır.

$$R_b = SF \times (BW/2^{SF}) \times CR \quad (2)$$

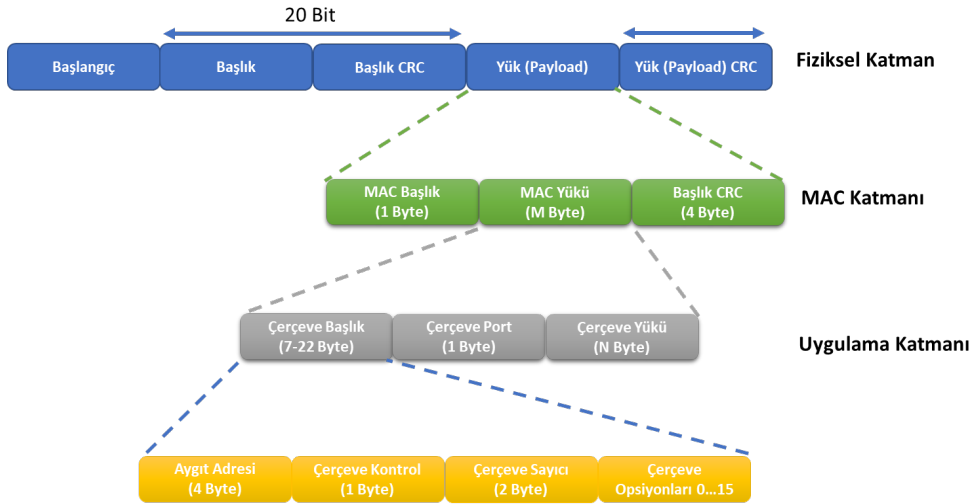
Denklem 2’de CR (Code Rate), kod oranını gösterir. CR, iletilen pakete dâhil edilen ekstra bilgi miktarını belirler. Bu ekstra bilgi, paketin kısmen bozuk olarak alınması durumunda alınan verileri yeniden yapılandırmak için kullanılır [7]. BW ise Bant genişliğini ifade eder ve 125, 250 veya 500 KHz olmak üzere bu üç değerden birini alabilir [15]. Fiziksel katman parametrelerinin ayarlanmasına bağlı olarak, veri aktarım hızı 0,3 Kbps ile 50 Kbps arasında değişir. Örneğin, BW=250 KHz; SF=8 ve CR=4/5 değerleri için veri hızı 6.25 Kbps olacaktır. Sonuçta, bu değerler LoRa modülasyonunu ve demodülasyonunu etkilediğinden başarılı bir iletişim için bu parametrelerin verici ve alıcı arasında uyumlu olması gerekir.

2.3. LoRaWAN Protokolü (LoRaWAN Protocol)

LoRa teknik çalışma birliği (LoRa Alliance) LoRa ağları için fiziksel veri yolu standartlarını belirlemektedirler [5]. Bu kapsamda Şekil 2’de gösterilen paket yapısını oluşturmuşlardır. Bu paket detaylı bir şekilde ele alınacak olursa; Fiziksel katmanda, LoRa haberleşmesi bir başlangıç sinyali (preamble) ile başlar. Başlangıç sinyalinin üretildiği kısımda senkronizasyon fonksiyonu dışında paketin modülasyon şeması tanımlanır. Başlık kısmında başlık ve CRC (Cyclic Redundancy Check), 20-bit uzunluğundadır ve en güvenilir kodlama hızıyla kodlanmıştır. Çerçevenin geri kalanı başlıkta belirtilen kodlama hızıyla kodlanır. Fiziksel katmanda yük ve yüke ilişkin CRC (16-bit) hesaplanmaktadır. Lora ağlarında sadece yukarı bağlantı (up-link) çerçevesi yük CRC sini içerir ayrıca fiziksel katmanda yük (payload) MAC (Medium Access Control) çerçevesine ilişkin bilgileri de içermektedir.

MAC katmanını oluşturan paketler, bir MAC başlığı (1 Byte), MAC yükü (M Byte) ve mesaj bütünlük kodundan (MIC-4 Byte) oluşur. MAC başlığı, protokol versiyonunu ve mesaj tipini, yani bunun bir veri mi yoksa bir yönetim çerçevesi mi olduğunu, yukarı bağlantıda mı yoksa aşağı bağlantıda mı iletildiğini, onaylanıp onaylanmayacağını tanımlar. MAC başlığı, bunun satıcıya özel bir mesaj olup/olmayacağını ayarlanabildiği bir niteliktedir. MAC başlığı ve MAC yükü bölümünün tamamı, bir ağ oturum anahtarı ile MIC (Minimum Inhibitory Concentration) değerini hesaplamak için kullanılır. Bu noktada MIC değeri, mesajların sahteliğini önlemek ve son düğümün kimliğini doğrulamak için kullanılır [16]. Uygulama katmanında, MAC yükü çerçeve başlığı, çerçeve portu ve çerçeve yükünden oluşur. Çerçeve yükü ise bir AES-128 algoritmasına dayanan uygulama oturum anahtarıyla şifrelenir.

Şekil 2’de aygıt adresi (4 Byte) iki bölümden oluşmaktadır. İlk kısım 8 bit ağı tanımlar, diğer bitler ise ağa katılma sırasında dinamik olarak atanır ve bir ağdaki cihazı tanımlar. Çerçeve kontrolü kısmında (1 Byte), yukarı bağlantı iletimi için ağ geçidi tarafından belirtilen veri hızının kullanılıp kullanılmayacağı, gelen mesajın alınma onayı, ağ geçidinin daha fazla veriye sahip olup olmadığı gibi kontroller gerçekleştirilir. Çerçeve sayıcısı, temel olarak gelen veri paketine ait çerçeve adedini sayar. Çerçeve opsiyonları kısmında ise veri hızı, iletim gücü ve bağlantı doğrulaması gibi seçenekler ayarlanabilir [15].



Şekil 2. LoRaWAN paket yapısı

3. SAHA AYDINLATMA UYGULAMASI (SOCCER PITCH LIGHTING APPLICATION)

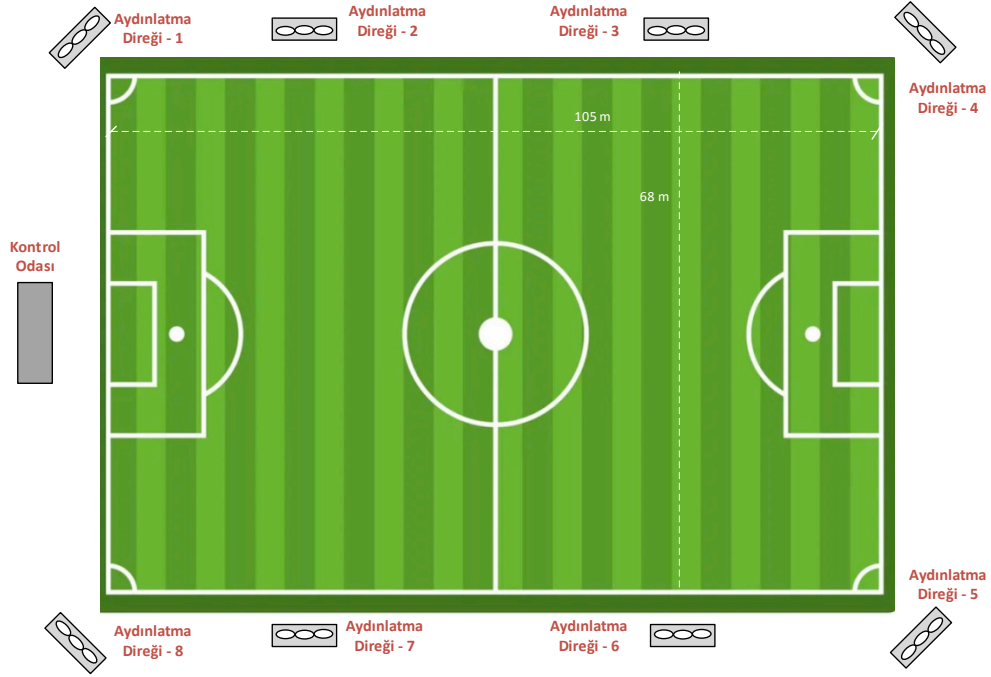
3.1. Uygulama Sahası (Application Pitch)

Geliştirilen LoRa haberleşme uygulaması Diyarbakır ilinde bulunan Vali A. Cemil Serhatlı tesisine ait bir futbol sahasına uygulanmıştır. Bu tesiste bulunan sahaya ilişkin köşe gönderi görünümü Şekil 3’de verilmiştir.



Şekil 3. Futbol sahası köşe gönderi görünümü

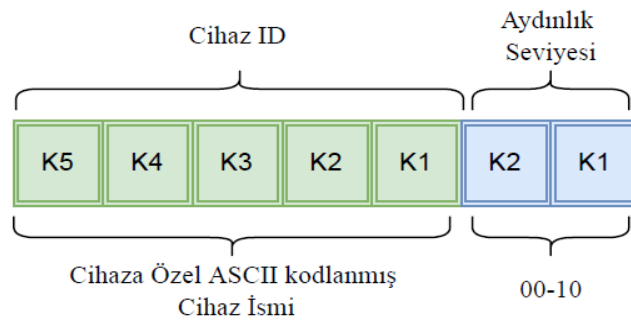
Uygulamanın yapıldığı saha (105x68m), aydınlatma kuleleri ve kontrol odasının yerleşimi temsili olarak Şekil 4’de verilmiştir. Şekil 4’den anlaşılacağı üzere sahada 8 adet 20 metre uzunluğunda aydınlatma kulesi ve üstten bakıldığında sol tarafa yerleştirilmiş kontrol odası bulunmaktadır. Kaleye yakın aydınlatma kulelerinde (Kule 1-4-5-8), 200 Watt gücünde 8 adet LED aydınlatma projektörü, orta çizgiye yakın kulelerde (4 adet) ise 200 Watt gücünde 6 adet aydınlatma projektörü bulunmaktadır. Bu futbol sahasında projektör aydınlatma sürücüsü olarak Moso x6 sürücüler kullanılmıştır. 240 Watt bir güç değerine sahip olan bu sürücüler 90~305 VAC giriş gerilimlerinde çalışabilen, 0-10 V veya darbe genişlik modülasyonu (Pulse Width Modulation - PWM) ile ışık şiddetinin ayarlanabildiği sürücülerdir [17].



Şekil 4. Saha aydınlatma direği yerleşim planı

3.2. Önerilen sistemin Yapısı ve Geliştirilen Devreler (Structure of Recommended System and Development of Boards)

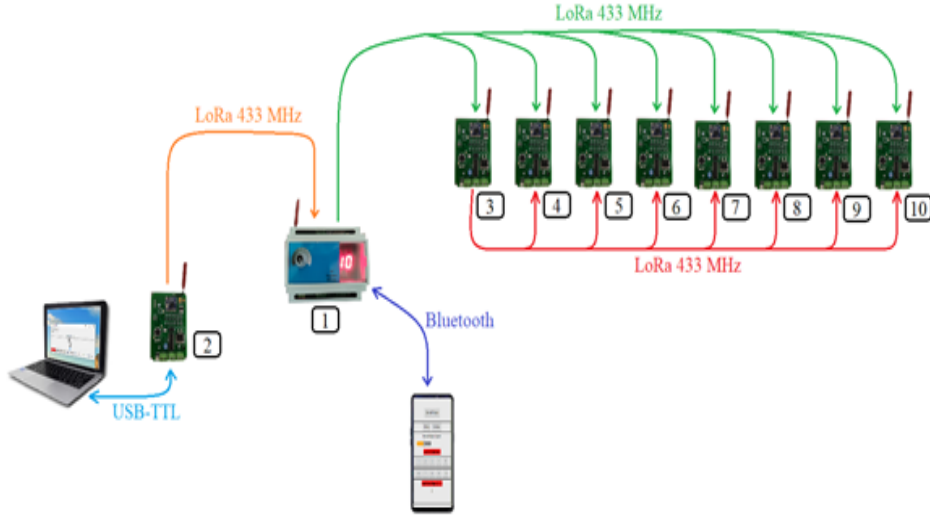
LED projektör kontrol kartı, ana kontrol ünitesinden LoRa protokolü kullanarak aldığı sinyaller ile LED projektör sürücülerinin kontrolü için gerekli olan 0-10V aralığında gerilim üreten bir yapıya sahiptir. Ana kontrol ünitesinin gönderdiği veri paketinin yapısı Şekil 5’de görüleceği üzere beşi cihaz ID ’sini, ikisi sistemin aydınlık seviyesini içeren toplam 7 karakterden oluşmaktadır. Ana kontrol ünitesi, oluşturulan veri paketini LoRa modülasyonu ile ortama göndermektedir. Ortama gönderilen sinyal, LED projektör kontrol kartları ile ayrıştırılarak, LED projektör sürücülerinin kontrolü için gerekli olan 0-10V arasında istenen gerilimi üretmektedir.



Şekil 5. Gönderilen veri paketinin yapısı

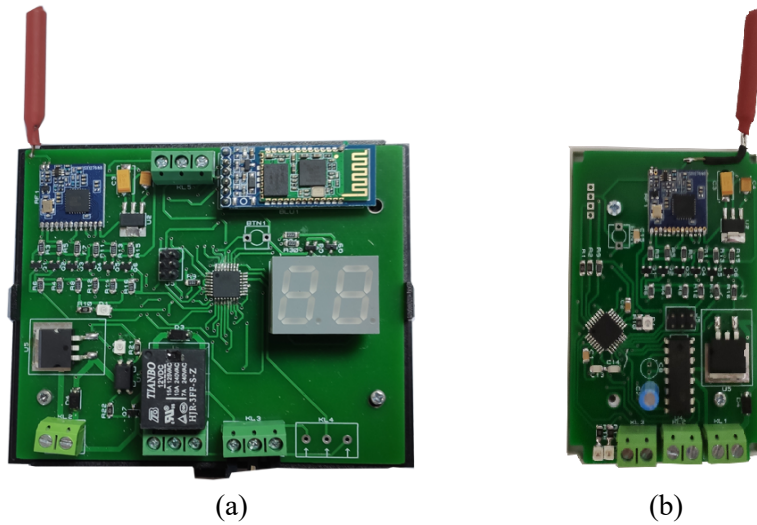
Aydınlık seviyesi, PC, mobil telefonlar (Bluetooth ile) veya kutu üzerine yerleştirilen bir potansiyometre aracılığı ile değiştirilebilmektedir. Ana kontrol ünitesi açık bir ortamda pano içine konumlandırılmıştır ancak referans sinyalini üreten PC kapalı bir ortamda bulunmaktadır. İlk başta PC-Ana kontrol ünitesi arası kablolu bir iletişim düşünülmüş ancak yaklaşık 30 metrelik mesafeden dolayı bu çözüm uygulanamamıştır. Bu sebeple PC’den alınan referans sinyalinin panoya gönderilebilmesi için Şekil 6’da gösterilen 2 etiketine sahip cihaz sinyal tekrarlayıcı olarak kullanılmış ve böylece bina içi haberleşme problemi de geliştirilen kart sayesinde çözülmüştür.

Uygulama sırasında karşılaşılan diğer bir problemde, pano içinde 3 metre yükseklikte bulunan ana kontrol ünitesinin referans verileri, sahanın diğer tarafında bulunan 20 metre yükseklikteki aydınlatma direklerine transferinde kesintilerin oluşmasıdır. Bu kesintilerin sebebi sahanın LED projektör kontrol kartlarına takılmış olan mini antenlerdendir. Bu problemi aşmak için ana kontrol ünitesi referans sinyalini, sorunsuz şekilde alabilen, 8 numaralı aydınlatma kulesi üzerine yerleştirilmiş 3 etiket numarasına sahip cihaz, uygun sinyali aldığı anda aynı sinyali tekrar ortama gönderir. Aydınlatma seviyesi ayarlama görevine ek olarak sinyal kuvvetlendirici özelliği eklenen 3 numaralı alıcı cihazın yarı çift yönlü (half-duplex) haberleşme yapısı sayesinde diğer alıcı cihazlar da (4, 5, 6, 7, 8, 9, 10) sorunsuz şekilde kontrol edilebilmiştir. Bu sayede kesinti problemleri net olarak çözülmüştür.



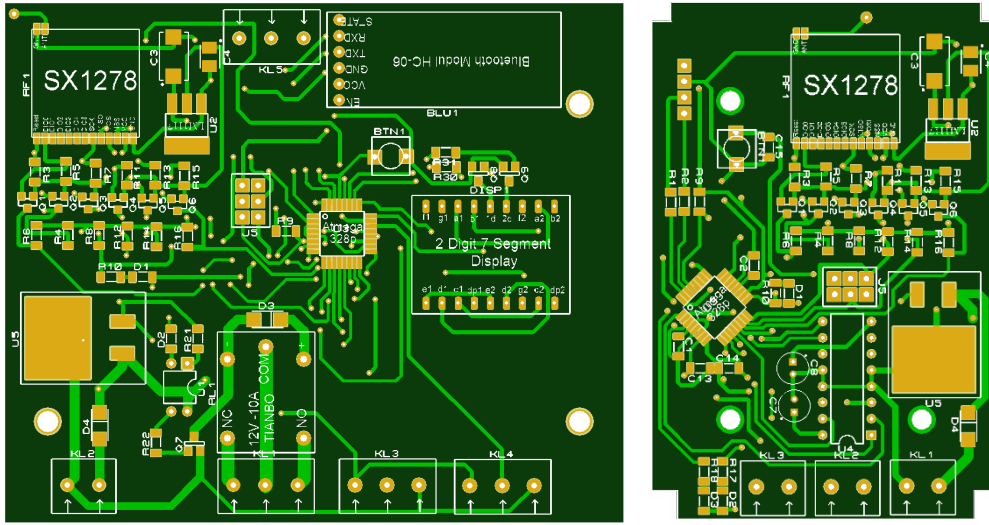
Şekil 6. Sistemin çalışma diyagramı

Şekil 7’de geliştirilen ana kontrol ünitesi (a) ve LED projektör kontrol kartı (b) devreleri gösterilmektedir. Geliştirilen kartlarda 8-bitlik Atmega328p mikrodenetleyici bulunmaktadır. Bu mikrodenetleyici 23 adet dijital genel amaçlı giriş/çıkış (GPIO), 6 adet 10-bit analog/dijital dönüştürücü (ADC), programlanabilir seri USART, SPI iletişim desteği, I²C iletişim desteği, 20 MHz’ e kadar çalışma hızı, 32 KB flash bellek, 1 KB EEPROM ve 2 KB dahili statik RAM bulunmaktadır [18].



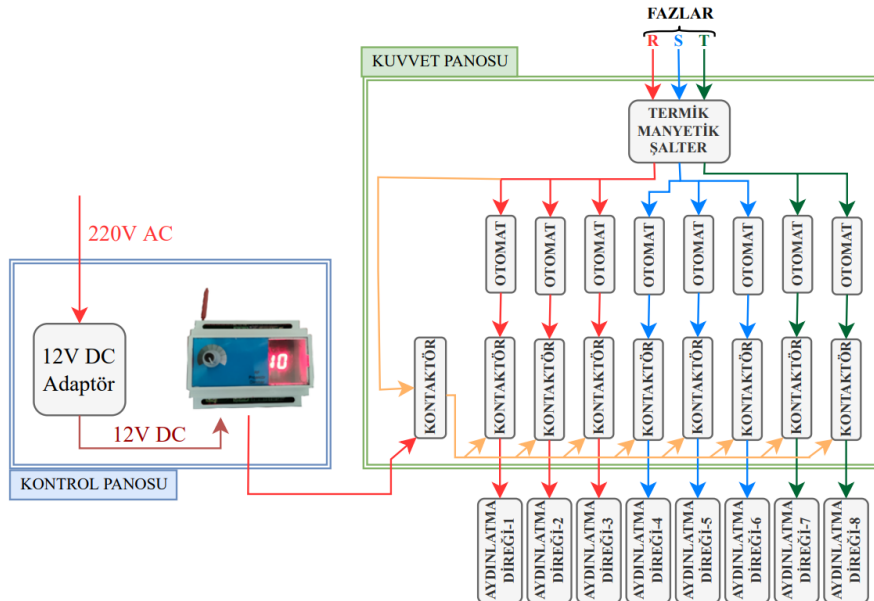
Şekil 7. Devre kartları a) Ana kontrol ünitesi b) LED projektör kontrol kartı

Geliştirme aşamasında LoRa haberleşme için yarı çift yönlü haberleşme yapısına sahip Semtech firmasının ürettiği LoRa SX1278 entegresi kullanılmıştır. Bu entegre sayesinde anten özelliklerine bağlı olarak 3000 metre uzaklığa kadar kablosuz haberleşme mümkün olmaktadır [19]. Bu entegre fabrika çıkışında 433 MHz frekansına ayarlanmış olmakla birlikte 410-441 MHz aralığında istenilen frekansta kullanmak mümkündür. Haberleşmenin sağlıklı bir şekilde olması için alıcı ve vericilerin aynı frekansta çalışması gerekmektedir. Fabrika çıkışı olarak iletilen veriler şifrelenmediği için aynı frekanstaki herhangi bir alıcı tarafından okunabilir [20]. Ancak hangi veri paketinin hangi alıcıya iletileceğini belirlemek için iletilen veri paketi içine adres bilgileri de eklenmiştir. Ana kontrol ünitesine devresine eklenen HC-06 Bluetooth modülü ile sistemin cep telefonu ile kontrolü sağlanmaktadır. HC-06 Bluetooth modülü, Şekil 7’de verilen ana kontrol ünitesinin sağ üst tarafında konumlandırılmıştır.



Şekil 8. Ana kontrol ünitesi ve LED projektör kontrol kartı PCB görünümü

Şekil 8’de sırasıyla, ana kontrol ünitesi ve LED projektör kartlarına ait baskı devre görüntüleri verilmiştir. Kartların tasarımı sırasında elektromanyetik girişimleri minimuma indirecek şekilde bir tasarım dikkate alınmıştır. Ayrıca kart boyutlarının IP 65 sınıfına sahip bir kutu içine sığacak ebatlarda olmasına dikkat edilmiştir.



Şekil 9. Aydınlatma direkleri güç şeması

LED aydınlatma projektörleri şebekeye güç kontaktörleri aracılığı ile bağlıdır. Geliştirilen devreler sahaya uygulanmadan önce kontaktörler manuel olarak aç/kapa şeklinde kontrol edilmekteydi ancak geliştirme sırasında aydınlatma seviyesi 0 değerine indirildiğinde bir röle ile sürülen kontaktörün pasif durumu geçmesi sağlanmıştır. Bu sayede bekleme durumlarında (stand-by) enerji tasarrufu sağlanmış ve gerilim salınımlarına karşı ekipman güvenliği artırılmıştır. Şekil 9’da aydınlatma direklerine ilişkin güç şeması ve ana kontrol panosu verilmiştir.

3.3. Aydınlatma Referansı Üretimi Yöntemleri (Lighting Reference Production Methods)

Saha çalışmalarında, dış ortamda bir pano içine yerleştirilmiş olan ana aydınlatma kontrol sisteminin kontrolü için talepler doğrultusunda 3 alternatif geliştirilmiştir. Öncelikle saha personelinin oldukça basit bir aydınlatma kontrolü sağlayabilmesi için Şekil 10’da ana kontrol ünitesi kutusu üstünde bulunan potansiyometre kullanılmıştır. Bu potansiyometre sayesinde aydınlatma şiddeti 0-10 kademesi arasında kontrol edilebilmektedir. Ayrıca tasarımı yapılan devreye aydınlatma şiddetinin kademesini göstermek üzere 2 dijit 7 segment gösterge eklenmiştir.



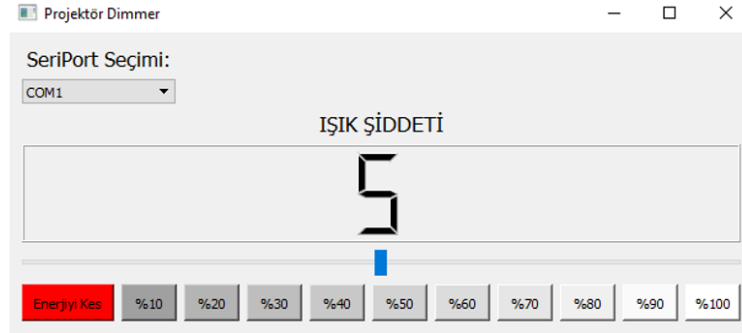
Şekil 10. Ana kontrol ünitesinin potansiyometre ile kontrol edilmesi

İkinci aydınlatma seviyesi kontrol yönteminde, maç müsabakaları sırasında personelin panoya erişiminde zaman kaybı oluşacağı düşünülerek mobil bir uygulama geliştirilmiştir. Mobil uygulamanın, bir telefon üzerinden ana kontrol ünitesiyle haberleşmesi için Bluetooth modülü kullanılmış ve yaklaşık 40 metreye kadar kablosuz bağlantı sağlanabilmektedir. Böylece kısa mesafelerde düşük güç tüketimli, düşük maliyetli kablosuz haberleşme mümkün olmaktadır [21]. Şekil 11’de Mit App Inventor uygulaması ile geliştirilen Android uygulamasının görünümü verilmiştir. Bu uygulamada aydınlatma sistemini besleyen kontaktörleri aç/kapa yapan rölenin kontrolü, kayar kontrolör (slider) ve ışık şiddetinin ayarlanabileceği 10 kademeli tuş takımı yerleştirilmiştir.



Şekil 11. Android işletim sistemi için geliştirilmiş Bluetooth uygulaması

Üçüncü kontrol yöntemi ise saha yönetmelikleri dikkate alınarak, kapalı bir yönetim odasında bulunan PC üzerinden kontrol sağlanmıştır. Sistemi kontrol edebilmek için, Python programlama dili ile geliştirilen uygulama Şekil 12’de gösterilmiştir. Bu uygulama temel olarak Şekil 11’de verilen Android uygulaması ile benzer fonksiyonlar içermektedir. PC için geliştirilen yazılım, 2 numaralı etikete sahip sinyal kuvvetlendirici cihaza USB-TTL dönüştürücü ile bağlanabilmektedir. Verici cihaz LoRa modülasyon tabanlı bir yapıya sahip olmasından aldığı referans sinyalini kontrol panosunda bulunan ana kontrol ünitesine aktarabilmektedir.



Şekil 12. Python programlama dili ile geliştirilmiş yazılım görünümü

3.4. Mevcut Sistem ve Tasarlanan Sistemin Maliyet Karşılaştırması (Cost Comparison Between Current and Developed Systems)

Saha aydınlatma projelerinde kullanılan LED sürücülerin kontrol edilebilmesi için kablolu bir sistem kurmanın önemli dezavantajları vardır. Kablolu sistemin montaj süreci, önerilen LoRa modülasyon tabanlı sisteme göre daha uzun ve zahmetlidir. Ayrıca kablolu sistem, işçilik ve malzeme maliyeti bakımından daha yüksektir. Tablo 1’de görüleceği üzere kablolu sistemin maliyeti 18.897,30 TL’dir. Mevcut sistem incelendiğinde en önemli maliyetlerden birinin 860 m uzunlukta kablonun olduğu görülmektedir. Kablolama yapılması durumunda uzun metrajlarda gerilim düşümü olacağı değerlendirilmektedir. Bu durumda kaliteli ve kaliteli bir kablo kullanmak, maliyeti arttırmakla birlikte kablo üzerinde oluşacak parazitlerin tam olarak engellenemeyeceği ortadadır. Hem kablo maliyeti hem de kablolama zahmeti açısından değerlendirildiğinde kablosuz sinyal taşımanın önemi net olarak ortaya çıkmaktadır.

Tablo 1. Mevcut sistemin maliyeti

Sıra No	Malzeme Adı	Özellik	Miktar	Birimi	Birim Fiyatı (TL)	Toplam (TL)
1	Sinyal Seviye Dönüştürücü	(48V-10V)	8	Adet	110,00	880,00
2	Sinyal Seviye Dönüştürücü	(10V-48V)	8	Adet	110,00	880,00
3	Elektrik Altyapısı İçin Koruge Boru	75 mm çapında	280	Metre	7,92	2.217,60
4	LIYCY Blendajlı Sinyal ve Kontrol Kablosu	2x0,75 mm2 kesitli	860	Metre	7,12	6.123,20
5	Opak Kapaklı, Sıva Üstü Polyester Elektrik Panosu	60x50x23cm,	1	Adet	796,50	796,50
6	Kontrol Cihazı	16 PWM Çıkışlı	1	Adet	4.000,00	4.000,00
7	İşçilik	Boruları döşemesi ve kablolama	1	Adet	4.000,00	4.000,00
TOPLAM MALİYET						₺18.897,30

Tablo 2’de önerilen sistemin maliyeti (10.800,00 TL) görülmektedir. Önerilen sistem, kablolu sistem ile kıyaslanacak olursa maliyet olarak yaklaşık %43 daha uygun fiyatlıdır. Kablolama, borulama gibi maliyet kalemleri olmadığı için ekstra maliyet söz konusu olmayacaktır.

Tablo 2. Önerilen sistemin maliyeti

Sıra No	Malzeme Adı	Özellik	Miktar	Birimi	Birim Fiyatı (TL)	Toplam (TL)
1	LoRa Modülasyon Tabanlı LED projektör kontrol kartı	2 PWM Çıkışlı	8	Adet	550,00	4.800,00
2	LoRa Modülasyon Tabanlı Ana Kontrol Ünitesi	3 Alternatifli Kontrol Modu	1	Adet	4.000,00	4.000,00
3	İşçilik	Montaj	1	Adet	2.000,00	2.000,00
TOPLAM MALİYET						₺10.800,00

4. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

Futbol müsabakalarında saha aydınlatması uzun yıllardır süregelen bir uygulamadır. Bununla birlikte nesnelerin interneti kavramı hayatımıza girdiğinden beri futbol sahalarının da bu kapsamda yeniden değerlendirilmesi kaçınılmaz bir hale gelmiştir. Bu makalede bir futbol sahasının aydınlatılması için nesnelerin interneti içinde önemli bir yeri bulunan uzak alan haberleşme uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bir futbol sahasının etrafı boyunca aydınlatma direklerine yerleştirilmiş LED projektörlerin sürücüler üzerinden kontrol edilmesi sahada daha ekonomik bir aydınlatma sağlamaktadır. Bu durumda projektörlerin enerji hattı kablosu ve referans kontrol sinyallerinin iletim kablosu ayrı ayrı çekilmelidir. Sinyal kablosunun ayrı çekilmesi parazitlerden etkilenme, maliyet, kablolama zahmeti ve bakım zorluğu gibi çeşitli problemlere sebep olmaktadır. Belirtilen problemleri çözmek için bu çalışmada LoRa modülasyonu tabanlı bir aydınlatma kontrol sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan sistem Diyarbakır ilinde bulunan Vali A. Cemil Serhatlı tesisine ait futbol sahasına uygulanmıştır. Geliştirilen sistemin kullanıcı dostu, pratik, hızlıca devreye alınabilme gibi avantajlar sağladığı ayrıca uzun mesafelerde sonuçların başarılı olduğu görülmüştür. Sonraki çalışmalarda geliştirilen sisteme bir ağ geçidi eklenerek uzaktan kontrolü ve aktarılan verilerin şifrelenmesi gibi çalışmalar yapılması planlanmaktadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Gündüz, Muhammed Zekeriya, D. A. Ş. Resul. (2018). Nesnelerin interneti: Gelişimi, bileşenleri ve uygulama alanları, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 24, 327-335.
- [2] Rizzi, M., Ferrari, P., Flammini, A., Sisinni, E. (2017). Evaluation of the IoT LoRaWAN solution for distributed measurement applications, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 66, 3340-3349.
- [3] El Chall, R., Lahoud, S., El Helou, M. (2019). LoRaWAN network: Radio propagation models and performance evaluation in various environments in Lebanon, IEEE Internet of Things Journal, 6, 2366-2378.
- [4] Guillaume, F., Audrey, G. (2018). Lora physical layer principle and performance analysis, 25th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS). IEEE, 65-68.
- [5] Aras, E., Ramachandran, G. S., Lawrence, P., Hughes, D. (2017). Exploring the security vulnerabilities of LoRa, 3rd IEEE International Conference on Cybernetics (CYBCONF), 1-6.
- [6] De Carvalho Silva, J., Rodrigues, J. J., Alberti, A. M., Solic, P., Aquino, A. L. (2017). LoRaWAN - A low power WAN protocol for Internet of Things: A review and opportunities, 2nd International Multidisciplinary Conference on Computer and Energy Science (SpliTech), 1-6.

- [7] Sanchez I., R., G Liaño, I., Simoes, C., Couñago, E., Skarmeta, A. F. (2019). Tracking and monitoring system based on LoRa technology for lightweight boats, *Electronics*, 8, 1-15.
- [8] Johnston, S. J., Basford, P. J., Bulot, F. M., Apetroaie-Cristea, M., Easton, N. H., Davenport, C., Cox, S. J. (2019). City scale particulate matter monitoring using LoRaWAN based air quality IoT devices, *Sensors*, 19, 1-20.
- [9] D. Davcev, K. Mitreski, S. Trajkovic, V. Nikolovski, N. Koteli. (2018). IoT agriculture system based on LoRaWAN, 14th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS), 1-4.
- [10] Catherwood, P. A., Steele, D., Little, M., McComb, S., McLaughlin, J. (2018). A community-based IoT personalized wireless healthcare solution trial, *IEEE journal of translational engineering in health and medicine*, 6, 1-13.
- [11] J. Navarro-Ortiz, S. Sendra, P. Ameigeiras, J. M. Lopez-Soler. (2018). Integration of LoRaWAN and 4G/5G for the Industrial Internet of Things, in *IEEE Communications Magazine*, 56, 60-67.
- [12] Augustin, A., Yi, J., Clausen, T., Townsley, W. M. (2016). A study of LoRa: Long range & low power networks for the internet of things, *Sensors*, 16, 1-18.
- [13] Ertürk, M. A., Aydın, M. A., Büyükakkaşlar, M. T., Evirgen, H. (2019). A survey on LoRaWAN architecture, protocol and Technologies, *Future Internet*, 11, 1-34.
- [14] Hoeller, A., Souza, R. D., López, O. L. A., Alves, H., de Noronha Neto, M., Brante, G. (2018). Analysis and performance optimization of LoRa networks with time and antenna diversity, *IEEE Access*, 6, 32820-32829.
- [15] Kim, S., Lee, H., Jeon, S. (2020). An adaptive spreading factor selection scheme for a single channel LoRa modem, *Sensors*, 20, 1-13.
- [16] Bankov, D., Khorov, E., Lyakhov, A. (2016). On the limits of LoRaWAN channel Access, *International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT)*, 10-14.
- [17] <https://www.mosopower.cn/x6-series-240w-off-line-programmable-driver>.
- [18] <https://www.microchip.com/en-us/product/ATmega328P>.
- [19] <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-core/sx1278>.
- [20] Daud, S., Yang, T. S., Romli, M. A., Ahmad, Z. A., Mahrom, N., Raof, R. A. A. (2018). Performance evaluation of low cost lora modules in iot applications, In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 318, 1-11.
- [21] Söğüt, E., Erdem, O. A. (2017). Günümüzün vazgeçilmez sistemleri: nesnelerin haberleşmesi ve kullanılan teknolojiler, *Akademik Bilişim Konferansları*.
- [22] Kim, J., Song, J. (2017). A dual key-based activation scheme for secure LoRaWAN, *Wireless Communications and Mobile Computing*, 1-12.



An EBSD Study on Crystallization of CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ (CMAS) Glass

Sinem BAŞKUT^{1,*} , Emrah DÖLEKÇEKİÇİ¹ , Gökтуğ GÜNKAYA² , Taner KAVAS³ 

¹Eskisehir Technical University, Faculty of Engineering, Department of Materials Science and Engineering, 26555, ESKİSEHİR

²Anadolu University, Faculty of Fine Arts, Department of Glass, 26470, ESKİSEHİR

³Afyon Kocatepe University, Faculty of Engineering, Department of Materials Science and Engineering, 03200, AFYONKARAHİSAR

Article Info

Research article

Received: 22/03/2022

Revision: 14/04/2022

Accepted: 20/06/2022

Keywords

Anorthite

EBSD

Surface crystallization

Glass-ceramics

DTA

Abstract

This study applied heat treatment to the CMAS parent glass produced using brucite with calcite, kaolin, ulexite natural raw materials, and commercial MgF₂, considering the DTA measurements. The crystallization behaviour and the growth directions of the crystals were investigated. XRD analyses and SEM investigations revealed that the anorthite crystals were formed during heat treatment, and glass-ceramic was obtained in the CAS system by surface crystallization. According to EBSD measurements, the {100} faces of the some anorthite crystals just below the surface have a relatively higher ratio of lying parallel to the surface than their edges ({110}) and corners ({111}). These crystals grew by orienting in the same direction to the inner region of the remaining glass. However, many crystals exhibited random orientation. The tendency of crystals' same planes to lie parallel to the surface was slightly less in the inner regions than those on the surface.

1. INTRODUCTION

Glass-ceramics are inorganic, polycrystalline materials obtained by the controlled crystallization of glasses, including the homogeneous or heterogeneous nucleation and crystal growth stages [1]. One of the main crystallization methods used in production of glass-ceramics is bulk crystallization, which takes place within the entire glass structure with the contribution of the nucleating agent. Another is surface crystallization, which is only generated at and/or near the glass surface without the nucleating agent [2-4]. They generally exhibit superior mechanical, thermal, optical properties and chemical stability compared to parent glass with the contribution of crystallization [2]. Due to these properties, glass-ceramics have become highly preferred materials in many technological areas such as electronic, biomedical, photonics, optic and aerospace industries, and their commercial used applications such as cookware and architectural components [5-8].

Different glass-ceramic systems can be obtained by using natural raw materials in the initial composition of the parent glass. The amounts of these raw materials are tailored depending on their chemical content to form the proportions of the candidate phases that will form the parent glass [9-14]. During preparing the glass-ceramics, the heat treatment applied to the parent glass can be considered in terms of nucleation and crystal growth temperatures or the type of used nucleating agent can determine the crystallization behavior of the parent glass' initial composition [11, 12]. In a study [13], where CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ (CMAS) glass was produced by using quartz, feldspar, calcite, dolomite natural minerals and industrial slag as starting raw materials and CaF₂, ZrO₂, P₂O₅ as nucleation agents, CMAS glass-ceramics were obtained by bulk crystallization with the help of heat treatment.

Besides all these, in recent years, since the orientation of the formed crystals is a decisive parameter for some properties of glass-ceramics, whether the crystals are oriented while growing has become a

considerable research topic [15-17]. Especially in non-ferroelectric glass-ceramics, crystal orientation can lead to forming a piezoelectric and/or pyroelectric surface layer [15, 17, 18]. Surface crystallization is a highly preferred method of obtaining glass-ceramics where the growth orientation of crystals is essential [15-17]. During surface crystallization, crystals grow into the inner region of the parent glass after nucleation occurs on or near the surface [19]. Although the crystallographic information of the formed crystals in glass-ceramics can be accessed traditionally with x-ray diffraction (XRD) technique, the fact that the results in the XRD technique depend on the quantity of crystals limits its use [20]. On the other hand, the electron backscatter diffraction (EBSD) technique, a scanning electron microscope-based tool, is the most powerful technique used to determine the nucleation or growth direction of crystals formed near or on the glass surface [21-23]. EBSD can collect diffraction information from particles smaller than 1 μm , regardless of quantity and present the plane and orientation information of glass-ceramic crystals with high precision [20]. However, the surface sensitivity of glass-ceramics to the high electron energy used in EBSD analyzes can cause pattern degradation, which requires great attention in the selected EBSD analysis parameters [16]. Considering this information, one of the motivations of this study was to obtain a glass-ceramic system by the heat treatment applied to CMAS parent glass produced by using natural raw materials brucite with calcite, kaolin, ulexite and commercial MgF_2 without nucleation agent. Another focus in this study was to determine the phase and orientation information of the crystals formed in the structure of the glass-ceramic using the EBSD technique. For these purposes, based on the nucleation and crystallization temperatures determined by differential thermal analysis (DTA) analysis, the parent glass was gradually heat-treated, and the realized crystallization mechanism was revealed by XRD and scanning electron microscope (SEM) examinations. EBSD analyses were performed on glass-ceramic surfaces made as smooth as possible in two different mechanical polishing times.

2. MATERIALS AND METHODS

In the first stage of the study, it was first planned to create a composition based on the oxide and compounds ratios (Table 1) determined by Stebbins et al. [23], to obtain a glass in the CMAS system. For this purpose, brucite with calcite, kaolin (CC 31) and ulexite, whose x-ray fluorescence (XRF) results were listed in Table 2 and also MgF_2 were used as starting raw materials and parent glass batch calculations were made according to the desired amounts of oxide and compounds presented in Table 1. A total of 130 g parent glass composition was prepared to consist of 30 g brucite with calcite, 60 g kaolin, 30 g ulexite and 10 g MgF_2 . The starting powders were mixed and melted in a platinum crucible at 1450 $^{\circ}\text{C}$ for 2 h in an air atmosphere (Protherm, atmosphere controlled vertical glass melting furnace). A frit glass was obtained by pouring the viscous liquid into the cool water.

The heat treatment conditions applied to the parent glass were determined based on the DTA (Netzsch, STA 409PG) analysis. XRD measurements were carried out to the ground powdered form (Rigaku, RINT-2000) and surface (Bruker, axs) of the heat-treated glass between 10-60 degrees (2θ) under the conditions of 40 kV accelerating voltage, 30 mA current, 1 $^{\circ}$ /min scan speed and 0.02 step size.

While the morphological images of the surface and fractured surface of the heat-treated sample were obtained by using a secondary electron detector (SE-SEM), the cross section which was polished with various polishing steps from coarse to the fine in the automatic polisher was examined by backscatter electron image (BSE-SEM) in the SEM (Zeiss, SUPRA 50 VP). Energy dispersive x-ray spectroscopy (EDS-SEM, Oxford Instruments, INCA ENERGY) analyses were performed to different regions on the polished cross section of glass-ceramic. EBSD (Oxford Instruments, INCA HKL NordlysS attached to the SEM) analyses of the heat-treated glass surface were conducted at variable pressure mode without coating on sample that was polished at two different times. In the first EBSD analysis, 1 μm diamond polishing solution followed by a colloidal silica step was performed for 15 min in a controlled manner to avoid the anorthite crystals remove from the sample surface. After the first EBSD investigation, the polishing time applied to the same sample was extended to 30 min and the second EBSD analysis was carried out. The areas covered by the crystals in the images showing the regions where EBSD analyzes were performed were determined with the ImageJ program.

Table 1. Oxides and compounds that form the desired parent glass composition and their quantities [24].

Oxides	Parent glass Composition (wt %)
<i>SiO₂</i>	32.40
<i>Al₂O₃</i>	22.75
<i>Fe₂O₃</i>	0.61
<i>CaO</i>	15.29
<i>MgO</i>	7.55
<i>Na₂O</i>	0.98
<i>K₂O</i>	0.30
<i>TiO₂</i>	0.30
<i>MnO</i>	0.003
<i>P₂O₅</i>	0.003
<i>SO₃</i>	0.017
<i>Cr₂O₃</i>	0.039
<i>B₂O₃</i>	10.22
<i>SO₄</i>	0.069
<i>SrO</i>	0.276
<i>MgF₂</i>	9.21
Total	100.00

Table 2. XRF results of the raw materials used during the study.

Oxides	Brucite with Calcite	Kaolin (CC 31)	Ulexite
<i>SiO₂</i>	0.3	47.5	4.0
<i>Al₂O₃</i>	0.13	36.3	0.25
<i>Fe₂O₃</i>	0.009	1.24	0.04
<i>CaO</i>	36	0.156	19
<i>MgO</i>	24.5	0.138	2.5
<i>Na₂O</i>	0.05	-	3.5
<i>K₂O</i>	0.01	3.14	-
<i>TiO₂</i>	0.01	0.317	-
<i>Cr₂O₃</i>	-	0.042	-
<i>B₂O₃</i>	-	-	37
<i>Ignition loss</i>	38.99	11.167	33.71
Total	100	100	100

3. RESULTS

The DTA analysis graph showing the temperature dependent behavior of the parent glass is given in Figure 1. DTA analysis revealed that nucleation and crystallization occurred as exothermic reactions at around 750 and 900 °C, respectively. When the temperature is increased from 900 °C (where crystallization takes place) to 1035 °C, the sudden change towards the endothermic reaction can be explained by the melting of the glass at this temperature. Additionally, the exothermic event observed at ~1050 °C indicated that the second crystallization of the glass occurred at this temperature. Considering the DTA analysis results, the heat treatment conditions applied to the parent glass are presented in Table 3. The heat-treatment process was

carried out in three steps. Firstly, the temperature was increased to glass transition temperature (650 °C) in 120 min and waited at this temperature for 1 h to promote nucleation. Then, the temperature was increased to 750 °C in 20 min and waited for 1 h. In the third step, the temperature was increased to 900 °C in 20 min and waited at this temperature for 2 h. Lastly, the sample was taken out after cooling to room temperature for 2 h in the furnace environment.

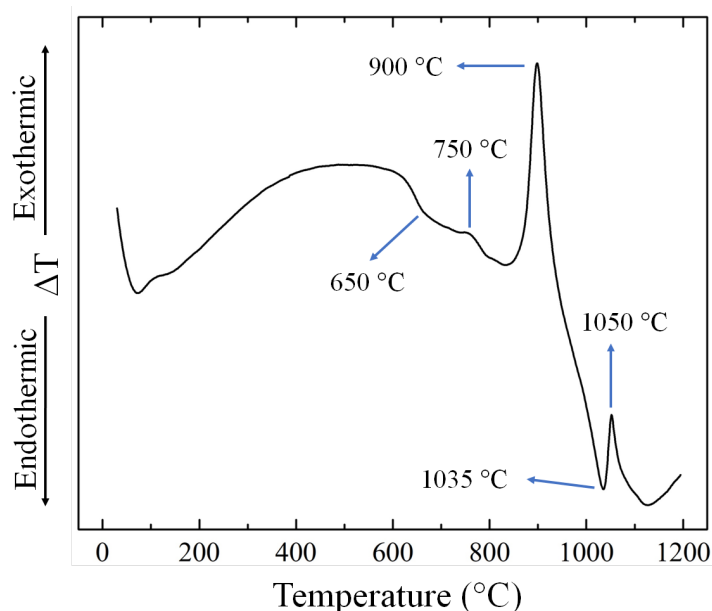


Figure 1. DTA graph showing temperature dependent behavior of the CMAS parent glass.

Table 3. Heat treatment conditions applied to CMAS parent glass

Heat Treatment	Temperature (°C)	Duration Time (h)
T_g	650	1
Nucleation	750	1
Crystal Growth	900	2

In order to determine the possible crystallization, the heat-treated glass was first ground and XRD analysis was performed to this powder form. However, the XRD pattern of the powder form (Fig. 2 a) indicated the existence of purely amorphous structure. On the other hand, since some color changes were observed on the surface of the heat-treated glass, it was concluded that the possible crystallization was below the detection limit of XRD. Therefore, XRD analysis (Fig. 2 b) was performed directly to the surface of the heat-treated glass and the presence of anorthite phase revealed that a glass-ceramic was obtained in the CAS system. XRD outputs indicated that surface crystallization may have occurred during heat treatment. The round shape of the glass-ceramic surface resulted in a noisy XRD pattern. It has been noticed that there was no driving force for the formation of a glass-ceramic in the MAS or CMAS systems under the composition ratios and heat treatment conditions applied during the study.

The morphological SE-SEM images at low (Fig. 3 a) and high (Fig. 3 b) magnifications taken from the surface of anorthite glass-ceramic showed that anorthite crystals formed on the surface of the parent glass in two different geometries as circular and elongated. Further, it was noticed that the existence of protrusions on the circular anorthites (Fig. 3 a, b). Figures 3 c and d present the SE-SEM and BSE-SEM images taken from the fractured and polished cross-sections of glass-ceramic, respectively. The cross-section images confirmed that glass-ceramic was obtained by surface crystallization. In addition, it was

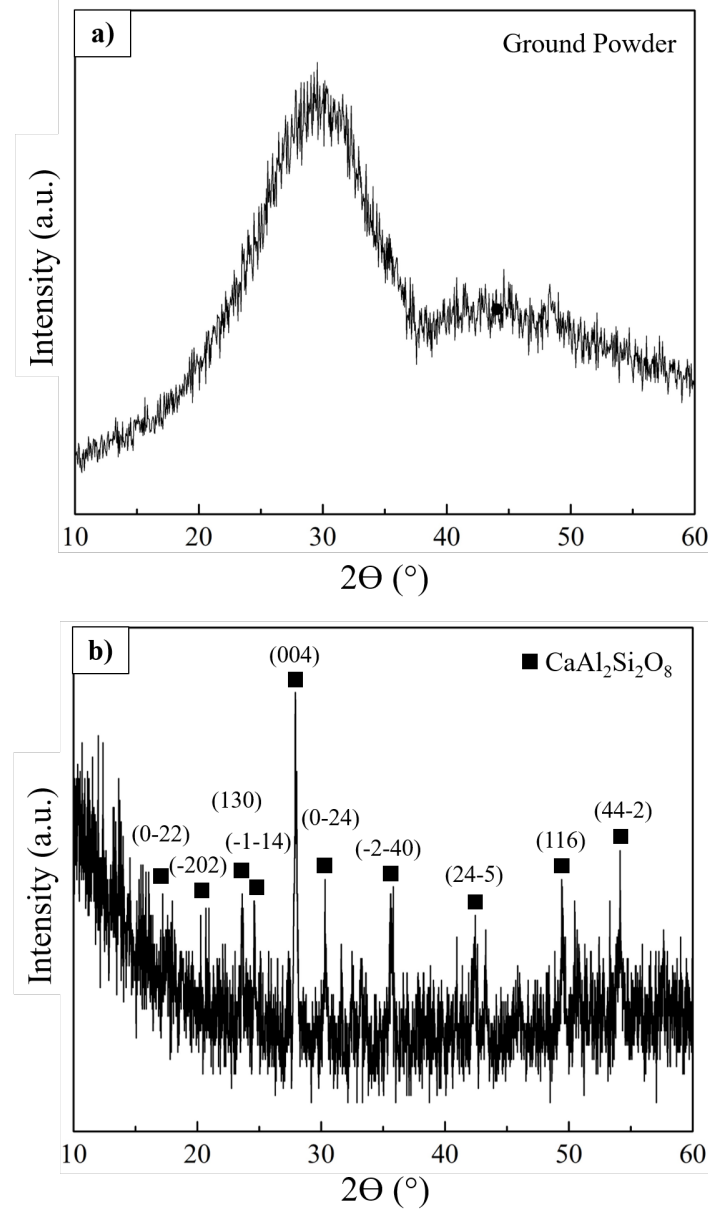


Figure 2. XRD pattern obtained from (a) ground powder form and (b) surface of heat-treated glass.

determined that the anorthite crystals formed on and near the surface grow to about 50-100 μm towards the bulk, and they extend to a depth of more than 150 μm in some regions. When the morphological images of the surface and the BSE image of the cross-section were evaluated together, it was determined that the anorthite crystals formed as non-homogeneous dispersed clusters on and near the surface of glass-ceramic and there was a significant amount of remaining glass between them. Figure 3 e and f show the results of the qualitative and quantitative EDS-SEM analyses performed on the remaining glass in the region where the anorthite crystals are dispersed and in the bulk. The analyzed regions were indicated by numbers 1 and 2 in the BSE image of the cross section given in Figure 3 d. At least three measurements were performed to each region and the averages of the obtained quantitative values were used during the study. The EDS-SEM results revealed that the chemical composition of the remaining glass exhibits differences in regions 1 and 2. The peak intensities (Fig. 3 e) and quantitative results (Fig. 3 f) of elements Ca, Al, Si and O in region 1, where nucleation occurred and anorthite crystals are grown, have been found lower than in region 2, which was less affected by crystallization. This showed that a certain amount of these elements in the near-surface region were consumed in the formation of anorthite crystals and that the chemical compositions of the inner regions of the glass-ceramic are closer to those of the parent glass. On the other

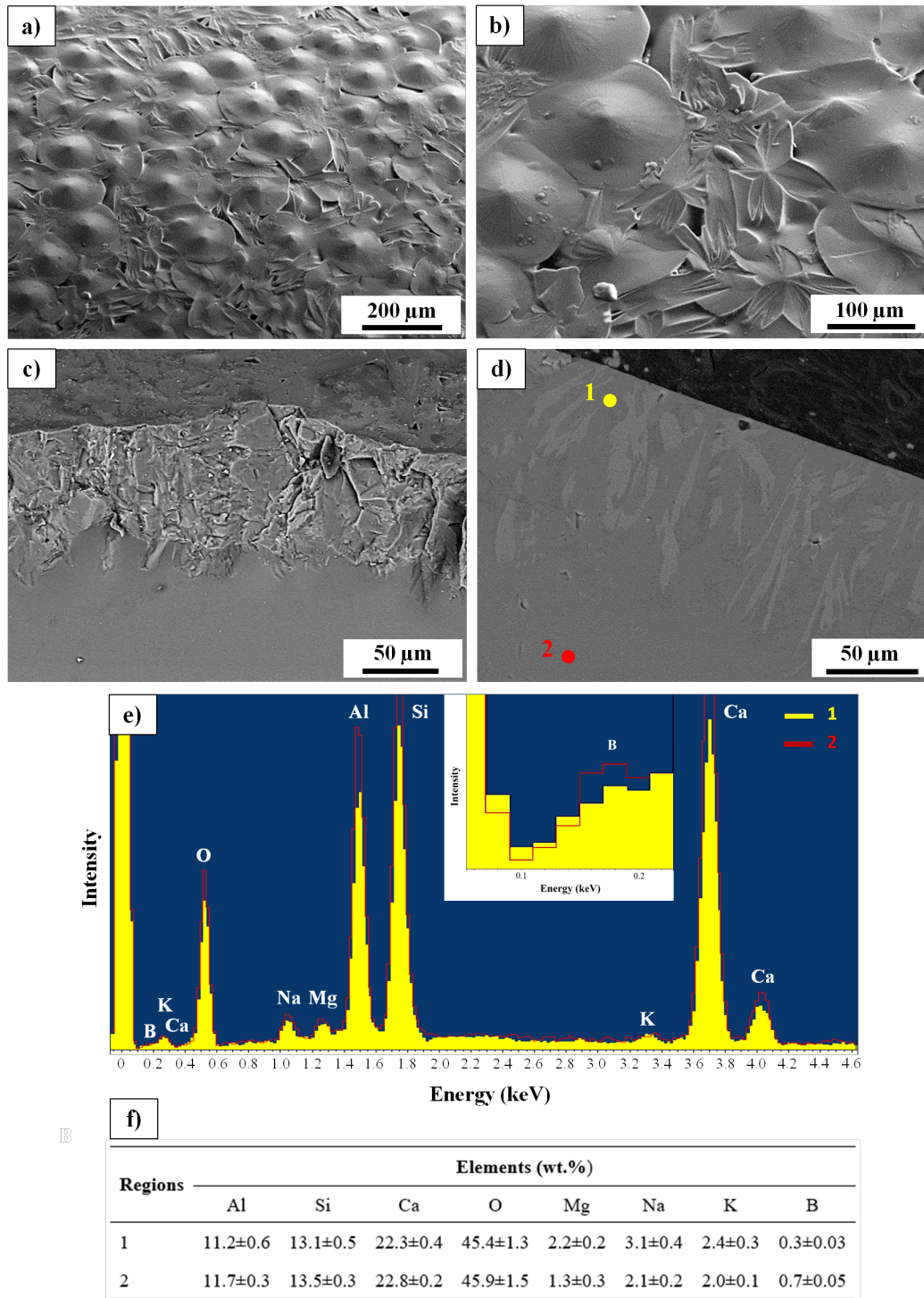


Figure 3. (a) Low and (b) high magnification SE-SEM images obtained from the surface of the heat-treated glass. (c) SE-SEM and (d) BSE-SEM images taken from fractured and cut-polished cross sections of heat-treated glass, respectively. (e) EDS-SEM compared spectra and (f) quantitative results of the region 1 and 2 indicated in Figure 3 d.

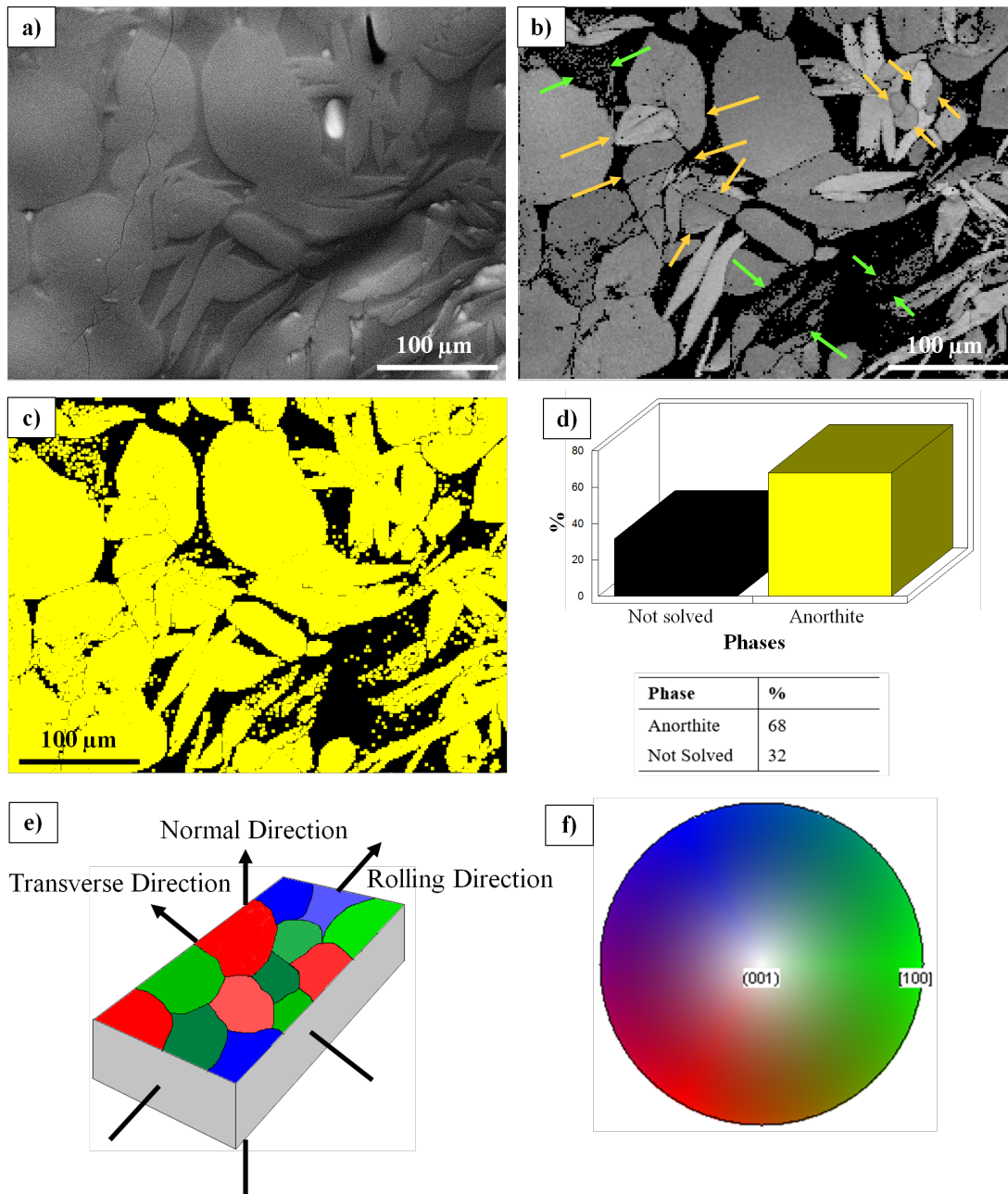
hand, the fact that the peak intensity of element boron (B) in the compared spectra was slightly higher in region 2 than in region 1 (enlarged compared spectra in Fig. 3 e) indicated that the B in the initial composition may be one of the parameters affecting the crystallization behavior of the parent glass. It is known that a certain amount of B content has the function of suppressing the crystallization by increasing

the durability of glass [25-27]. Due to the release of B during the heat treatment, the decrease in its content at and near the surface of the glass may have allowed anorthite crystals to form in these regions with an exact shape. The increase in the amount of B towards the inner regions of the remaining glass may have led to a decrease in crystallization and an increase in the amount of remaining glass. Since the lowest detection limit of the EDS detector used in the study was atomic number 5 (B), interpretation was made by considering the peak intensity differences between two regions instead of the quantitative results of element B.

The positioning of the anorthite crystals on the glass-ceramic surface has led to the need to investigate whether it grows in the remaining glass by orientation from the surface to the deep regions. To observe in detail EBSD analyses were performed on the surface of glass-ceramics. For EBSD analysis, the requirement that the surface of the sample should be smooth and at the same time to prevent the anorthite crystals being swept from the surface during mechanical polishing led to the application of a short polishing time of 15 min. The EBSD analysis results of this sample were given in Figure 4. The SE-SEM image (Fig. 4 a) showed that the protrusions on the surface of the anorthite crystals were still vaguely present. The microstructure details, which are not visible in the SE-SEM image and were highlighted by yellow arrows (Fig 4 b), have been successfully revealed with the pattern quality map, since EBSD operates at high angles and very small interaction volume [23, 28, 29]. The fact that all crystals were resolved in the pattern quality map indicated that no second phase was formed in addition to anorthite during the heat treatment, supporting the XRD result. However, the EBSD technique is negatively affected by microstructure imperfections, sample preparation inadequacies, and surface topography. Even though the sample is polished, some anorthite crystals visible in the SE-SEM image could not be fully resolved (shown with green arrows in Fig. 4 b) in the pattern quality map as a result of the existence of height differences between some regions in the microstructure and remaining protrusions on the anorthite surfaces. In addition, while the SE-SEM images taken from the non-polished surface (Fig. 3) of the glass-ceramic showed that almost the entire surface is covered with anorthite phase, the SE-SEM image and diffraction pattern quality map (Fig. 4 a, b) indicated that some remaining glass phases become visible between the anorthite crystals with the removal of a few micrometers from the surface by mechanical polishing. Figures 4 c and d show the phase map and the quantities of phases (%) that exist in the examined region, respectively. In the phase map, the anorthite phase was represented by a yellow color, while the black color was used for the amorphous remaining glassy phase+the unresolved crystals. 68 % of the examined area was composed of anorthite crystals and 32 % contains glassy phase+unresolved crystals indicated with green arrows in the pattern quality map (Fig. 4 b). The area covered by the anorthite crystals on the same image (Fig. 4 a) was determined as ~ 74 % using ImageJ software, supported the EBSD analysis results.

The directions in which the crystal orientation maps were obtained are schematically represented in Figure 4 e. Further, the positions of the planes of the anorthite crystals according to the examined directions as normal, rolling and transverse are determined by the color key given in Figure 4 f. Each measured direction in the crystalline orientation map is associated with the red, green, blue colors and the soft color gradations between them found in the color key. Figure 4 g, i, k and h, j, l showed the crystal orientation maps and related inverse pole figures in the normal (Fig. 4g, h), rolling (Fig. 4 i, j) and transverse (Fig. 4 k, l) directions, respectively. When firstly considering the normal direction crystal orientation map, it has been observed that anorthite crystals have green, red, blue and tones of these colors. Nevertheless, the slight predominance of the green color tones in the normal crystal orientation map (Fig. 4 g) and a slight polarity in the regions of inverse pole figure (Fig. 4 h) corresponding to the region expressed by green color and its tones in the color key (Fig. 4 f) indicated that the face of the anorthite crystal $\{100\}$ has a relatively higher ratio of lying parallel to the surface than the edges ($\{110\}$) and corners ($\{111\}$) of the crystal. On the other hand, it was observed that anorthite crystals indicated with white arrows and encoded with green color in the normal direction crystal orientation map have a green and pinkish red tone as little dominance in the rolling and transverse direction crystal orientation maps (Fig. 4 i, k), respectively. These findings firstly proved that the planes of these anorthite crystals expressing the same edges and corners and whose $\{100\}$ faces are parallel to the surface, were grown to the inner region of the remaining glass by orienting in a

similar direction. In addition, some grains represented with red color (shown with yellow arrows in Fig. 4 g) in the normal direction crystal orientation map was coded with only blue and green colors in the rolling (Fig. 4 i) and transverse (Fig. 4 k) directions crystal orientation maps. This pointed out that similar faces of these anorthite crystals were formed by orientation in the same direction. Moreover, according to color differences in the three orientation maps, different planes of anorthite crystals were oriented parallel to the surface. This showed that different planes of many anorthite crystals coded with different colors were formed on the surface and extended towards to deep regions of the remaining glass by random orientation during the heat treatment.



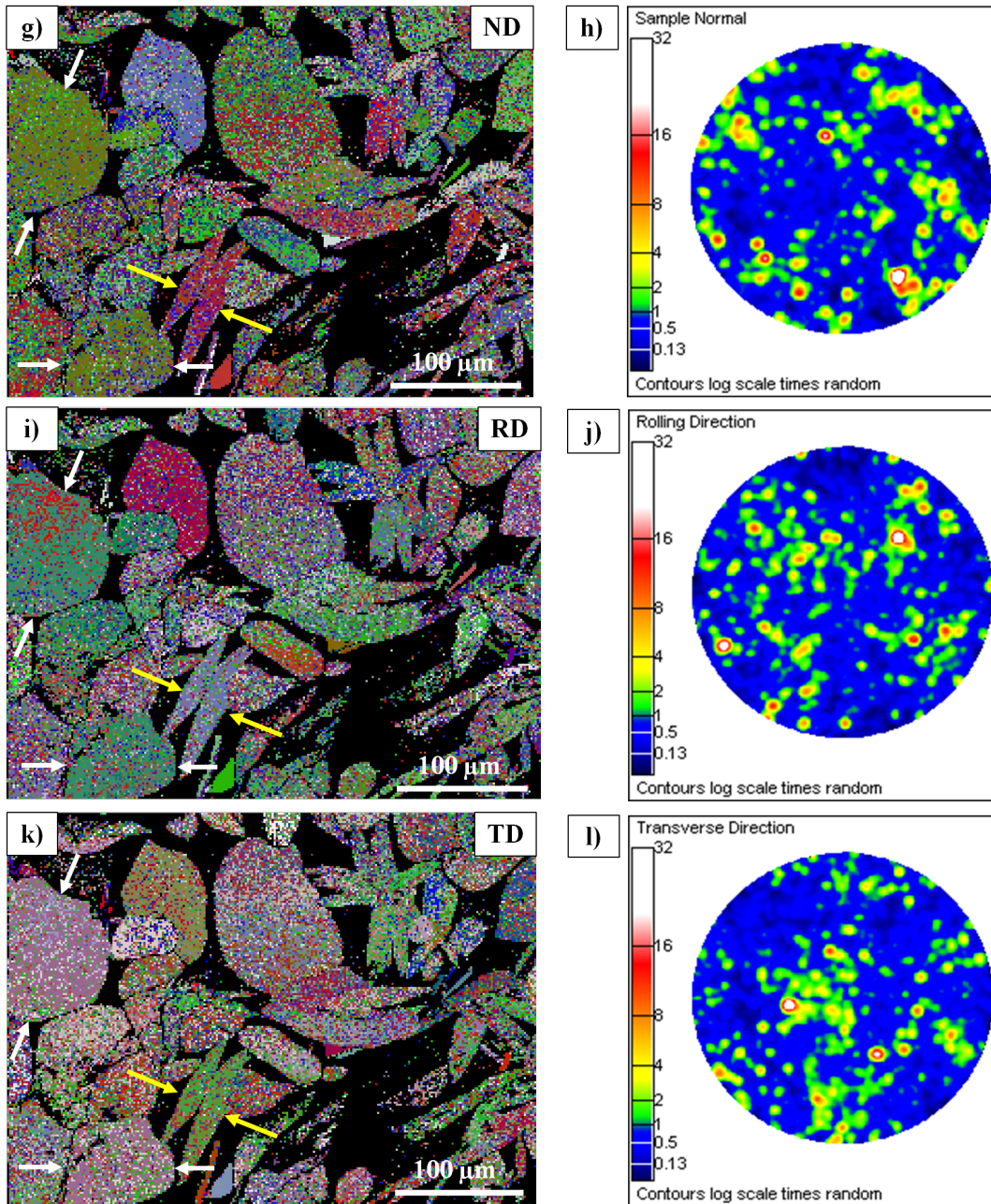
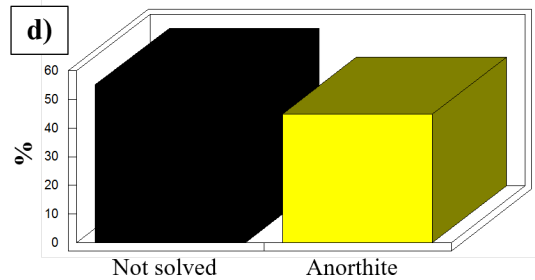
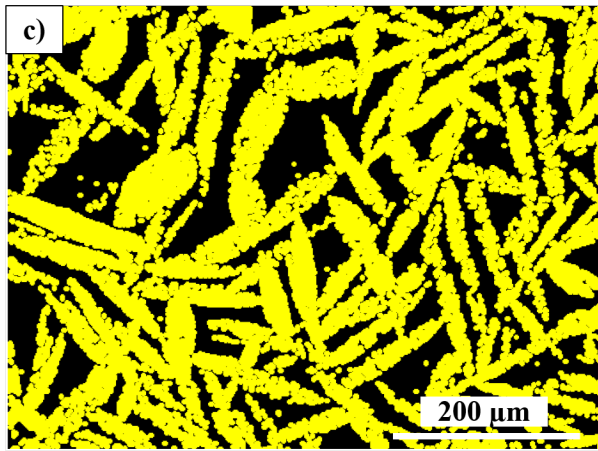
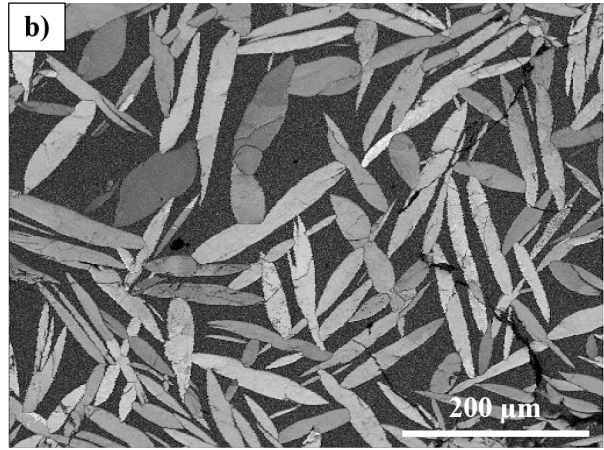
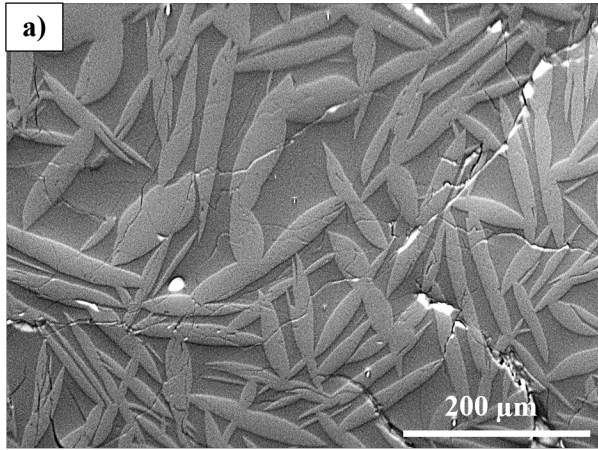
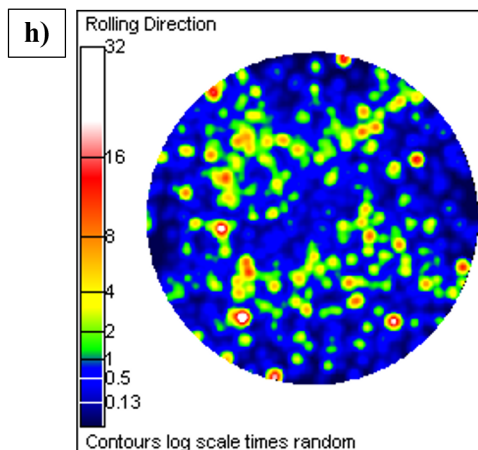
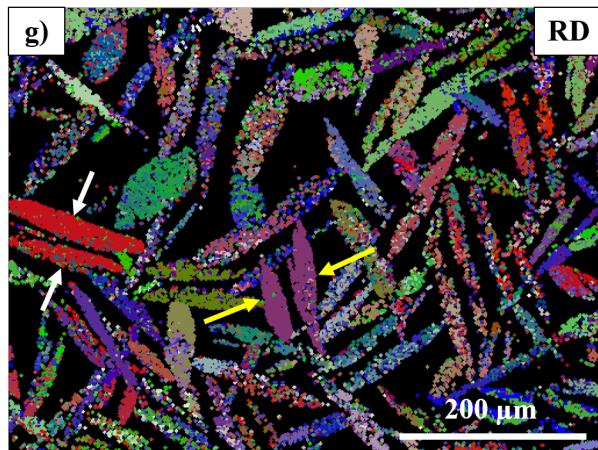
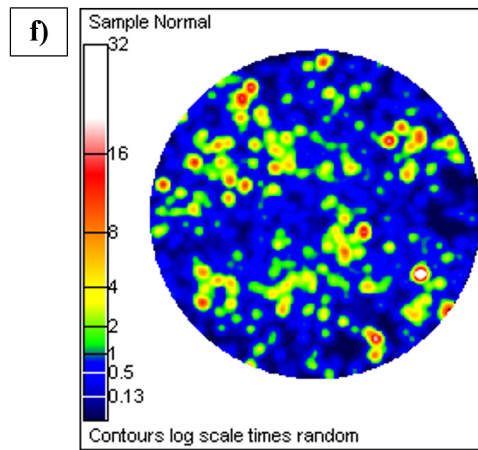
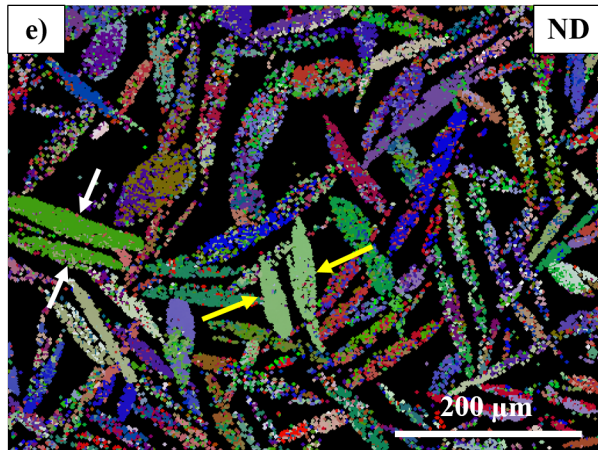


Figure 4. (a) Electron image (b) pattern quality map and (c) phase map obtained from the examined region. (d) Quantities of phases (%) exist in the examined region. (e) Measurement directions of EBSD technique (f). Color key for crystal orientation maps. (g, i, k) Crystal orientation maps and (h, j, l) inverse pole figures in the (g, h) normal, (i, j) rolling and (k, l) transverse directions, respectively.

To investigate the distribution of the anorthite crystals further below the surface, the polishing time of the glass-ceramic surface was increased to 30 min (Fig. 5). According to SE-SEM image and EBSD pattern quality map of the examined region (Fig. 5 a, b), only elongated anorthite crystals remained on the glass-ceramic surface with the extension of the polishing time. Considering this information, it can be deduced that first elongated anorthite crystals were formed on and near the surface during heat treatment, and in the following process, these crystals only found the opportunity to grow on the outer surface and could be transformed into a circular shape. This and the increment in the amount of remaining glass phase surrounding the anorthite crystals when going to the deep region with the increase of the polishing time supported the interpretation made about the effect of element B on crystallization. In addition, the elongated



Phases	%
Anorthite	45
Not Solved	55



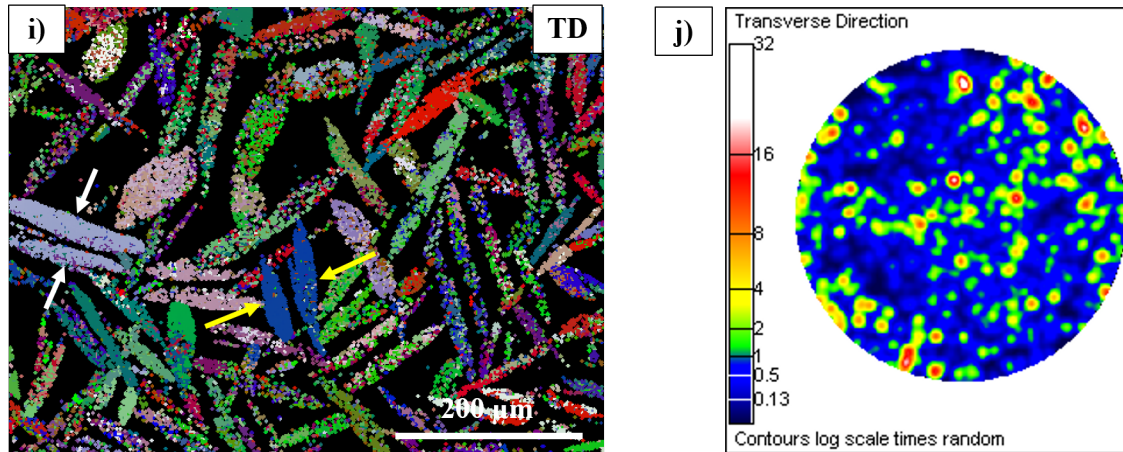


Figure 5. (a) Electron image (b) pattern quality map and (c) phase map obtained from the examined region. (d) Quantities of phases (%) exist in the examined region. (e, g, i) crystal orientation maps and (f, h, j) inverse pole figures in the (e, f) normal, (g, h) rolling and (i, j) transverse directions, respectively.

crystals on the outer surface may not have transformed to a circular shape because of insufficient space. The elongated anorthite crystals seen in Fig. 5 could be a continuation of the circular crystals shown in Figure 4 or different anorthite crystals formed below the surface. Pattern quality map (Fig. 5 b) revealed that anorthite crystals could be resolved because of removing some of the factors that negatively affect the EBSD analysis performed on the sample surface with the increase in polishing time. In the first EBSD analysis (Fig. 4 c and d) although the unresolved anorthite crystals were also included in the amount of black region formed by the amorphous glass, the obtained percentage (32 %) was lower than the amount of anorthite. In the second EBSD analysis results, since all anorthite crystals can be resolved, the black color not solved regions in the phase map belongs only to the glassy phase due to its amorphous nature (Fig. 5 c). Nevertheless, the amount of glassy phase in the studied region was measured as 55 %, and it was more than the anorthite phase (Fig. 5 d). ImageJ measurements performed in the same region showed that the areas covered by the anorthite crystals, and the glassy phase were approximately 47 and 53 %, respectively, consistent with the EBSD analysis results. With the extension of the polishing time by 15 min, the amount of glassy phase between the anorthite crystals increased by approximately 72 %, although only a few micrometer materials were removed from the surface. The normal, rolling and transverse direction orientation maps (Fig. 5 e, g, i) obtained in this EBSD analysis showed that some anorthite crystals grew by orientation, supporting the results of the first analysis. For example, two anorthite crystals shown with white arrows in the orientation maps were colored with green in the normal direction crystal orientation map (Fig. 5 e), with red in the rolling direction crystal orientation map (Fig 5 g) and with light purple in the transverse direction crystal orientation map (Fig. 5 i). Likewise, two anorthite crystals shown with yellow arrows in the three crystal orientation maps were represented with the same color in all crystal orientation maps. The concentration regions in the inverse pole figures also supported this orientation behavior (Fig. 5 f, h, j). This showed that these anorthite crystals, indicated by arrows have formed and grown as their $\{100\}$ faces, $\{110\}$ edges and $\{111\}$ corners parallel to each other and oriented in the same direction. However, compared to the surface polished for 15 min slightly higher color differences in the normal direction orientation maps, showed that the different planes of the crystals formed below the surface also lie parallel to the surface. Although the RD and TD orientation maps showed that some of these crystals were oriented in such a way that their same planes were parallel to each other, it has been observed that the tendency of lying the same planes parallel to the surface decreases as moved deeper region from the surface. The sparseness of the anorthite crystals from the surface to deeper regions and the increase in the amount of remaining glass can be assumed as the reason for the random orientation in inner regions. This result was consistent with the work [17] in which EBSD investigated the growth directions of fresnoite crystals in a

2BaO₃ TiO₂ 2.75SiO₂ glass. In that study, the orientation degrees of the fresnoite crystals decreased in the deep regions.

4. CONCLUSIONS

In this study, brucite with calcite, kaolin, ulexite natural raw materials and commercial MgF₂ were mixed in certain proportions considering the desired glass composition and parent glass was obtained in the CMAS system. Firstly, the nucleation and crystallization temperatures were determined by performing DTA measurement to the parent glass and heat treatment was applied according to the DTA results. XRD and SEM investigations revealed that anorthite crystals were formed during heat treatment and glass-ceramic was obtained in the CAS system with the realization of surface crystallization.

The crystal orientation maps obtained in EBSD analyses showed that some anorthite crystals formed on the surface with their same planes parallel to each other and grew to deeper regions of the remaining glass by being oriented in the same direction. However, the variety of colors in the normal, rolling and transverse directions and the polarization states in the related inverse pole figures revealed that most of them were formed by the orientation of the same planes in different directions. EBSD analysis belongs to the inner regions of glass-ceramic showed that the possibility of the same planes of the crystals to lie parallel to the surface decreased as being far from the surface.

REFERENCES

- [1] Deubener, J., Allix, M., Davis, M.J., Duran, A., Höche, T., Honma, T., Komatsu, T., Krüger, S., Mitra, I., Müller, R., Nakane, S., Pascual, M.J., Schmelzer, J.W.P., Zanutto, E.D., Zhou, S. (2018). Updated definition of glass-ceramics. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 501, 3–10. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2018.01.033>.
- [2] Sakamoto, A., Yamamoto, S. (2010). Glass–Ceramics: Engineering Principles and Applications. *International Journal of Applied Glass Science*, 1(3), 237–247. <https://doi.org/10.1111/j.2041-1294.2010.00027.x>.
- [3] Mcmillan, P.W. (1982). The Crystallisation of Glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 52, 67-76. [https://doi.org/10.1016/0022-3093\(82\)90281-2](https://doi.org/10.1016/0022-3093(82)90281-2).
- [4] Zanutto, E.D. (2000). Experimental studies of surface nucleation and crystallization of glasses. in *Nucleation and Crystallization in Glass and Liquids*. *Journal of American Ceramic Society*, 65-74. ISBN-13: 978-0944904572.
- [5] Davis, M.J., Zanutto, E.D. (2017). Glass-ceramics and realization of the unobtainable: Property combinations that push the envelope. *Materials Research Society*, 42, 195-199. <https://doi.org/10.1557/mrs.2017.27>.
- [6] Fernandes, M.H.V., Silva, A.M.B. (2016). Glass-Ceramics: Concepts and Practical Aspects. in *Overall Aspects of Non-Traditional Glasses: Synthesis, Properties and Applications*. Bentham e-books, 39-65. ISBN: 978-1-68108-208-0.
- [7] Ozabaci, M., Aksan, M.A., Kirat, G., Kizilaslan, O., Yakinci, M.E. (2006). Preparation and characterization of CaO-Al₂O₃-SiO₂ (CAS) glass-ceramics. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 454, 8–12. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2016.10.019>.
- [8] Morsi, M.M., Khater, G.A., Range, K.J. (2001). Glass ceramics in the system diopside, anorthite-orthoclase prepared by using some industrial waste materials. *Glass Technology*, 42(6), 160-164.

- [9] Pinckney, L.R. (2001). Glass Ceramics, Encyclopedia of Materials: Science and Technology. Elsevier, 3535-3540. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/00629-X>.
- [10] Marghussian, V. (2015). Nanoglass Ceramics Processing Properties and Applications. Elsevier, 2-61.
- [11] Leonelli, C., Manfredini, T., Paganelli, M., Pozzi, P., Pellacani, G.C. (1991). Crystallization of some anorthite-diopside glass precursors. Journal of Materials Science, 26, 5041-5046.
- [12] Carter, C.B., Norton, M.G. (2013). Processing Glass and Glass-Ceramics in Ceramic Materials Science and Engineering. Springer, New York, 389-409. https://doi.org/10.1007/978-0-387-46271-4_26
- [13] Xiao, H., Cheng, Y., Yang, Q., Senda, T. (2006). Mechanical and tribological properties of calcia–magnesia–alumina–silica-based glass–ceramics prepared by in situ crystallization. Materials Science and Engineering:A, 423(1–2),170-174. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.09.131>.
- [14] Merkit, Z.Y., Toplan, H.O., Toplan, N. (2018). The crystallization kinetics of CaO–Al₂O₃–SiO₂ (CAS) glass–ceramics system produced from pumice and marble dust. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 134, 807–811. <https://hdl.handle.net/20.500.12619/69704>.
- [15] Russel, C., Wisniewski, W. (2021). How Can Surface-Crystallized Glass-Ceramics Be Piezoelectric?. Crystal Growth Design, 21, 2405–2415. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.1c00029>.
- [16] Wisniewski, W., Russel, C. (2015). EBSD measurements of phlogopite glass ceramics. The Royal Society of Chemistry, 17, 8671–8675. <https://doi.org/10.1039/c5ce01763g>.
- [17] Wisniewski, W., Nagel, M., Volksch, G., Russel, C. (2010). Electron Backscatter Diffraction of Fresnoite Crystals Grown from the Surface of a 2BaO₃ TiO₂ 2.75SiO₂ Glass. Crystal Growth Design, 10(3), 1414-1418. <https://doi.org/10.1021/cg901407d>.
- [18] Russel, C. (1997). Oriented crystallization of glass. A review. Journal of Non-Crystalline Solids, 219, 212-218. [https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(97\)00271-8](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(97)00271-8).
- [19] Muller, R., Zanotto, E.D., Fokin, V.M. (2000). Surface crystallization of silicate glasses: nucleation sites and kinetics. Journal of Non-Crystalline Solids, 274, 208–231. [https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(00\)00214-3](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(00)00214-3).
- [20] Peruzzo, L., Fenzi, F., Vigato, P.A. (2011.) Electron Backscatter Diffraction (EBSD): A New Technique for the Identification of Pigments and Raw Materials in Historic Glasses and Ceramics. Archaeometry, 53(1), 178–193. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.2010.00540.x>.
- [21] Stojakovic, D. (2012). Electron backscatter diffraction in materials characterization. Processing and Application of Ceramics, 6(1), 1–13. <https://doi.org/10.2298/PAC1201001S>.
- [22] Schwartz, A.J., Kumar, M., Adams, B.L., Field, D.P. (2009). Electron backscatter diffraction in materials science. 2nd edition, Springer, New York. ISBN: 978-0-387-88136-2.
- [23] See <http://www.ebsd.com/introduction> for further details.
- [24] Stebbins, J.F., Dubinsky, E.V., Kanehashi, K., Kelsey, K.E. (2008). Temperature effects on non-bridging oxygen and aluminum coordination number in calcium aluminosilicate glasses and melts. Geochimica et Cosmochimica Acta, 72, 910–925. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2007.11.018>.

- [25] Yurdakul, A., Günkaya, G., Kavas, T., Dölekçekiç, E., Karasu, B. (2014). Investigations on Fiber Production Attempts from the Borosilicate and SMFMZS (SrO-MgO-Fe₂O₃-Mn₂O₃-ZrO₂-SiO₂) Glass Systems. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 14(OZ5701), 1-9.
- [26] Fox, K.M., Edwards, T.B., Peeler, D.K. (2008). Control of Nepheline Crystallization in Nuclear Waste Glass. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 5(6), 666–673. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7402.2008.02250.x>.
- [27] Deshkar, A., Gulbiten, O., Youngman, R.E., Mauroc, J.C., Goel, A. (2020). Why does B₂O₃ suppress nepheline (NaAlSiO₄) crystallization in sodium aluminosilicate glasses? *Physical Chemistry Chemical Physics*, <https://doi.org/10.1039/D0CP00172D>.
- [28] Sitzman, S.D., Nolze, G., Nowell, M.M. (2010). EBSD Pattern Quality and its Use in Evaluating Sample Surface Condition. *Microscopy and Microanalysis*, 16, 698-699. <https://doi.org/10.1017/S143192761005467X>.
- [29] Wright, S.I., Nowell, M.M. (2006). EBSD Image Quality Mapping. *Microscopy and Microanalysis*, 12, 72-84. <https://doi.org/10.1017/S1431927606060090>.

Experimental Determination of the Engine Vibration and Mechanical Noise Depending on Vehicle Speed

Çağatay ZAMAN¹  Tolga TOPGÜL^{2,*}  Suat SARIDEMİR³ 

¹Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Automotive Engineering, Yenimahalle/ANKARA

²Gazi University, Faculty of Technology, Department of Automotive Engineering, Yenimahalle/ANKARA

³Düzce University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, DÜZCE

Graphical/Tabular Abstract

In this study, the effects of the variation of the main driving parameters on vibration and mechanical noise have been experimentally examined.

Article Info:

Research article
Received: 25/01/2022
Revision: 30/01/2022
Accepted: 30/03/2022

Highlights

- Vibration and mechanical noise
- Engine speed and load
- Vehicle test on the chassis dynamometer

Keywords

Vibration
Noise
Internal combustion engine
Engine operating parameters



Figure A. Experimental setup

Purpose: In this study, it is aimed to investigate the effects of the driving characteristics of a vehicle on vibration and mechanical noise. For this purpose, a passenger car has been tested at different vehicle speeds and gears on the chassis dynamometer.

Theory and Methods: The study was performed experimentally using the test bench as seen in Figure A. The experimental study was performed in two different gears. Firstly, the test vehicle was tested at a vehicle speed range of 40-110 km/h and a particular gear (5th gear) in straight-line conditions. In the second phase, the test vehicle was run at 50 and 90 km/h for the same driving resistances but in the 4th gear. All data obtained were analyzed and compared to each other.

Results: According to the measurement results in the 5th gear, depending on the variation of the vehicle speed from 40 km/h to 110 km/h, the vibration total value increased by approximately 3 times, and the noise increased by 9.4 dB(A). When the effect of different gears on vibration was considered, the results showed that the vibration total values in the 5th gear are lower than that of the 4th gear (approximately 15.3% at 50 km/h and 30.3% at 90 km/h vehicle speed). However, there was no significant difference in the noise values between the two gears.

Conclusion: According to the measurement results at a particular gear, the vibration total value and noise increased depending on the vehicle speed. In other words, vibration and noise were affected by both engine speed and load. The results of the performed tests at the same vehicle speeds in the 4th and 5th gears to understand the effect of the engine speed and load on vibration and noise clearly showed that engine speed affects vibration and mechanical noise more than engine load considered to the test conditions in this study.



Experimental Determination of the Engine Vibration and Mechanical Noise Depending on Vehicle Speed

Çağatay ZAMAN¹ Tolga TOPGÜL^{2,*} Suat SARIDEMİR³

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Otomotiv Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yenimahalle/ANKARA

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Yenimahalle/ANKARA

³Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, DÜZCE

Abstract

The main parameters affecting the driving characteristics of a vehicle with an internal combustion engine are engine speed and engine load. The driver essentially sets the vehicle speed and the key control point for this adjustment is the accelerator pedal. The amount of the pressure on the accelerator pedal depends on the gear and the resistances of the vehicle opposing its movement. The aim of this study is to experimentally examine the effects of variation in the main driving parameters on vibration and noise. For this purpose, vibration and noise measurements have been carried out vehicle speed range of 40-110 km/h in a particular gear (5th gear) and straight-line conditions. Depending on the vehicle speed (from 40 km/h to 110 km/h), the vibration total value increased by approximately 3 times and the noise increased by 9.4 dB(A). In addition, the tests at the vehicle speeds of 50 km/h and 90 km/h were repeated in the 4th gear and compared with the data obtained in the 5th gear. The measurement results in the 5th gear showed that the vibration total value is lesser than 15.3% at 50 km/h and 30.3% at 90 km/h vehicle speed compared to that of the 4th gear. When it comes to the noise measurement results were compared, no significant differences between the two gears were obtained.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 25/01/2022
Düzeltilme: 30/01/2022
Kabul: 30/03/2022

Keywords

Vibration
Noise
Internal combustion engine
Engine operating parameters

Anahtar Kelimeler

Titreşim
Gürültü
İçten yanmalı motor
Motor işletme parametreleri

Taşıt Hızına Bağlı Olarak Motor Titreşimi ve Mekanik Gürültünün Deneysel Olarak Belirlenmesi

Öz

İçten yanmalı motora sahip bir taşıtın sürüş karakteristiğini etkileyen temel parametreler motor devri ve motor yüküdür. Sürücü temelde taşıtın hızını ayarlar ve bu ayar için temel kontrol noktası gaz pedalıdır. Gaz pedalına basılma miktarı, taşıtın karşılaştığı dirençlere ve vites kademesine bağlıdır. Bu çalışmanın amacı taşıtın temel sürüş parametrelerindeki değişimin titreşim ve gürültüye etkisini deneysel olarak incelemektir. Bu amaçla düz yol koşullarında ve belirli bir vites kademesinde (5. vites) 40-110 km/h taşıt hız aralığında titreşim ve gürültü ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Taşıt hızına bağlı olarak (40 km/h hızdan 110 km/h hıza), toplam ortalama titreşim yaklaşık 3 kat, gürültü ise 9,4 dB(A) artmıştır. Ayrıca 50 km/h ve 90 km/h taşıt hızlarındaki testler 4. vites kademesinde de tekrarlanmış ve 5. viteste elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır. 5. vitesteki ölçüm sonuçları, toplam ortalama titreşim değerinin 4. vitese göre 50 km/h araç hızında %15,3 ve 90 km/h araç hızında %30,3 daha az olduğunu göstermiştir. Gürültü ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında ise; her iki vites kademesi arasında dikkate değer bir fark görülmemiştir.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde içten yanmalı motorlara sahip taşıtlar ulaşım alanında ağırlıklarını korumayı sürdürmektedirler. Yüzyılı aşkın bir süredir günlük hayatımızı kolaylaştıran ve hızlandıran bu makinelerin neden olduğu bazı olumsuzluklar da vardır. Bunların başında zararlı egzoz emisyon salınımları ifade

edilebilir. Ayrıca özellikle sürüş konforunu olumsuz etkileyen titreşim ve gürültü de bu motorların neden olduğu olumsuzluklar arasında yer almaktadır.

İçten yanmalı motorlardaki titreşim ve gürültüye yönelik çalışmalar daha çok sönümleme elemanları [1-3], motor çalışma parametreleri [4,5] ve özellikle alternatif yakıtlara [6,7] yönelik konular üzerinde yoğunlaşmaktadır.

Motor devrinin titreşime etkisinin incelendiği Gültekin ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [8], benzinli ve dizel motorlar deneysel olarak karşılaştırılmıştır. 1000-3500 rpm motor devir aralığında her iki motor yüksüz olarak çalıştırılmış ve üç boyutlu ivmeölçer ile titreşim ölçümleri yapılmıştır. Benzin motoruna kıyasla dizel motorunda titreşimin daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca 1000 rpm motor devrindeki ortalama ivme dikkate alındığında dizel motorundaki titreşiminin benzinli motordakinden 42,2 kat daha fazla olduğu ifade edilmiştir.

Biyodizel-dizel yakıt karışımlarının motor titreşimlerine etkisinin deneysel olarak incelendiği Sarıdemir vd. tarafından çalışmada [9], atık bitkisel yağlardan elde edilmiş biyodizel ve dizel yakıtı karışımları ile yalnız dizel yakıtı kullanılmıştır. Motor titreşimlerinin üç eksenli piezoelektrik ivmeölçer ile ölçüldüğü çalışmada en büyük titreşim tüm yakıtlar için eksenel yönde elde edilmiştir. Motor devrine bağlı olarak bütün test yakıtlarında titreşim artış gösterirken, Ab50 karışımının (% 50 biyodizel-%50 dizel yakıtı) motor titreşimlerini azaltmada daha etkili olduğu ifade edilmiştir.

Flekiewicz ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [10], motor bloğunun titreşimleri iki farklı yakıt (benzin ve LPG) için karşılaştırılmıştır. Çalışmada, LPG'nin benzine kıyasla vuruntuya daha dirençli olması ve gaz yakıtların hava ile daha iyi karışım oluşturabilmesinin önemli avantajlar olduğu belirtilmiştir. Motor yükü ve hızındaki artış her iki yakıtta da daha yüksek maksimum indike basınç elde edilmesini sağlamıştır. En yüksek indike basınç değerleri LPG kullanımında elde edilmesine rağmen (2,28–5,14 MPa iken benzinde 1,9-4,93 MPa) motor devri ve yük artışının motor bloğundaki titreşime etkileri kıyaslandığında LPG'nin daha düşük ivme değerlerine sahip olduğu görülmüştür. LPG yakıtında ivme, 4,1 m/s²'den 95,5 m/s²'ye artarken; benzinde 22,1'den 100,5 m/s²'ye yükseldiği ifade edilmiştir.

Sarıdemir ve çalışma arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada [11], motor devri ve yükünün bir dizel motorunda titreşim ve gürültüye etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Yüksüz ve yüklü olarak 1500 rpm, 2000 rpm ve 2500 rpm motor devirlerinde gerçekleştirilen deneylerde motor titreşimleri ve gürültünün motor devri ve yüküne bağlı olarak artış gösterdiği ifade edilmiştir. Araştırmacılar silindir içerisindeki yüksek yanma basıncının ve motor parçaları arasındaki artan sürtünmenin bu sonuçta etkili olabileceğini belirtmişlerdir.

Öztürk ve Karabulut [12], krank milinin çevrimlik açısal hız değişimleri ve motor bloğu titreşimlerini inceledikleri çalışmalarında tek silindirli bir dizel motoru için oluşturdukları dinamik modeli kullanmışlardır. Yapılan çalışmada gaz kuvvetlerinin motor bloğunun krank mili eksenine etrafındaki açısal titreşimlere, krank milinin balanssızlığı ve piston kütesinin ise yatay ve düşey doğrultudaki doğrusal titreşimlere neden olduğu belirtilmiştir.

Bu çalışmada içten yanmalı motora sahip bir taşıtın sürüşünü etkileyen temel kontrol parametrelerinin titreşim ve gürültüye etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Bu temel kontrol parametreleri, motor devri ve motor yükü olarak dikkate alınmıştır. Temelde taşıt sürücüsü genel olarak sürüş esnasında taşıtın hızını ayarlar ve bu amaç için kullandığı gaz pedalı ile motor devri ve motor yükünü değiştirir. Bu değişim miktarı sürüş esnasında taşıtın karşılaştığı dirençlere ve kullanılan vites kademesine bağlıdır. Yapılan bu deneysel çalışmada düz yol koşullarında ve belirli bir vites kademesinde (5. vites) taşıt hızına bağlı olarak titreşim ve gürültü ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca 50 ve 90 km/h taşıt hızlarında 5. viteste elde edilen veriler bir alt vites kademesindeki ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmadaki temel amaç aynı taşıt hızında farklı vites kademesinin kullanımıyla ortaya çıkan motor devri ve motor yükü değişiminin titreşim ve gürültü üzerindeki etkisini belirlemektir.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

Deneysel çalışma Sun marka RAM 2000 model şasi dinamometresinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Şekilde yer alan sistem ile taşıtın en yüksek motor gücü ölçülebildiği gibi taşıt ağırlığı, yuvarlanma direnci (Eşitlik 1) ve aerodinamik direnç (Eşitlik 2) gibi çeşitli parametreler dikkate alınarak farklı taşıt hızlarında sürüş simülasyonu da yapılabilmektedir. Gerçek sürüş koşullarında motor ve aktarma organlarının soğutulması taşıtın çevresinde oluşan hava akışı ile gerçekleşmektedir. Laboratuvar ortamında bunun sağlanabilmesi için ölçüm sisteminde bir fan yer almaktadır. Deneysel ölçümler esnasında ölçüm sonuçlarını etkilemesin diye ölçüm boyunca fan kapalı tutulmuştur. Alınan ölçüm datalarının ardından bir sonraki ölçüm noktasına kadar fan çalıştırılmıştır. Testler, taşıtın teknik özellikleri dikkate alınarak belirli bir vites kademesinde (5. vites) 40-110 km/h taşıt hızı aralığında gerçekleştirilmiştir. Taşıt konforunu belirlemeye yönelik olarak her bir hızda titreşim ve gürültü ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca deneyler 50 ve 90 km/h taşıt hızları için 4. vites kademesinde tekrarlanarak önceki ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 1. Test düzeneği

$$R_{ro} = W_{\text{taşıt}} \cdot f_{ro} \quad (1)$$

Eşitlik 1’de yer alan R_{ro} yuvarlanma direncini (N), $W_{\text{taşıt}}$ taşıtın ağırlığını (N) ve f_{ro} yuvarlanma direnç katsayısını ifade etmektedir.

$$R_a = 0,0386 \cdot \rho_{\text{hava}} \cdot A \cdot C_d \cdot V^2 \quad (2)$$

Eşitlik 2’de yer alan R_a aerodinamik direnci (N), ρ_{hava} havanın yoğunluğunu (kg/m^3), A taşıtın ön izdüşüm alanını (m^2), C_d aerodinamik direnç katsayısını ve V ise taşıtın hızını (km/h) temsil etmektedir.

Testler, Çizelge 1’de teknik özellikleri verilen dört zamanlı, dört silindri, buji ile ateşlemeli ve çok nokta port enjeksiyonlu motora ve beş ileri manuel vites kutusuna sahip önden motorlu ve önden çekişli otomobil üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Şasi dinamometresinin yanı sıra deneylerde kullanılan diğer cihazlar da Şekil 1’de verilmiştir. Titreşim ölçümünde üç eksenle ölçüm yapabilen, frekans aralığı 0,3 – 10000 Hz, hassasiyeti 1 mV/ms^{-2} ve rezonans frekansı 30 kHz olan Brüel & Kjaer 4527 model piezoelektrik ivmeölçer kullanılmıştır. İvmeölçer, motorun şasiye bağlantı noktası olan motor takozu üzerine bağlanmıştır. İvmeölçerin verileri FFT analizi yapabilen dört kanallı Vibrotest 80 model veri toplama cihazına aktarılmıştır. Veriler, Hanning filtreleme yöntemiyle 6400 çözünürlükte analiz edilmiştir. Gürültü ölçümleri, 55 dB(A)-140,1 dB(A) ölçüm aralığında kullanılabilen Svantek 104 model dozimetre ile ISO 362-1:2007 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Taşıtın dışından gerçekleştirilen ölçümlerde cihaz, motordan yaklaşık 1 m uzakta olacak şekilde konumlandırılmış ve bu ölçüm şartlarında yeri değiştirilmemiştir. Taşıtın iç kısmından yapılan ölçümlerde ise cihaz, yaklaşık olarak taşıtın ön camı hizasında orta konsola yerleştirilmiştir. Ayrıca testlerde Bosch KTS 540 diagnostik test cihazı ile motor devri ve gaz kelebek açıklığı (GKA) verileri alınmıştır. Diagnostik test cihazı, Bosch FSA 740 motor test cihazı ünitesi içinde yer almaktadır.

Çizelge 1. Taşıt testlerinde kullanılan aracın teknik özellikleri

Taşıtın marka ve modeli	Renault Megane I Grandtour
Boyutları (UxGxY)	4437x1698x1420 mm
Kütlesi	1160 kg
Aerodinamik direnç katsayısı	0,35
Silindir sayısı	4
Toplam kurs hacmi	1598 cm ³
Sıkıştırma oranı	10:1
Maksimum motor torku	148 Nm (3750 rpm)
Maksimum motor gücü	78 kW (5750 rpm)
Vites kutusu redüksiyon oranları	
1. Vites	3,36
2. Vites	1,86
3. Vites	1,32
4. Vites	1,03
5. Vites	0,82
Diferansiyel dişli oranı	3,87

Titreşim verileri için ivmeölçerin her bir kanalından alınan ivme değerleri kullanılarak literatürdeki çalışmalarda [11,13-15] dikkate alınan Eşitlik 3 aracılığıyla ortalama karekök değerleri (a_{RMS}) hesaplanmıştır. Hesaplanan a_{RMS} , titreşimin varlığını ifade etmek için kullanılan ve sistem tarafından üretilen titreşimin genliğinin istatistiksel ortalama değerini ifade eden bir büyüklüktür [16,17].

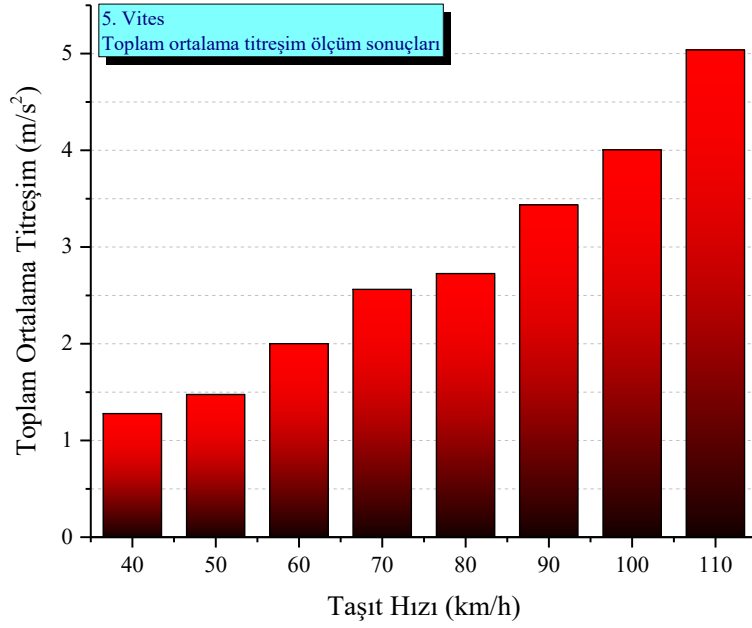
$$a_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n a_k^2} \quad (3)$$

Deney sonuçlarının yer aldığı grafiklerde kullanılan toplam ortalama titreşim, ivmeölçerin x, y ve z kanallarından alınan ölçüm sonuçlarına göre hesaplanan ortalama karekök değerleri (a_{RMS}) kullanılarak literatürdeki [13,18-20] gibi Eşitlik 4 ile hesaplanmıştır.

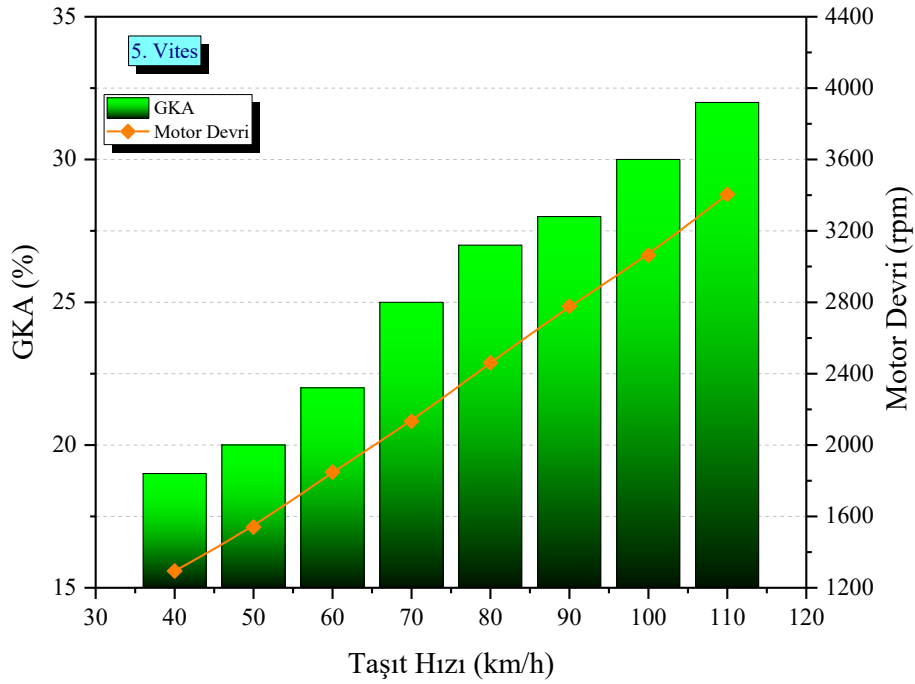
$$a_{toplama} = \sqrt{a_{RMS(x)}^2 + a_{RMS(y)}^2 + a_{RMS(z)}^2} \quad (4)$$

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Deneyler, taşıtın düz yol koşullarında karşılaştığı dirençler dikkate alınarak oluşturulan deney şartlarında ve belirli bir vites kademesinde (5. vites) 40–110 km/h hız aralığında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde temel olarak titreşim ve gürültü ölçümleri yapılmıştır. Şekil 2’de taşıt hızına bağlı olarak toplam ortalama titreşiminin değişimi görülmektedir. Taşıt hızı arttıkça toplam ortalama titreşim de artış göstermektedir. 40 km/h taşıt hızına göre 110 km/h hıza ulaşıldığında toplam ortalama titreşimde yaklaşık 3 kat artış görülmüştür. Taşıt deneylerinde hız artışı için gaz pedalına basma miktarının bir başka deyişle buji ile ateşlemeli bir motorda GKA’nın artırılması gerekmektedir. Aynı vites kademesinde yapılan bu işlem hem motor devrinin hem de motor yükünün artışına neden olmaktadır. Şekil 3’te 40-110 km/h taşıt hızlarına karşılık gelen motor devri ve GKA değişimi verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi deneysel çalışmada her iki motor işletme parametresi de hızla bağlı değişim göstermiştir. 40 km/h taşıt hızı için motor devri 1294 rpm ve GKA %19 iken, hız artırılarak 110 km/h hıza ulaşıldığında motor devri 3405 rpm’e ve GKA %32’ye artmıştır.



Şekil 2. Taşıt hızına bağlı olarak toplam ortalama titreşiminin değişimi



Şekil 3. Taşıt hızına bağlı olarak motor devri ve GKA'nın değişimi

40 km/h taşıt hızından itibaren artan taşıt hızı, bir yandan birim zamanda gerçekleşen çevrim sayısının diğer yandan da GKA'nın artmasına bağlı olarak silindir içerisine alınan dolgunun yani enerjinin artmasına ve bunun sonucu olarak da silindir içi basıncını ve atalet kuvvetlerini arttırarak titreşimin daha fazla görülmesine neden olmaktadır.

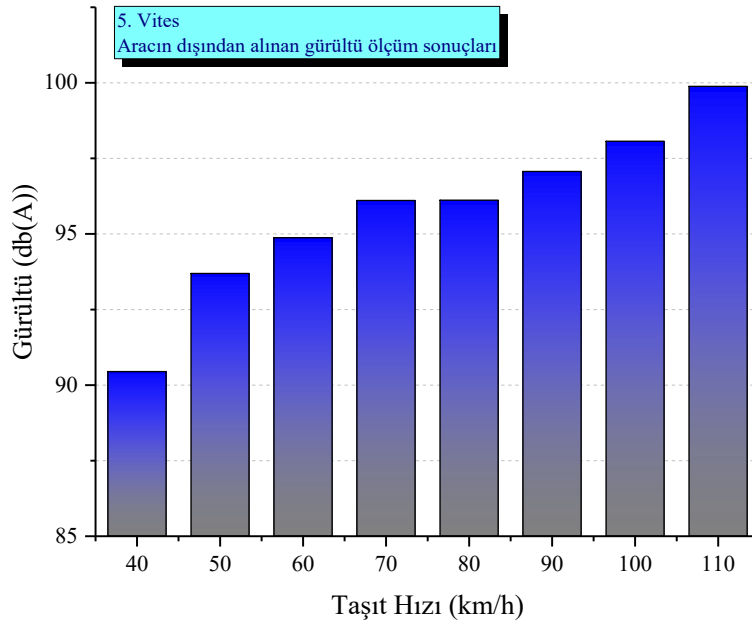
Literatürde yapılan çalışmalarda da titreşimde benzer eğilim görülmektedir. Taghizadeh-Alisaraei vd. [13] tarafından yapılan çalışmada motor devrinin titreşime her üç ekseninde önemli etkisinin olduğu belirtilmiştir. Ayrıca titreşimdeki en yüksek artışın motor performans eğrisindeki en yüksek torka veya (güç)tork değerine karşılık gelen motor devrinde meydana geldiği ifade edilmiştir.

Satsangi ve Tiwari çalışmalarında [21] motor titreşimleri ile silindir içi basınç değişimleri arasında çok güçlü bir korelasyon olduğunu vurgulamışlardır. Yanma odasında yakıtın yanmasıyla birlikte hızlı bir basınç artışının meydana geldiği ve bu basıncın yanma odasının iç duvarlarına ve pistonu etkileyerek motor titreşiminde ana etken olarak ortaya çıktığı vurgulanmıştır.

Ayrıca piston hareket hızının veya motor yükü artışının titreşimi arttırdığı literatürde yapılan çeşitli çalışmalarda da [6,8,11,22] vurgulanmıştır.

Titreşim gibi gürültü de arzu edilmeyen bir başka olumsuz bir etkidir. Motor kaynaklı gürültü söz konusu olduğunda bu gürültünün temelde üç kaynağı vardır. Bu kaynaklar; yanma odasındaki hızlı basınç artışıyla ortaya çıkan yanma gürültüsü, motorun dönen veya piston gibi ileri-geri hareket yapan bileşenlerinin neden olduğu mekanik gürültü ve emme-egzoz sisteminin akustik tasarımına bağlı olarak oluşan emme ile egzoz gürültüsü olacak şekilde ifade edilebilir [23-25].

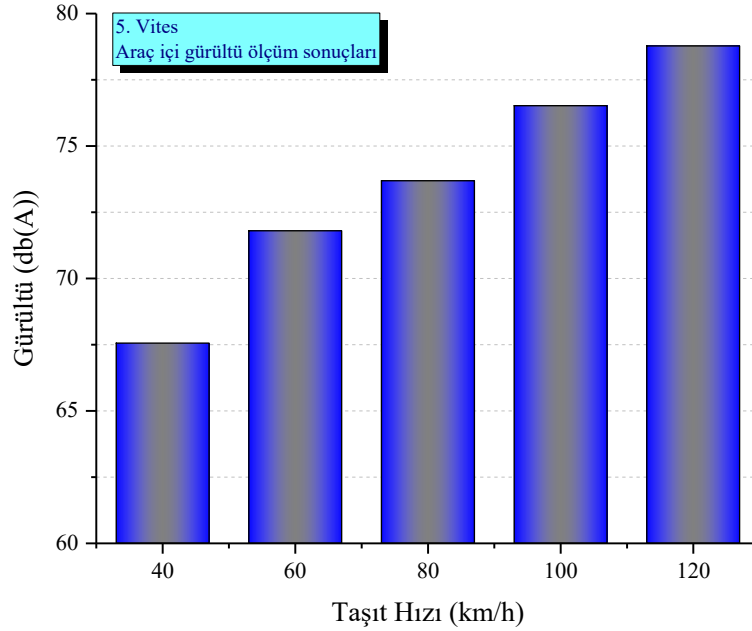
Şekil 4'te taşıt hızına bağlı olarak elde edilen gürültü ölçüm sonuçları görülmektedir. Gürültü verileri deneyin gerçekleştirildiği laboratuvar ortamında alınmıştır. Bu nedenle gürültü verileri motor kaynaklı gürültülerin yanı sıra taşıtın çekiş tekerlekleri, güç aktarma organları ve test düzeneğinde yer alan dinamometre ile birlikte dönen tamburların da neden olduğu gürültüyü kapsamaktadır. Kısaca bu gürültü, testin gerçekleştirildiği ortam gürültüsü olarak tanımlanabilir. Şekil 3'te de görüldüğü gibi artan taşıt hızına bağlı olarak daha yüksek motor devirlerine ve GKA'ya ulaşıldığından gürültü de buna bağlı olarak artış göstermiştir. 40 km/h taşıt hızında ölçülen gürültü miktarı ile karşılaştırıldığında 110 km/h hızda 9,4 dB(A)'lik bir artış görülmüştür. Bharath ve Selvan [26] motor devrine bağlı olarak gürültünün arttığını ve 2500 rpm motor devrinde 75 db(A) gibi yüksek bir gürültü seviyesinin görüldüğünü çalışmalarında belirtmişlerdir. Benzer değişim Keskin [27] tarafından yapılan çalışmada da elde edilmiştir. Sharma vd. [7] artan motor yükü ve devrinin toplam gürültüyü arttırdığını çalışmalarında ifade etmişlerdir. Çalışmalarında toplam gürültünün; silindir içi basınç, açığa çıkan ısı oranı ve basınç artış oranı ile ilişkilendirilebileceği belirtilmiştir. Daha yüksek silindir içi basınç, egzoz basıncının ve buna bağlı olarak egzoz gürültüsünün ve toplam gürültünün artmasına neden olmaktadır. Ayrıca çalışmada açığa çıkan ısı oranı ve basınç artış oranı artışının daha yüksek toplam gürültüye neden olduğu vurgulanmıştır.



Şekil 4. Taşıt hızına bağlı olarak gürültünün değişimi

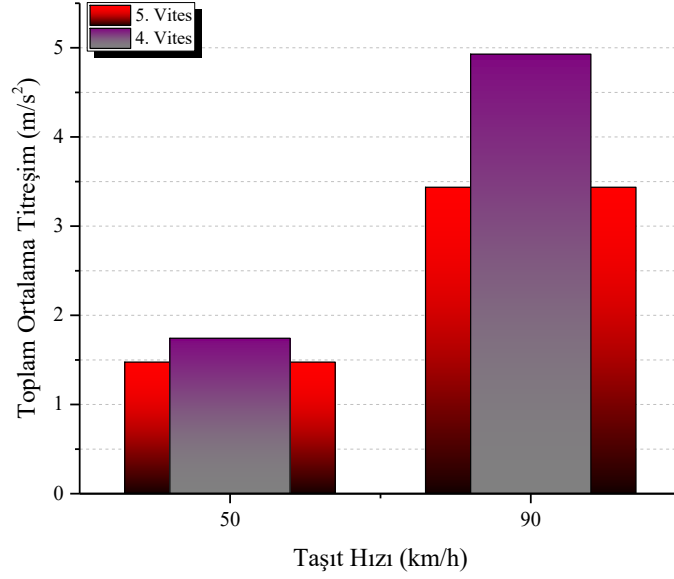
Şekil 5'te 40-120 km/h taşıt hız aralığında araç içi gürültü ölçüm sonuçları verilmiştir. Ölçüm esnasında taşıtın camları tamamen kapalı tutulmuştur. Testin gerçekleştirildiği en yüksek taşıt hızında ölçülen gürültü 80 dB(A)'nin altında gerçekleşmiştir. Gürültüye neden olan kaynaklar dikkate alındığında örneğin çekiş

tekerleklerinin yapısı ve durumu (desen, lastik hamuru, eski veya yeni olması vb.) ölçülen gürültünün değişmesine neden olabilmektedir. Ayrıca testin dış ortamda yapılması durumunda ortam şartlarına (zeminin yapısı, hava hızı, rüzgâr hızı vb.) bağlı olarak da farklı sonuçlar ortaya çıkabilir.

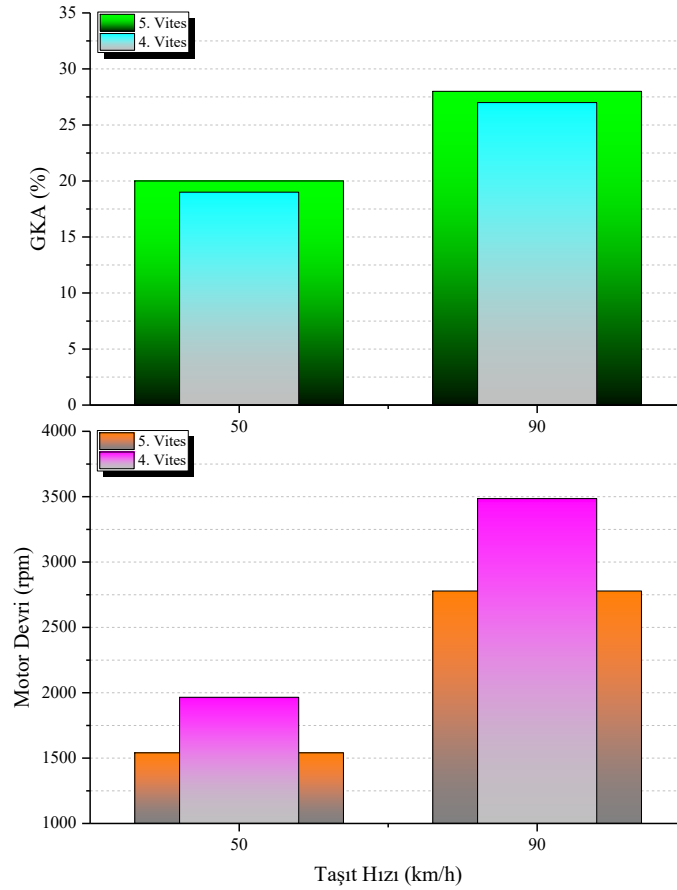


Şekil 5. Taşıt hızına bağlı olarak araç içi gürültünün değişimi

Şekil 6'da aynı taşıt hızlarına (50 ve 90 km/h) karşılık 4. ve 5. vites kademeleri için toplam ortalama titreşimlerin karşılaştırması yer almaktadır. Şekilde de görüldüğü gibi aynı taşıt hızında ve 5. vites kullanımında toplam ortalama titreşim 4. vitese göre daha düşük elde edilmiştir. Titreşim, 50 km/h taşıt hızında %15,3, 90 km/h hızında ise %30,3 azalmıştır. Şekil 7'de 50 ve 90 km/h taşıt hızlarındaki motor devri ve GKA'nın 4. ve 5. vitesteki değerlerinin bir karşılaştırılması görülmektedir. 4. vitesteki redüksiyon oranının 5. vitestekinden farklı olması nedeniyle aynı taşıt hızı farklı motor devirlerinde elde edilebilmektedir. 4. vites kademesinde 50 km/h taşıt hızına ulaşıldığında motor devri 5. vitese kıyasla %27,6 artış göstermiştir. 90 km/h taşıt hızında ise; bu artış %25,4 olarak gerçekleşmiştir. Bu durumun tam tersi motor yükü için söz konusudur. Belirli bir hıza farklı bir vites kademesinde ulaşıldığında temelde taşıtın karşılaştığı dirençler değişmediği takdirde çekiş tekerleğine aktarılması gereken tahrik kuvvetinin değişmesi beklenmez. Bu nedenle üst vites kademesinde redüksiyon oranının daha düşük olması nedeniyle motor yükünün artması gerektiği kolayca öngörülebilir. Testte de 5. vites kademesinde 50 km/h taşıt hızına ulaşmak için 4. vitese kıyasla gaz kelebek açıklığını %5,3, 90 km/h hızda ise %3,7 arttırmak gerekmiştir. Sonuç olarak aynı hıza karşılık üst vites kademesinde motor devri azalırken, GKA artış göstermiştir. Bu sonuca göre farklı vites kademesinde motor devrindeki değişiminin motor yüküne göre titreşime etkisinin daha fazla olduğu ifade edilebilir. Yani, aynı taşıt hızının elde edildiği 4. vites kademesinde birim zamanda daha fazla çevrimin gerçekleşmesinin mevcut deney şartlarında titreşim üzerinde daha belirgin bir etkiye sahip olduğu söylenebilir.



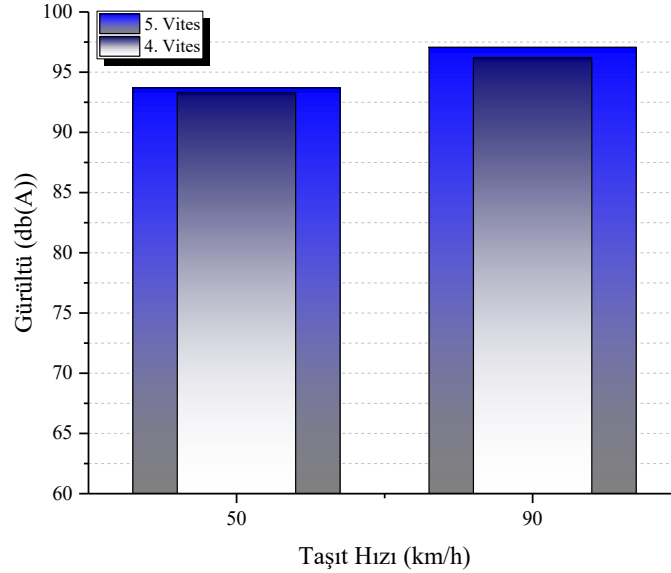
Şekil 6. Farklı vites kademelerindeki toplam ortalama titreşimlerin karşılaştırması



Şekil 7. Farklı vites kademelerindeki motor devri ve GKA'nın karşılaştırması

Şekil 8'de 50 ve 90 km/h taşıt hızlarında toplam gürültünün 4. ve 5. vitesler için karşılaştırılması görülmektedir. Grafikte yer alan gürültü miktarı; motor, güç aktarma organları ve çekiş tekerleklerinden kaynaklanan toplam gürültüyü kapsamaktadır. Grafik incelendiğinde her iki hızda da farklı vites kademesinde ölçülen gürültüler arasında önemli bir fark oluşmadığı görülmektedir. Elde edilen farklar 1

dB(A)'dan daha azdır. Titreşim ölçümünde ivmeölçer motor üzerine bağlandığından ölçülen titreşim miktarı, vites kademesindeki değişimle ortaya çıkan farklı motor devri veya motor yükünden doğrudan etkilenmiştir. Ancak gürültü ölçümünde, her ne kadar vites kademesindeki değişim motor devri ve GKA'yı etkilese de aynı taşıt hızında vites kutusu çıkışından itibaren aktarma organlarının devirlerinin ve tekerlek hızlarının değişmemesinin gürültü seviyesi üzerinde daha etkin olduğu sonucuna varılabilir.



Şekil 8. Farklı vites kademelerindeki gürültünün karşılaştırması

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bir taşıtın sürüş konforunu olumsuz etkileyen titreşim ve gürültünün incelendiği bu çalışmada temel parametre olarak motor devri ve yükü esas alınmıştır. Deneyler, taşıtın düz yol koşullarında karşılaştığı dirençler dikkate alınarak oluşturulmuş ve iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir:

İlk aşamada testler, 40-110 km/h taşıt hız aralığında 5. vites kademesinde yapılmıştır. Toplam ortalama titreşim ve gürültü değerleri taşıt hızına bağlı olarak artış göstermiştir. Toplam ortalama titreşim, 40 km/h taşıt hızındaki veriyle kıyaslandığında 110 km/h hızında yaklaşık 3 kat artış göstermiştir. Gürültü ise 9,4 dB(A) artmıştır. Temel motor işletme parametrelerindeki değişim dikkate alındığında 40 km/h taşıt hızında motor devri 1294 rpm ve GKA %19 iken, 110 km/h taşıt hızına ulaşıldığında devir 3405 rpm ve GKA %32 olmuştur. Bu sürüş şartlarında hem motor devri hem de GKA artış göstermiştir. Bu nedenle titreşim ve gürültüye bu iki parametrenin birlikte etkisi söz konusu olmaktadır.

İkinci aşamada ise 50 ve 90 km/h taşıt hızlarında 4. vites kademesinde deneyler tekrarlanmış ve 5. viteste aynı hızlara karşılık gelen verilerle karşılaştırılmıştır. 4. vitesteki sonuçlarla kıyaslandığında 5. vites kullanımında ölçülen toplam ortalama titreşimin 50 km/h taşıt hızında %15,3, 90 km/h hızında ise %30,3 daha az olduğu görülmüştür. Gürültü sonuçlarında ise iki farklı kullanım arasında dikkate değer bir fark olmadığı görülmüştür. Ayrıca bu farklı vites kademelerindeki sürüş koşullarında motor devrindeki değişim GKA'daki değişime göre çok daha fazla elde edilmiştir.




KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Santhosh, S., Velmurugan, V., Paramasivam, V., Thanikaikarasan, S. (2020). Experimental investigation and comparative analysis of rubber engine mount vibration and noise characteristics. *Materials Today: Proceedings*, 21, 638-642. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.730>

- [2] Ramachandran, T., Surendarnath, S., Dharmalingam, R. (2021). Structural and suitability analysis of aluminium metal matrix composites for IC engine mountings. *Materials Today: Proceedings*, 37, 1524-1528. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.145>
- [3] Lion, A., Johlitz, M. (2020). A mechanical model to describe the vibroacoustic behaviour of elastomeric engine mounts for electric vehicles. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 144, 106874. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2020.106874>
- [4] Carlucci, A.P., Chiara, F.F., Laforgia, D. (2006). Analysis of the relation between injection parameter variation and block vibration of an internal combustion diesel engine. *Journal of Sound and Vibration*, 295(1-2), 141-164. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.12.054>
- [5] Wu, L., Bi, Y., Shen, L., Lei, J., Zhang, L., Zhou, F. (2019). Study on the effect of piston skirt profile on the vibration behavior of non-road high pressure common rail diesel engine. *Applied Acoustics*, 148, 457-466. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.01.007>
- [6] Ashok, B., Jeevanantham, A.K., Vignesh, R., Hire, K.R.B., Prabhu, K., Kumar, R.A.R., Shivshankar, N., Sudhagar, P.E. (2021). Calibration of engine parameters and fuel blend for vibration and noise characteristics in CRDI engine fuelled with low viscous biofuel. *Fuel*, 288, 119659. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119659>
- [7] Sharma, N., Patel, C., Tiwari, N., Agarwal, A.K. (2019). Experimental investigations of noise and vibration characteristics of gasoline-methanol blend fuelled gasoline direct injection engine and their relationship with combustion characteristics. *Applied Thermal Engineering*, 158, 113754. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113754>
- [8] Gültekin, N., Mayda, M., Kilit, M. (2017). Benzin ve dizel motorlarda devir sayısının titreşime olan etkisinin incelenmesi. *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 6(2), 39-43. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.333042>
- [9] Sarıdemir, S., Alçelik, N., Uygur, İ. (2016). Biyodizel-dizel yakıt karışımlarının motor titreşimine olan etkisinin incelenmesi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 13(4), 103-110.
- [10] Flekiewicz, M., Fabi, P., Flekiewicz, B. (2007). Engine block vibration level as a tool for fuel recognition. *SAE Technical Paper*, 2007-01-2162. <https://doi.org/10.4271/2007-01-2162>
- [11] Sarıdemir, S., Polat, F., Kılınçel, M. (2016). Motor devir ve yükünün titreşim ve gürültü emisyonuna olan etkisinin incelenmesi. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 3(3), 459-466. <https://doi.org/10.31202/ecjse.258573>
- [12] Öztürk, E., Karabulut, H. (2012). Tek silindirdirli bir dizel motorunun dinamik ve titreşim analizleri. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27(3), 491-500.
- [13] Taghizadeh-Alisaraei, A., Ghobadian, B., Tavakoli-Hashjin, T., Mohtasebi, S.S. (2012). Vibration analysis of a diesel engine using biodiesel and petrodiesel fuel blends. *Fuel*, 102, 414-422. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.06.109>
- [14] Alçelik, N., Kam., M. (2020). Dönen makinelerde eksenel kaçıklık ve dengesizliğin titreşim analizi. *BŞEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 7, 256-269. <https://doi.org/10.35193/bseufbd.669289>
- [15] Sarıdemir, S. (2013). The effect of dwell angle on vibration characteristics of camshaft bearing housings. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 27(12), 3571-3577. <https://doi.org/10.1007/s12206-013-0940-y>
- [16] Nithin, S.K., Hemanth, K., Shamanth, V. (2021). A review on combustion and vibration monitoring of IC engine. *Materials Today: Proceedings*, 45, 65-70. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.093>
- [17] Mobley, R.K. (1999). *Vibration fundamentals*. Woburn, MA: Butterworth-Heinemann.

- [18] Uludamar, E., Tosun, E., Aydın, K. (2016). Experimental and regression analysis of noise and vibration of a compression ignition engine fuelled with various biodiesels. *Fuel*, 177, 326–333. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.03.028>
- [19] Çalık, A. (2018). Determination of vibration characteristics of a compression ignition engine operated by hydrogen enriched diesel and biodiesel fuels. *Fuel*, 230, 355-358. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.05.053>
- [20] Çelebi, K., Uludamar, E., Özcanlı, M. (2017). Evaluation of fuel consumption and vibration characteristic of a compression ignition engine fuelled with high viscosity biodiesel and hydrogen addition. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(36), 23379-23388. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.02.066>
- [21] Satsangi, D.P., Tiwari, N. (2018). Experimental investigation on combustion, noise, vibrations, performance and emissions characteristics of diesel/n-butanol blends driven genset engine. *Fuel*, 221, 44-60. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.02.060>
- [22] Topgül, T., Sarıdemir, S., Zaman, Ç. (2020). Tek nokta enjeksiyonlu buji ile ateşlemeli bir motorda motor devri ve yükünün motor titreşimleri ve gürültüye etkisinin deneysel incelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8(3), 1948-1956. <https://doi.org/10.29130/dubited.698173>
- [23] Patel, C., Tiwari, N., Agarwal, A.K. (2019). Experimental investigations of soyabean and rapeseed SVO and biodiesels on engine noise, vibrations, and engine characteristics. *Fuel*, 238, 86-97. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.10.068>
- [24] Davies, P.O.A.L., Holland, K.R. (1999). I.C. engine intake and exhaust noise assessment. *Journal of Sound and Vibration*, 223(3), 425-444. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1998.2093>
- [25] Ih, J.G., Peat, K.S. (2002). On the causes of negative source impedance in the measurement of intake and exhaust noise sources. *Applied Acoustics*, 63(2), 153-171. [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(01\)00029-9](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(01)00029-9)
- [26] Bharath, B.K., Selvan, V.A.M. (2021). An experimental investigation on rheological and heat transfer performance of hybrid nanolubricant and its effect on the vibration and noise characteristics of an automotive spark-ignition engine. *International Journal of Thermophysics*, 42, 37. <https://doi.org/10.1007/s10765-020-02784-8>
- [27] Keskin, A. (2010). The influence of ethanol–gasoline blends on spark ignition engine vibration characteristics and noise emissions. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 32, 1851-1860. <https://doi.org/10.1080/15567030902804749>

Depthwise Separable Convolution Based Residual Network Architecture for Hyperspectral Image Classification

Hüseyin FIRAT^{1,*}  Mehmet Emin ASKER²  Davut HANBAY³ 

¹Dicle University, Vocational School of Technical Sciences, Department of Computer Technologies, 21280, Sur/DIYARBAKIR

²Dicle University, Vocational School of Technical Sciences, Department of Electricity and Energy, 21280, Sur/DIYARBAKIR

³Inonu University, Faculty of Engineering, Department of Computer Engineering, 44280, Merkez/MALATYA

Graphical/Tabular Abstract

In this study, a method in which 3D/2D CNN, Residual network architecture and Depthwise separable convolution (DSC) are used together, is proposed for classification of Hyperspectral remote sensing images (HRSIs). The architecture of the proposed method is presented in Figure A.

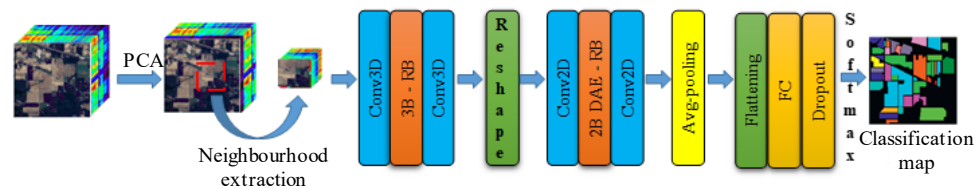


Figure A. Schema of the Proposed Method

Purpose: Classification of each pixel in HRSIs is great importance task. Many manual or self-learning classification methods have been proposed for HRSI classification (HRSIC). Manually extracting spatial-spectral features in HRSIC reduces the classification accuracy. For this, studies have been carried out on methods that automatically extract features. In this direction, the use of deep learning methods takes HRSIC to a new level. For this purpose, a deep learning-based method has been developed for HRSIC that works with high accuracy.

Theory and Methods: In this study, a method was developed for HRSIC in which 3D/2D CNN, residual network and DSC are used together. Thanks to the residual network, problems such as degradation and vanishing gradients that may occur in deep networks are overcome. On the other hand, DSC are used, which reduces the computational cost, prevents overfitting and provides more spatial feature extraction. Finally, spatial-spectral features are extracted simultaneously from HRSIs with 3D CNN. However, using only 3D CNN increases computational complexity. By using only 2D CNN, only spatial features are extracted from HRSIs. Spectral features cannot be extracted. By using 3D CNN and 2D CNN together, these two problems are solved. In addition, principal component analysis is used as a preprocessing step for optimum spectral band extraction in the proposed method.

Results: Indian pines and Salinas datasets were used to test the performance of the proposed method. As a result of the performed applications, 99.45% general accuracy results were obtained with Indian pines and 99.95% with Salinas. The obtained classification results show that the classification performance of the proposed method is better than the existing methods.

Conclusion: In this study, DSC-based residual network architecture is proposed for classification of HRSIs. With the use of residual network, vanishing gradients and overfitting problems in deep networks are prevented. In addition, with the skip connections used in residual blocks, more effective extraction of spatial-spectral feature information is provided. The purpose of using DSC is to speed up the training process by reducing the number of trainable parameters. The application results confirm that the proposed method provides better classification performance compared to existing methods.

Article Info:

Research article
Received: 10.01.2022
Revision: 11.04.2022
Accepted: 18.04.2022

Highlights

- Remote Sensing
- Classification
- Spectral-spatial feature extraction

Keywords

Hyperspectral image classification
Deep learning
Residual network
Depthwise separable convolution
Principal component analysis



Depthwise Separable Convolution Based Residual Network Architecture for Hyperspectral Image Classification

Hüseyin FIRAT^{1,*} Mehmet Emin ASKER² Davut HANBAY³

¹Dicle Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, 21280, Sur/DİYARBAKIR

²Dicle Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Elektrik ve Enerji Bölümü, 21280, Sur/DİYARBAKIR

³İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 44280, Merkez/MALATYA

Abstract

Hyperspectral remote sensing images (HRSI) are 3D image cubes containing hundreds of spectral bands and having two spatial-one spectral dimensions. Classification is one of the most popular topics at HRSI. In recent years, many deep learning methods have been proposed for HRSI classification. Especially Convolutional Neural Networks (CNN) are commonly used in the classification of HRSIs. CNN has a strong feature learning capability, which can provide more distinctive features for higher quality HRSI classification. In this study, a method in which 3D/2D CNN, Residual network architecture (ResNet) and Depthwise separable convolution (DSC) are used together is proposed. In deeper CNNs, ResNet is used to achieve higher classification performance as the number of layers increases. In addition, thanks to ResNet, problems such as degradation and vanishing gradients that may occur in deep networks are overcome. On the other hand, DSCs have been used, which reduces the computational cost, prevents overfitting and provides more spatial feature extraction. Finally, spatial-spectral features are extracted simultaneously from HRSIs with 3D CNN. However, using only 3D CNN increases computational complexity. By using only 2D CNN, only spatial features are extracted from HRSIs. Spectral features cannot be extracted. By using 3D CNN and 2D CNN together, these two problems are solved. In addition, principal component analysis is used as a preprocessing step for optimum spectral band extraction in the proposed method. Applications were carried out using two popular HUAG benchmarking datasets, Indian pines and Salinas datasets. As a result of the applications, an overall accuracy of 99.45% with Indian pines and 99.95% with Salinas was obtained. The obtained classification results show that the classification performance of the proposed method is better than the existing methods.

Hiperspektral Görüntü Sınıflandırması için Derinlemesine Ayrılabilir Evrişim Tabanlı Artık Ağ Mimarisi

Öz

Hiperspektral uzaktan algılama görüntüleri (HUAG), yüzlerce spektral bant içeren ve iki uzamsal-bir spektral boyuta sahip 3B görüntü küpleridir. Sınıflandırma, HUAG'de en popüler konulardan biridir. Son yıllarda HUAG sınıflandırması için çok sayıda derin öğrenme yöntemi önerilmiştir. Özellikle Evrişimli Sinir Ağları (ESA), HUAG'lerin sınıflandırılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. ESA, daha yüksek kaliteli HUAG sınıflandırması için daha ayırt edici özellikler sağlayabilen güçlü bir özellik öğrenme yeteneğine sahiptir. Bu çalışma kapsamında 3B/2B ESA, Artık ağ mimarisi ve Derinlemesine ayrılabilir evrişimin birlikte kullanıldığı bir yöntem önerilmiştir. Daha derin ESA'larda, katman sayısı arttıkça daha yüksek sınıflandırma performansı elde etmek için artık ağ kullanılmaktadır. Ayrıca artık ağ sayesinde derin ağlarda oluşabilecek bozulma ve gradyanların yok olması gibi sorunların üstesinden gelinmektedir. Öte yandan, hesaplama maliyetini azaltan, aşırı öğrenmeyi önleyen ve daha fazla uzamsal özellik çıkarımı sağlayan Derinlemesine ayrılabilir evrişimler kullanılmıştır. Son olarak, 3B ESA ile HUAG'lerden uzamsal-spektral özellikler eş zamanlı olarak çıkarılmaktadır. Ancak sadece 3B ESA kullanımı hesaplama karmaşıklığını arttırmaktadır. Yalnızca 2B ESA kullanımı ile de HUAG'lerden sadece uzamsal özellikler çıkarılmaktadır. Spektral özellikler çıkarılmamaktadır. 3B ESA ile 2B ESA'nın birlikte kullanılmasıyla bu iki problem çözülmüştür. Ayrıca önerilen yöntemde optimum spektral bant çıkarımı için temel bileşen analizi bir ön işleme adımı olarak

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 10.01.2022
Düzeltilme: 11.04.2022
Kabul: 18.04.2022

Keywords

Hyperspectral image classification
Deep learning
Residual network
Depthwise separable convolution
Principal component analysis

Anahtar Kelimeler

Hiperspektral görüntü sınıflandırma
Derin öğrenme
Artık ağ
Derinlemesine ayrılabilir evrişim
Temel bileşen analizi

kullanılmıştır. Popüler iki HUAG kıyaslama veriseti olan Indian pines ve Salinas verisetleri kullanılarak uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Uygulamalar sonucunda Indian pines ile %99.45 ve Salinas ile %99.95 genel doğruluk sonucu elde edilmiştir. Elde edilen sınıflandırma sonuçları, önerilen yöntemin sınıflandırma performansının mevcut yöntemlerden daha iyi olduğunu göstermektedir.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Hiperspektral uzaktan algılama, son yıllarda uzaktan algılama teknolojisinin gelişmesiyle birlikte birçok araştırmacının ilgi odağı haline gelmiştir [1]. Hiperspektral uzaktan algılama sensörleri sayesinde elektromanyetik spektrumda yüzlerce sürekli ve dar bant genişliğine sahip dijital görüntü yakalanmakta ve uzamsal-spektral bilgileri içeren 3 boyutlu (3B) hiperspektral uzaktan algılama görüntüleri (HUAG) üretilmektedir. HUAG'ler yüzlerce spektral bant içermekte ve güçlü spektral bilgiye sahiptir. Ayrıca yüksek spektral çözünürlüğe sahiptirler. HUAG'lerdeki yüksek spektral çözünürlük sayesinde tanımlanması zor olan nesnelere tanınabilir hale gelmektedir. Yüzlerce spektral bantta içerdikleri zengin bilgilerle HUAG'ler, bitki örtüsü analizi, hassas tarım, jeolojik haritalama, çevresel izleme, biyolojik ve kimyasal algılama, nesne tespiti, kaynak arama ve madencilik gibi birçok gerçek dünya uygulamasında yaygın olarak kullanılmaktadır [2][3]. HUAG'lerde her pikselin sınıflandırılması bu uygulamalarda büyük önem taşımaktadır. Ancak HUAG'lerin çok sayıda spektral bant içermesi ve yüksek boyutlara sahip olması sınıflandırma işlemlerinde karşılaşılan en önemli sorunlardan biridir. Boyut indirgeme yöntemleri kullanılarak HUAG'lerin boyutları küçültülebilmektedir. Boyut indirgeme yöntemleri, önerilen yöntemin sınıflandırma performansını düşüren gereksiz spektral öznelik bilgilerinin ortadan kaldırılmasını sağladığı için hiperspektral görüntü analizinde oldukça önemli bir süreçtir. Boyut indirgeme, HUAG sınıflandırmasında iki farklı şekilde gerçekleştirilebilmektedir. (1) Spektral bant seçimi, (2) Spektral bant çıkarımı. Spektral bant seçiminde, orijinal HUAG spektral bandından seçilen en kullanışlı spektral bantlar üzerinde analiz yapılmaktadır. Spektral bant çıkarımında, yüksek spektral boyuta sahip HUAG verilerinin spektral boyutu azaltılmaktadır. Ancak, azalan spektral boyutla HUAG verilerinin uzamsal boyutu (genişlik ve yükseklik) değişmemektedir. Boyut indirgeme için en iyi ve sık kullanılan spektral bant çıkarma yöntemlerinden biri Temel Bileşen Analizidir (TBA) [4]. TBA ile HUAG'lerde faydalı spektral bantların çıkarılması amaçlanmaktadır. Bu işlem sonucunda veri boyutu küçülmekte ve işlem maliyeti azalmaktadır.

Son yıllarda, HUAG sınıflandırma için manuel veya kendi kendine öğrenen birçok sınıflandırma yöntemi önerilmektedir. Geleneksel HUAG sınıflandırma yöntemleri genellikle spektral bilgilere dayanmaktadır. Bu yöntemler arasında lojistik regresyon [5], destek vektör makinesi [6] ve rastgele orman [7] tabanlı tipik sınıflandırıcılar yer almaktadır. Bu sınıflandırıcılar arasında destek vektör makineleri, basit ama güçlü bir son sınıflandırıcı olarak kabul edilmektedir. Ancak, HUAG'ler hem spektral bant fazlalığına hem de spektral bantlar arasında yüksek korelasyona sahip olduğundan, bu tipik sınıflandırıcılar iyi performans gösterememektedirler. Çünkü çok sayıda spektral bant için yeterli sayıda eğitim örneği olmayabilir. Bu durum, spektral bantların yüksek boyutluluğu ile sınırlı sayıda eğitim örneği arasında bir dengesizliğe neden olmaktadır [8]. Ayrıca, yalnızca spektral bant bilgilerini kullanan bu sınıflandırma yöntemleri, yüksek çözünürlüklü veriler için algılanan önemli uzamsal değişkenliği elde edememektedir. Bu durum genellikle HUAG sınıflandırmasında daha düşük sınıflandırma performansı ile sonuçlanmaktadır. Sınıflandırma performansını iyileştirmenin en temel yolu, uzamsal-spektral özellikleri birlikte kullanan bir sınıflandırıcı tasarlamaktır. Çoğu geleneksel bant çıkarma yöntemi, uzamsal-spektral özellikler göz önüne alındığında sınıflandırma doğruluğunu arttırmaktadır. Bununla birlikte, yukarıda belirtilen HUAG sınıflandırma yöntemlerinin çoğu, uzamsal-spektral özellikleri manuel olarak çıkarmakta ve uzman yardımı gerektirmektedir [9].

HUAG sınıflandırmada uzamsal-spektral özellikleri manuel olarak çıkarmak sınıflandırma doğruluğunu düşürmektedir. Bunun için özellikleri otomatik olarak çıkaran yöntemler üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bu doğrultuda derin öğrenme yöntemlerinin kullanımı, HUAG sınıflandırmasını yeni bir düzeye taşımaktadır. Derin öğrenme tekniklerinin eğitim aşaması, özellikleri otomatik olarak çıkarmakta ve bu

özellikleri sınıflandırma aşamasında kullanılmaktadır [10]. Tipik bir derin öğrenme yöntemi olan yığılmış oto-kodlayıcı, uzamsal-spektral özellik bilgilerini çıkarabilmekte ve daha sonra bu bilgileri HUAG sınıflandırması için birleştirebilmektedir [11]. Chen vd. [12], derin öğrenme kavramını ilk başta HUAG sınıflandırması alanına uygulamıştır. Uzamsal-spektral özellik çıkarımı ve sınıflandırması için TBA, yığılmış oto-kodlayıcı ve lojistik regresyonun birlikte kullanıldığı bir yöntem geliştirmişlerdir. Kennedy uzay merkezi ve Pavia üniversitesi verisetleri üzerinde gerçekleştirilen uygulamalar sonucunda, sırasıyla %96.73 ve %95.14 genel doğruluk sonucu elde edilmiştir. Tao vd. [13], derin spektral özellikleri çıkarmak için yığılmış oto-kodlayıcı ve lojistik regresyonun birlikte kullanıldığı bir yöntem önermişlerdir. Derin inanç ağı tabanlı sınıflandırma, HUAG analizi için kullanılan diğer derin öğrenme yöntemlerinden biridir. Bu yöntem, HUAG'nin uzamsal özellik bilgisinin spektral özellik bilgisi ile birleştirilmesi için önerilmiştir. Pavia üniversitesi ve Indian pines verisetleri ile %10 eğitim örneği kullanılarak gerçekleştirilen uygulamalar sonucunda, sırasıyla %98.64 ve %89.35 genel doğruluk sonucu elde edilmiştir. Jia vd. [14], derin inanç ağına dayalı HUAG analizi için hiyerarşik öğrenmeye dayalı özellik çıkarımı olan TBA ve lojistik regresyonun birlikte kullanıldığı bir yöntem önermişlerdir. Önerilen yöntemin sınıflandırma performansını test etmek için Indian pines ve Pavia üniversitesi verisetleri kullanılmıştır. Elde edilen genel doğruluk sonuçları Indian pines için %95.95 ve Pavia üniversitesi için %99.05 olarak bulunmuştur. Li vd. [15], optimal derin inanç ağı ve doku özelliği geliştirmeyi kullanan yeni bir HUAG sınıflandırma yöntemi önermişlerdir. Indian Pines, Pavia üniversitesi ve Salinas verisetleri üzerinde gerçekleştirilen uygulamalar sonucunda, sırasıyla %97.56, %96.96 ve %96.22 genel doğruluk elde edilmiştir. Derin özellikler, yığılmış oto-kodlayıcı ve derin inanç ağı kullanılarak katman tabanlı bir eğitim sürecinde hiyerarşik olarak çıkarılabilirken, bu yöntemlere girdi olarak verilen görüntü parçalarından oluşan eğitim örneklerinin tek boyuta düzleştirilmesi gerekmektedir. Bu durumda, HUAG'deki uzamsal özellikler tam olarak kullanılamamaktadır. Ayrıca, yığılmış oto-kodlayıcı ve derin inanç ağı denetimsiz öğrenme algoritmalarıdır ve özellikleri öğrenirken doğrudan sınıf bilgilerini kullanmamaktadırlar. Bu durum sınıflandırma doğruluğunu düşürmektedir. Bu derin öğrenme mimarilerinin aksine HUAG sınıflandırmada literatürde sıklıkla kullanılan derin öğrenme yöntemi Evrişimsel sinir ağları (ESA)'dır. ESA, daha yüksek kaliteli HUAG sınıflandırması için daha ayırt edici özellikler sağlayabilen güçlü bir özellik öğrenme yeteneğine sahiptir. Öğrenilen özellikler ne kadar ayırt edici olursa, sınıflandırma problemlerini çözmek o kadar kolay olmaktadır [16][17]. Bu durum sınıflandırma doğruluğunu büyük ölçüde arttırmaktadır. Bu nedenle, HUAG sınıflandırmasında kullanılan ESA tabanlı yöntemler, daha derin uzamsal, spektral veya uzamsal-spektral özellik bilgilerini çıkarmak için kullanılan en etkili yöntemlerden biridir. ESA tabanlı yöntemler, HUAG sınıflandırma performansını etkili bir şekilde iyileştirdikleri için giderek daha fazla uygulanmaktadır. Mohan vd. [9], HUAG sınıflandırması için 3B ESA ve 2B ESA tabanlı çok ölçekli bir uzamsal-spektral özellikten oluşan hibrit bir ESA modeli önermişlerdir. Spektral bant fazlalığını azaltmak ve optimum bant çıkarımı sağlamak için doğrusal olmayan çekirdek temel bileşen analizi ve doğrusal gauss rastgele projeksiyondan oluşan hibrit boyut indirgeme yöntemini kullanmışlardır. Önerilen yöntemin sınıflandırma performansını test etmek için Indian pines, Pavia üniversitesi, Salinas ve Houston verisetleri üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Ayrıca 15x15 pencere boyutu, 15 temel bileşen ve %20 eğitim, %10 doğrulama ve %70 test örneği alınmıştır. Elde edilen genel doğruluk sonuçları sırasıyla Indian pines için %99.80, Pavia üniversitesi için %99.99, Salinas veriseti için %100 ve Houston veriseti için %99.12 olarak bulunmuştur. Mu vd. [18], HUAG sınıflandırması için çok ölçekli ve çok seviyeli bir uzamsal spektral özellik füzyon ağı önermişlerdir. Önerilen yöntemde, 3B'den 2B'ye alternatif artık blok, 3B ESA'dan çıkarılan spektral özellik bilgisini 2B ESA'dan çıkarılan uzamsal özellik bilgisi ile birleştirmektedir. Herhangi bir ön işlem gerçekleştirilmeden 7x7, 11x11, 15x15 pencere boyutları, önerilen yöntemin performansını test etmek için Indian pines, Pavia üniversitesi, Salinas, Kennedy uzay merkezi verisetleri kullanılmıştır. Indian pines için %10, Pavia üniversitesi için %5, Salinas için %5 ve Kennedy uzay merkezi için %10 eğitim örneği alınarak gerçekleştirilen uygulamalar sonucunda sırasıyla %99.12, %99.94, %99.84 ve %99.69 genel doğruluk sonuçları elde edilmiştir. Meng vd. [19], mevcut diğer derin öğrenme tabanlı HUAG sınıflandırma modellerinden daha geniş olan yeni bir ESA modeli önermişlerdir. Önerilen yöntem, katman sayısı arttıkça daha derindeki ağın sınıflandırma doğruluğunun kademeli olarak artmasına neden olduğu problemi çözmek için tasarlanmış yeni bir çok yollu artık ağ olarak adlandırılmaktadır. Çok yollu

artık ağ yönteminde, ağda birden çok artık blok kullanarak ağı derinleştirmek yerine paralel olarak çok yöllü artık bloklar kullanılmaktadır. Bu sayede ağı daha derin değil daha geniş yapmak amaçlanmaktadır. Girdi HUAG verisine boyut indirgeme yöntemi uygulanmadan 11x11 pencere boyutu ve Indian pines, Houston ve Kennedy uzay merkezi verisetleri üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Indian pines ve Houston verisetleri için %10 ve Kennedy uzay merkezi için %2 eğitim örneği alınarak uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Uygulamalar sonucunda, sırasıyla %99.16, %98.88, %96.00 genel doğruluk sonuçları elde edilmiştir. Song vd. [20], HUAG sınıflandırması için derin bir özellik füzyon ağı önermişlerdir. Önerilen yöntem, derin ağı eğitimi kolaylaştırabilen ve artan derinlikten yararlanabilen kimlik eşleme olarak birkaç evrimsel katmanı optimize etmek için artık öğrenmeyi kullanmaktadır. Bu şekilde, ağ daha derin özellikleri çıkarabilmektedir. Önerilen yöntemin sınıflandırma performansını test etmek için Indian pines, Pavia üniversitesi ve Salinas veriseti üzerinde uygulamalar yapılmıştır. HUAG verilerine ön işleme adımı olarak TBA uygulanmış ve 25x25 pencere boyutu üzerinde çalışılmıştır. Gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda Indian pines için %98.52, Pavia üniversitesi için %98.73 ve Salinas için %98.87 genel doğruluk sonucu bulunmuştur. Zhong vd. [21], HUAG sınıflandırması için spektral-uzamsal artık ağı önermişlerdir. Bu yöntem, herhangi bir boyut indirgeme yöntemi kullanmadan 3B hiperspektral küpü girdi verisi olarak almaktadır. Artık bloklar, gradyanların geri yayılmasını kolaylaştıran kimlik eşleme yoluyla her 3B evrişim katmanını birbirine bağlamaktadır. Herhangi bir ön işlem adımı uygulanmadan, Indian pines ve Kennedy uzay merkezi için %20, Pavia üniversitesi için %10 eğitim örneği alınarak 7x7 pencere boyutu kullanılarak uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Genel doğruluk sonuçları Indian pines için %97.81, Kennedy uzay merkezi için %99.01 ve Pavia üniversitesi için %99.54 olarak bulunmuştur. Roy vd. [22], HUAG sınıflandırması için hibrit bir spektral ESA yöntemi önermişlerdir. Bu yöntem, 3B ESA ve 2B ESA'nın birlikte kullanılmasından oluşmaktadır. 3B ESA ile bir spektral bant yığımindan ortak uzamsal-spektral özellikleri çıkarılırken, 2B ESA, 3B ESA'nın üzerine uzamsal özellikleri çıkarmaktadır. HUAG girdi verisine ön işleme adımı olarak TBA uygulanmıştır. 25x25 pencere boyutu ve %30 eğitim örneği alınarak Indian pines, Pavia üniversitesi ve Salinas verisetleri üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Elde edilen genel doğruluk sonuçları sırasıyla, %99.75, %99.98 ve %100'dür. Ahmad vd. [23], HUAG sınıflandırmasında daha iyi sınıflandırma performansları elde etmek için uzamsal-spektral özellik bilgilerini kullanan hızlı bir 3B ESA yöntemi önermişlerdir. Önerilen yöntemde boyut indirgeme yöntemi olarak artımsal temel bileşen analizi kullanılmıştır. Boyut indirgeme sonucunda 20 temel bileşen üzerinde uygulamalar gerçekleştirilmiştir. 11x11 pencere boyutu, %70 eğitim örneği ile Indian pines, Pavia üniversitesi ve Salinas verisetleri üzerinde gerçekleştirilen uygulamalar sonucunda elde edilen genel doğruluk sonuçları sırasıyla, %97.75, %98.40 ve %98.06'dır. Ge vd. [24], HUAG sınıflandırması için farklı çekirdek boyutuna sahip 3B ESA ve 2B ESA ile çok dallı özellik füzyonuna dayalı derin bir ağ mimarisi önermişlerdir. Ayrıca ReLU yerine Mish aktivasyon fonksiyonunu kullanmışlardır. Ön işleme adımı olarak TBA kullanılmıştır. 25x25 pencere boyutu, %5 eğitim örneği alınarak, Indian pines, Pavia üniversitesi, Salinas ve Botswana verisetleri kullanılarak uygulamalar yapılmıştır. Uygulamalar sonucunda sırasıyla, %96.07, %99.52, %99.94 ve %96.44 genel doğruluk sonuçları elde edilmiştir. He vd. [25], HUAG sınıflandırması için 2B çok ölçekli uzamsal özelliği ve 1B spektral özelliği birlikte öğrenebilen çok ölçekli bir 3B derin ESA yöntemi önermişlerdir. Önerilen yöntemde, TBA gibi herhangi bir ön işlem olmadan Indian pines, Pavia üniversitesi ve Salinas verisetleri ile uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Her üç verisetinde de eğitim örnekleri için her sınıftan rastgele 200 örnek alınmıştır. 7x7 pencere boyutu alınarak, Indian pines için %97.61, Pavia üniversitesi için %98.49 ve Salinas için %97.24 genel doğruluk sonucu bulunmuştur.

HUAG sınıflandırması için sadece 2B ESA'nın kullanılması ile sadece uzamsal özellikler çıkarılmaktadır. Spektral boyuttan iyi ayırt edici özellik haritaları çıkarılamamaktadır. Bu durum spektral özellik bilgilerinin kaybolmasıyla sonuçlanmaktadır. Spektral-uzamsal özellikleri eş zamanlı çıkarmak için yalnızca 3B ESA kullanımı sınıflandırma doğruluğunu arttırmaktadır. Ancak, birçok spektral bantta benzer dokulara sahip sınıflarla uğraşırken karmaşıklık artacak ve performansı olumsuz yönde etkileyecektir. Bu durumların oluşmasının nedeni ise, HUAG'nin hem uzamsal hemde spektral boyutlara sahip 3B veri görüntüsü olmasındandır. Yukarıda açıklanan problemleri çözmek için önerilen yöntem, spektral ve uzamsal özellik haritalarını tamamen çıkarabilen ve tek başına kullanılan 2B ESA ve 3B ESA'nın eksikliklerini giderebilen

3B ESA ile 2B ESA'nın birleşiminden oluşmaktadır. Ayrıca derin ağların eğitilmesi zordur. Aşırı öğrenme ve gradyan kaybolması gibi problemler ile karşı karşıya kalınmaktadır. Derin ağlarda bu tür problemlerin üstesinden gelmek için önerilen yöntemler artık blokları eklenmiştir. Ağ derinleştikçe, önerilen yöntemdeki eğitilebilir parametre sayısı ve işlem maliyeti artmaktadır. Geleneksel 2B ESA mimarisinde kullanılan bazı 2B evrişim katmanları 2B derinlemesine ayrılabilir evrişim katmanları ile değiştirilmiştir. Derinlemesine ayrılabilir evrişim katmanlarının kullanılması eğitilebilir parametre sayısını ve işlem maliyetini düşürmekte ve aşırı öğrenme probleminde önleyebilmektedir. Bu çalışmanın başlıca katkıları şu şekildedir:

- (1) HUAG'nin özellik öğrenme yeteneğini geliştirmek için derinlemesine ayrılabilir evrişim ve artık ağ mimarisi beraber kullanılmıştır. Artık ağ mimarisinin kullanımı ile derin ağlarda gradyan kaybolması ve aşırı öğrenme problemlerinin önüne geçilmiştir. Ayrıca artık bloklarda kullanılan atlama bağlantıları ile uzamsal-spektral özellik bilgilerinin daha etkili bir şekilde çıkarılması sağlanmıştır.
- (2) Önerilen ağda, uzamsal-spektral özellikleri eş zamanlı çıkarmak için 3B ESA kullanılmıştır. 3B ESA'nın ardından daha fazla uzamsal özellik çıkarabilmek için 2B ESA ile birleştirilmiştir. Daha derin ağlarda derin özellikler çıkarabilmek için 3B ESA ve 2B ESA'ya artık blokları yerleştirilmiştir. 2B ESA bölümünde, derinlemesine ayrılabilir evrişim kullanılarak, eğitilebilir parametre sayısı azaltılmış ve aşırı öğrenme önlenmiştir.
- (3) Indian pines (IP) ve Salinas (SA) HUAG verisetleri üzerinde önemli uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Uygulama sonuçları, önerilen yöntemin mevcut yöntemlerle karşılaştırıldığında daha iyi sınıflandırma performansı sağladığını doğrulamaktadır.

Çalışmanın geri kalanı şu şekilde düzenlenmiştir. Bölüm 2'de önerilen yöntem ve teorik arkaplanı açıklanmıştır. Bölüm 3'te çalışma kapsamında kullanılan verisetleri ve uygulama sonuçları yer almaktadır. Son olarak Bölüm 4'te ise sonuçlar verilmiştir.

2. MATERYAL VE METOTLAR (MATERIAL AND METHODS)

2.1. Derinlemesine Ayrılabilir Evrişim (Depthwise Separable Convolution)

Derinlemesine ayrılabilir evrişim (DAE), derinlemesine evrişim ve noktasal evrişim (1x1 evrişim olarak da bilinir) olarak ayrıştırılmaktadır. Bunlardan derinlemesine evrişim, giriş görüntüsünün her kanalında ayrı bir evrişim işlemi gerçekleştirmektedir. Evrişim işlemi, her boyutta uzamsal özellikleri çıkarmak için kullanılmaktadır. Noktasal evrişim ise, çıktı özellik haritasında 1x1 standart evrişim işlemidir. Bu evrişim, özellik haritasını kanallar arasında birleştirmek için kullanılır. Derinlemesine ayrılabilir evrişim kullanımı, standart evrişime kıyasla eğitilebilir parametre sayısını azaltmaktadır. Bu da aşırı öğrenme problemini önleyebilmektedir. Ayrıca daha az hesaplama nedeniyle işlem maliyetini azaltmaktadır [26].

Şekil 1a'da gösterildiği gibi $D_f x D_f x M$ boyutunda bir giriş görüntüsü olduğunu varsayalım. Burada D_f , giriş görüntüsünün genişlik ve yüksekliğini, M ise kanal sayısını ifade etmektedir. Benzer şekilde $D_k x D_k x M$ evrişim çekirdek boyutunda N tane filtre/çekirdek olduğunu varsayalım. Standart bir evrişim işlemi gerçekleştirildiğinde, çıktı boyutu $D_p x D_p x N$ olacaktır. Standart evrişim işleminin işlem maliyeti Denklem 1'deki gibidir.

$$cost_{standart_conv} = N x D_p x D_p x D_k x D_k x M \quad (1)$$

Şekil 1b'de gösterildiği gibi derinlemesine ayrılabilir evrişim 2 işleme ayrılmaktadır. İlk olarak derinlemesine evrişim işleminde, tüm M kanalları için yapılan standart evrişim işleminin aksine, bir seferde tek bir kanala evrişim uygulanmaktadır. Burada $D_k x D_k x 1$ evrişim çekirdek boyutunda M tane filtre gereklidir. Çıktı boyutu, $D_p x D_p x M$ olacaktır. Derinlemesine evrişim işlemi için işlem maliyeti Denklem 2'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$cost_{derinlemesine_conv} = M x D_p x D_p x D_k x D_k \quad (2)$$

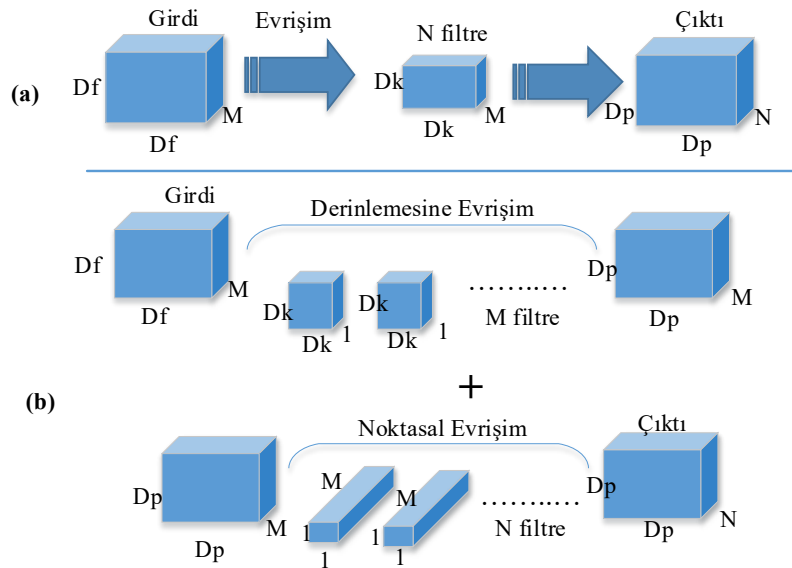
Noktasal evrişimde ise $D_p \times D_p \times M$ çıktısına 1×1 evrişim işlemi uygulanmaktadır. Bu işlemin çekirdek boyutu $1 \times 1 \times M$ olacaktır. N tane filtre kullanıldığı varsayıldığında, çıktı boyutu $D_p \times D_p \times N$ olacaktır. Noktasal evrişim işlemi sonucunda elde edilen maliyet Denklem 3'teki gibidir.

$$cost_{noktasal_conv} = M \times D_p \times D_p \times N \quad (3)$$

DAE işlem maliyeti, derinlemesine ve noktasal evrişim işlemleri sonucunda elde edilen maliyet toplamıdır. Standart evrişim işlemi ile derinlemesine ayrılabilir evrişim sonucunda elde edilen işlem maliyetlerini karşılaştırmak için gerekli olan hesaplama Denklem 4'teki gibidir.

$$\frac{cost_{derinlemesine_conv} + cost_{noktasal_conv}}{cost_{standart_conv}} = \frac{1}{N} + \frac{1}{D_k^2} \quad (4)$$

Denklem 4'e göre, DAE işlemi sonucunda elde edilen işlem maliyeti standart evrişimin $\frac{1}{N} + \frac{1}{D_k^2}$ katı olduğu görülmektedir. DAE'nin kullanılması eğitilebilir parametre sayısını ve hesaplama maliyetini önemli ölçüde azaltmaktadır.

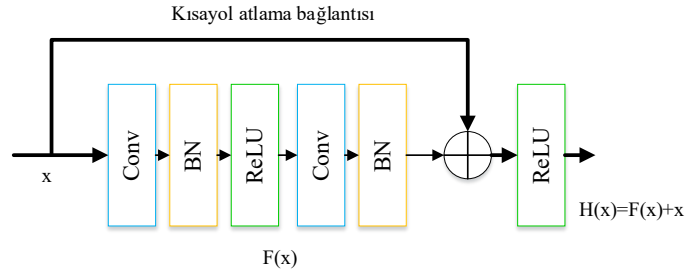


Şekil 1. (a) Standart evrişim. (b) Derinlemesine ayrılabilir evrişim

2.2. Artık Ağ Mimarisi (Residual Network Architecture)

Derin olmayan ağ mimarisiyle (yani LeNet, AlexNet, VGGNet) karşılaştırıldığında, derin ağ mimarileri daha güçlü bir öğrenme ve özellik ifade etme yeteneğine sahiptir. Ağ mimarilerinde katman sayısının belirli bir derinliğe ulaşması performansın artmasını sağlamayacak, aksine ağın yapısında bozulmaya neden olacaktır. Yani ağ yapısındaki katman sayısının aşırı artması kullanılan eğitim setindeki sınıflandırma doğruluğunu azaltmaktadır. Aynı zamanda, katman sayısı arttıkça oluşan derin ağları eğitmek, kaybolan gradyan sorunu nedeniyle çok zordur. Kaybolan gradyan sorunu, daha derin ağlardaki eğitim sürecinde ortaya çıkmaktadır. Eğitim ilerledikçe, bir katmandan diğerine geçerken gradyan sinyalleri biraz kaybolmakta ve derin olmayan katmanlarda sifira yaklaşmaktadır. Bu durum ağın yakınsamasını daha baştan engellemektedir. Kaybolan gradyan ve bozulma problemini çözmek için Şekil 2'de gösterilen artık öğrenme bloğu He vd. tarafından önerilmiştir [27]. Ağ girişi x ve çıktı olarak elde edilecek özellik haritası $H(x)$ olarak ifade edilsin. Artık eşleme $H(x) = F(x)+x$, kimlik atlama bağlantıları eklenerek gerçekleştirilmektedir. Böylece ikinci katmanın çıktısına girdi verileri eklenerek geçmiş katmana ait verilerin ileri katmanlara etkin bir şekilde iletilmesi amaçlanmaktadır. Diğer bir ifadeyle, Şekil 2'deki artık ağ mimarisinde, 2 boyutlu evrişim işleminde, 3×3 çekirdek boyutunda iki evrişim işlemi gerçekleştirilmektedir. İlk evrişim işleminden sonra bir toplu normalleştirme (Batch normalization - BN) ve ReLU aktivasyon fonksiyon işlemi gerçekleştirilmektedir. Ardından ikinci evrişim işlemi ve BN

katmanından sonra elde edilen çıktı, bu iki evrişim işlemini atlayan x girdi değeri ile toplanmaktadır. Daha sonra ReLU aktivasyon fonksiyonundan geçirildikten sonra $H(x)$ çıktımız elde edilmektedir. 3 boyutlu evrişim işleminde ise, $3 \times 3 \times 3$ çekirdek boyutunda evrişim katmanları kullanılmaktadır. İleriye yayılma sürecinde, artık öğrenme blokları sayesinde derin ağı kimlik haritalaması gerçekleştirilmektedir. Böylece ağ, kaybolan gradyan ve bozulma problemlerinden kaçınırken katman sayısını arttırabilmektedir. Artık ağ, artık öğrenme blokları adı verilen çok sayıda temel yapısal öğenin istiflenmesiyle oluşturulmaktadır. Bu mimarinin en önemli katkılarından biri, yapay sinir ağının katman sayısını arttırırken ağın daha hızlı ve daha başarılı bir şekilde eğitilmesini sağlamasıdır.



Şekil 2. Artık öğrenme bloğu

2.3. Önerilen Yöntem (Proposed Method)

HUAG, küpün genişliğinin W , yüksekliğinin H ve spektral bandın D olduğu ve hiperspektral verinin girişinin $W \times H \times D$ olarak ifade edildiği 3B veri küpü olarak kabul edilmektedir. Her piksel D spektral ölçümleri içermekte ve one-hot encoding kullanılarak etiket vektörü $C = (c_1, c_2, \dots, c_n)$ oluşturulmaktadır. One hot encoding sayesinde, kategorik değişkenlerin ikili (binary) vektör olarak temsil edilmesi sağlanılmaktadır [28]. Burada n HUAG'deki sınıf sayısını (arazi örtüsü) belirtmektedir. HUAG pikselleri, herhangi bir sınıflandırma yöntemi için yoğun çaba gerektiren yüksek sınıflar arası benzerlik, yüksek sınıf içi değişkenlik, örtüşen ve iç içe bölgeler sergilemektedir. Bu problemlerin üstesinden gelmek için spektral bant fazlalığının ortadan kaldırılması gerekmektedir. Spektral bant fazlalığını ortadan kaldırmak için bir ön işleme adımı olarak, boyut indirgeme yöntemlerinden en sık kullanılan TBA ilk olarak spektral bantlar boyunca orijinal HUAG verilerine uygulanmaktadır. TBA ile nispeten daha az sayıda temel bileşen korunmaktadır. TBA uygulandıktan sonra, aynı uzamsal boyutlar (yani genişlik W ve yükseklik H) korunurken spektral bantların sayısı D 'den B 'ye düşürülmektedir. Herhangi bir nesneyi tanımak için çok önemli olan uzamsal bilgi korunarak yalnızca spektral bantlar azaltılmıştır. Böylece istenilen bant sayısına indirilmiştir. Bu durumda, hiperspektral veriler $W \times H \times B$ olarak temsil edilmektedir. HUAG verileri büyük boyutludur ve birçok spektral banda sahiptir. Bu verileri doğrudan işleme, yüksek donanım ve bellek gereksinimleri gerektirmektedir. Bu nedenle görüntü sınıflandırma ve işlemeden önce HUAG verileri $S \times S \times B$ olarak ifade edilen, merkezi piksele dayalı gerçek etiketlerin üretildiği örtüşen küçük 3B parçalara bölünmektedir. Bu durumda elde edilen 3B parçaların yükseklik ve genişlik boyutu S ve spektral bant sayısı B 'dir. HUAG küpünden üretilen toplam 3B parça sayısı $(W - S + 1) \times (H - S + 1)$ ile bulunmaktadır. Son olarak, 3B parçalar sınıflandırma doğruluk sonuçlarının elde edilmesi için önerilen ağ mimarisinin girişine verilmektedir.

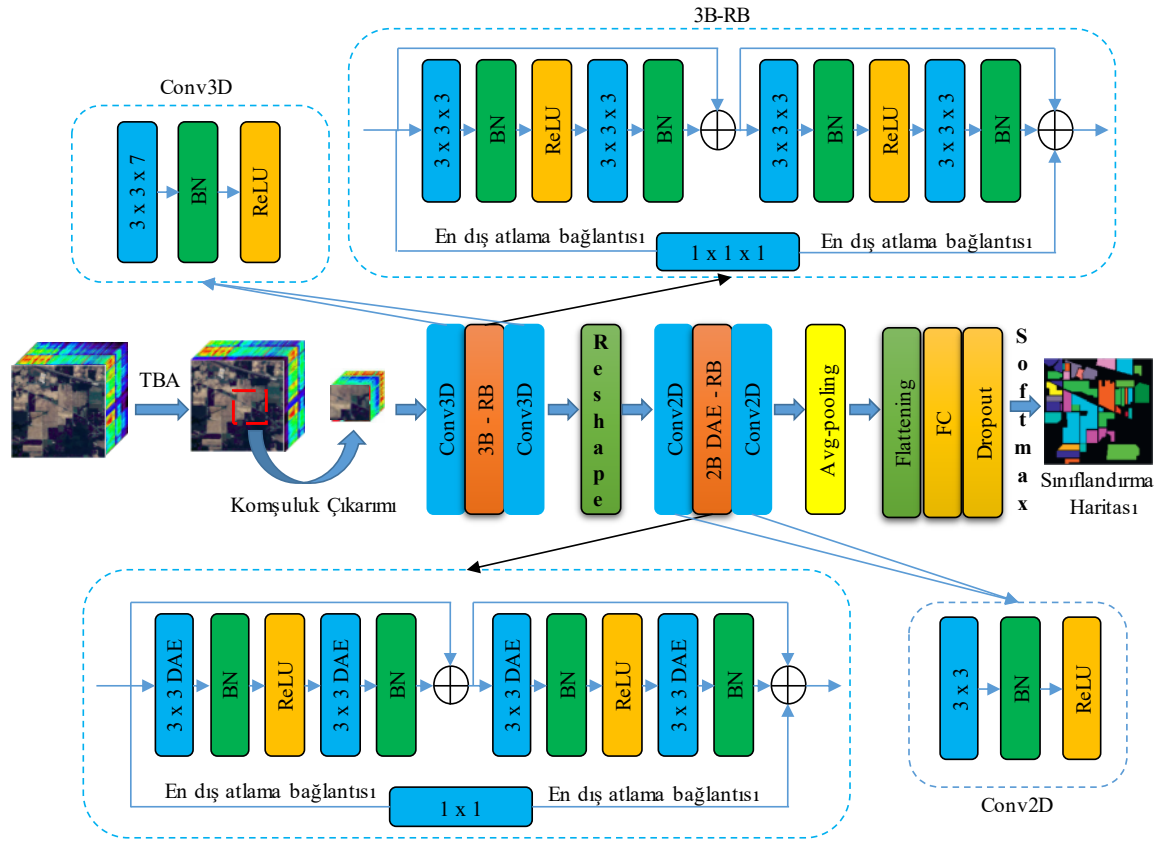
Geleneksel 2B ESA yönteminde, girdi HUAG verilerini aktivasyon fonksiyonundan geçirmeden önce 2B çekirdek kullanılarak evrişim gerçekleştirilmektedir. Evrişim, çekirdek ve giriş HUAG arasındaki iç çarpım toplamını hesaplayarak gerçekleştirilmektedir. Çekirdek, tüm uzamsal boyutu kapsayacak şekilde HUAG üzerinde ilerlemektedir. Bu evrişim işlemi, HUAG'den uzamsal özelliklerin çıkarılmasını sağlamaktadır. Yani; 2B evrişim işleminde, uzamsal boyuta evrişim uygulanmakta ve 2B özellik haritası elde edilmektedir. Ancak, HUAG 3B veridir ve spektral özelliği yakalamak gereklidir. 2B ESA spektral bilgiyi işleyemez. 3B verilere evrişim işlemleri uygulandığında, özelliklerin hem uzamsal hem de spektral boyutlardan yakalanması istenmektedir. Bu amaçla, 3B girdi verilerinden ortak uzamsal spektral özellikleri çıkarmak için 3B özellik küplerine 3B evrişim işlemlerinin uygulandığı 3B ESA kullanılmaktadır. 3B evrişim işlemi,

bir 3B evrişim çekirdeğinin 3B verilerle konvolüsyonu ile elde edilmektedir. 3B evrişim çekirdeği, giriş 3B görüntüsünün iki boyutu üzerinde evrişim işlemlerini gerçekleştirmekte ve bir 3B özellik haritası elde etmektedir. 3B ESA aynı anda spektral ve uzamsal özellikleri çıkarabilir, ancak hesaplama karmaşıklığını arttırmaktadır. 2B ESA ve 3B ESA'nın eksikliklerinin üstesinden gelmek ve 2B ve 3B'nin otomatik özellik öğrenme yeteneklerinden tam olarak yararlanmak için önerilen yöntemde, 3B ESA ve 2B ESA'yı birleştiren hibrit bir evrişimli sinir ağı çerçevesi kullanılmaktadır. Ayrıca, önerilen yöntemde, geleneksel 2B evrişim katmanlarından bazıları, DAE'lerle değiştirilmiştir. Bu şekilde parametre ve işlem maliyetleri sorunu çözülebilmekte ve aşırı öğrenme (overfitting)'den daha fazla kaçınılabilmektedir. Diğer bir deyişle, önerilen yöntemin 2B bölümünde DAE katmanlarının kullanılması, eğitilebilir parametre sayısını azaltmakta ve aşırı öğrenmeyi önlemektedir. DAE kullanılarak, HUAG'nin özellik öğrenme kapasitesi iyileştirilmekte ve hesaplama karmaşıklığı azaltılmaktadır.

Önerilen yöntem (ÖY), Şekil 3'te gösterildiği gibi 2 3B evrişim (conv3D) katmanı ile 3B evrişim katmanlarından oluşan artık bloklar (Residual blok-RB) (3B-RB), 2 2B evrişim katmanı (conv2D) ile 2B DAE katmanlarından oluşan artık bloklar (DAE-RB), ortalama havuzlama (Average pooling-Avg pooling), düzleştirme (flattening), tam bağlantılı (fully connected-FC), bırakma (dropout) ve softmax katmanlarından oluşmaktadır. $S_x S_x B$ boyutunda elde edilen 3B HUAG verisine ilk olarak $3 \times 3 \times 7$ (iki uzamsal (3×3) ve bir spektral (7) boyut) evrişim çekirdek boyutuna sahip 32 filtre uygulanmaktadır. Ardından 3B evrişim katmanlarından oluşan 2 artık blok uygulanmaktadır. Artık bloklarda kullanılan 3B evrişim çekirdeklerinin tamamı $3 \times 3 \times 3$ boyutunda ve 32 filtre içermektedir. Ayrıca artık blokların en dışındaki atlama bağlantısı $1 \times 1 \times 1$ boyutunda 32 filtre içermektedir. Atlama bağlantısı sayesinde, gradyan kaybolması problemi çözülmekte ve daha derin özelliklerin çıkarılması sağlanmaktadır. 3B evrişim katmanlarını içeren artık bloklardan elde edilen özellik haritasına $3 \times 3 \times 24$ boyutunda ve 64 filtreden oluşan 3B evrişim işlemi uygulanmaktadır. Elde edilen çıktı daha fazla uzamsal özellik elde edilmesini sağlamak için yeniden boyutlandırılarak (Reshape) 2B evrişim işlemleri başlatılmaktadır. İlk olarak 3×3 çekirdek boyutunda 128 filtreden oluşan 2B evrişim işlemi gerçekleştirilmektedir. Daha sonra elde edilen çıktı 2B DAE katmanlarından oluşan artık bloklarının girişine verilmektedir. Artık bloklarda kullanılan DAE katmanlarının tamamı 3×3 çekirdek boyutunda 128 filtre ve en dıştaki atlama bağlantısı 1×1 boyutunda 128 filtre içermektedir. Ağ yapısında DAE katmanlarının kullanılması, yalnızca eğitilebilir parametre sayısını azaltmakla kalmaz, aynı zamanda eğitim hızını da arttırmakta ve aşırı öğrenmeyi önlemektedir. 2B DAE katmanlarından oluşan artık bloklarda elde edilen özellik haritasına 3×3 çekirdek boyutunda ve 128 filtreden oluşan 2B evrişim işlemi uygulanmaktadır. Hem 3B hem de 2B artık bloklarda çıktı özellik haritasının boyutuyla giriş boyutunun aynı olmasını sağlamak için padding="same" kullanılmıştır. Ancak, Artık blokların haricinde kullanılan 3B ve 2B evrişim katmanlarının tamamında padding="valid" kullanılmıştır. Böylece artık bloklara giriş yapmadan önce özellik haritalarının boyutları küçültülmektedir. ReLU, ESA'da en sık kullanılan aktivasyon fonksiyonu olduğundan, tüm evrişim katmanlarında kullanılmaktadır. Eğitim için gradyan iniş teknikleri kullanıldığında ReLU, diğer etkinleştirme işlevlerinden daha hızlıdır. Ayrıca, eğitim sürecini düzenlemek ve hızlandırmak için toplu normalleştirme (Batch normalization - BN) kullanılmaktadır. Tüm 3B/2B artık bloklar ile 3B/2B evrişim işlemlerinden sonra elde edilen özellik haritasına 3×3 boyutunda ortalama havuzlama katmanı uygulanmaktadır. Ortalama havuzlama aracılığıyla 128 çıktı özellik haritası, 1×1 boyutunda 128 özellik haritasına dönüştürülmektedir. Ardından çıkarılan özellikler düzleştirilmekte ve sınıflandırma için tam bağlantılı katmana girdi olarak verilmektedir. Önerilen yöntemde 64 nöronlu tek tam bağlantılı katman kullanılmaktadır. Aşırı öğrenmeyi önlemek için, tam bağlantılı katmandan sonra bırakma (dropout) oranı %0,5 olan bir bırakma katmanı uygulanmaktadır. Tam bağlantılı katmanın çıktısı, sınıflandırma sonucunu üretmek için basit softmax sınıflandırıcıya verilmektedir. Softmax, sınıflandırma için bir derin öğrenme yönteminin son katmanında sıklıkla kullanılan başka bir etkinleştirme işlevidir. Bu etkinleştirme işlevi, tüm örneklerin olasılık dağılımını üretmekte ve bunların toplamı bire eşittir. Önerilen yöntem ile ilgili daha fazla ayrıntı Tablo 1'de gösterilmektedir.

Tablo 1. Indian pines veriseti için önerilen yönteminin ayrıntılı yapısı

<i>Katman</i>	<i>Özellik Haritası boyutu</i>	<i>Filtre</i>	<i>Çekirdek Boyutu</i>	<i>Stride</i>	<i>Padding</i>
Girdi	11x11x30	-	-	-	-
Conv3D (3B Evrişim)	9x9x24	32	3x3x7	1	valid
Residual Blok1 (Conv3D-1, Conv3D-2)	9x9x24	32	3x3x3	1	same
	9x9x24	32	3x3x3		
Residual Blok 2 (Conv3D-1, Conv3D-2)	9x9x24	32	3x3x3	1	same
	9x9x24	32	3x3x3		
Dış Atlama Bağlantısı (Residual Blok1, Residual Blok 2)	9x9x24	32	1x1x1	1	same
Conv3D (3B Evrişim)	7x7x1	64	3x3x24	1	valid
Reshape (Yeniden Boyutlandırma)	7x7	64	-	-	-
Conv2D (2B Evrişim)	5x5	128	3x3	1	valid
Residual Blok3 (Conv2D-1, Conv2D-2)	5x5	128	3x3	2	same
	5x5	128	3x3	1	same
Residual Blok 4 (Conv2D-1, Conv2D-2)	5x5	128	3x3	1	same
	5x5	128	3x3	1	same
Dış Atlama Bağlantısı (Residual Blok3, Residual Blok 4)	5x5	128	1x1	1	same
Conv2D (2B Evrişim)	3x3	128	3x3	1	valid
Ortalama havuzlama katmanı	1x1	128	3x3	1	valid
Düzleştirme katmanı	128	-	-	-	-
Tam bağlantılı katman	64	-	-	-	-
Dropout Katmanı	64	-	-	-	-
Softmax	16	-	-	-	-



Şekil 3. HUAG için önerilen yöntem mimarisi

3. VERİSETLERİ VE UYGULAMALAR (DATASETS AND APPLICATIONS)

3.1. Veri setleri (Datasets)

















Önerilen yöntemin ve en son tekniklerin performansını değerlendirmek için Indian Pines (IP) ve Salinas (SA) verisetlerini içeren iki HUAG veriseti kullanılmıştır. IP ve SA verisetleri http://www.ehu.es/ccwintco/index.php/Hyperspectral_Remote_Sensing_Scenes web adresinden alınmıştır. IP, kuzeybatı Indiana'daki Indian pines test alanında havadan görünür/ kızılötesi görüntüleme spektrometresi sensörü tarafından toplanmıştır. Bu verisetindeki her spektral görüntü 145x145 uzamsal boyutundadır. Sensör, 0.4-2.5 mikrometre dalga boyu aralığında toplam 224 spektral bant elde etmiştir. Bu 224 banttan, 24 bant tam su emme bölgesindedir ve bunlar sınıflandırma için yararlı değildir. Toplam 200 bant uygulamalarda kullanılmıştır. IP, 16 tür sınıf ve 10249 örnek içermektedir. SA, California, Salinas Valley üzerinden havadan görünür/ kızılötesi görüntüleme spektrometresi sensörü tarafından elde edilmiştir. Veriseti, piksel başına 3.7 m uzamsal çözünürlüğe sahiptir. 224 bant içeren, 217 piksel genişliğinde ve 512 piksel yüksekliğinde bir uzaktan algılama görüntüsüdür. 20 su emme bandı çıkarıldıktan sonra kalan 204 bant uygulamalarda kullanılmıştır. SA, toplam 16 sınıf ve 54129 örnek içermektedir. Verisetlerinin sınıf ve örnek sayısı bilgileri Tablo 2'de gösterilmiştir.

3.2. Uygulamalar (Applications)

Tüm uygulamalar Colaboratory (Colab) Notebook kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Colab, Google tarafından sunulan ve donanım hızlandırıcıları olarak Grafik İşleme Birimi'ne (GPU) ve Tensör İşleme Birimlerine (TPU) ücretsiz erişim sağlayan çevrimiçi bir platformdur. Uygulamalarımızı çalıştırırken donanım hızlandırıcı olarak GPU kullanılması tercih edilmektedir. GPU, veri hesaplama için 12.69 GB RAM ve 78.19 GB depolama alanına sahip bir Python 3 masaüstü bilgisayarda kod çalıştırma olanağı

sunmaktadır. Tüm uygulamalarda, 0.001 öğrenme oranlı kategorik çapraz entropi ve optimizasyon için Adam kullanılmaktadır. Yığın boyutu (batch size) 100 ve adım sayısı (epoch) 100 olarak ayarlanmıştır. Eğitim örneklerinin oranı ve girdinin boyutu, HUAG sınıflandırmanın doğruluğunu etkileyen faktörlerdir. Her iki veri kümesi de evrişim için 11×11 komşuluk (pencere boyutu) kullanılmaktadır. IP ve SA veri setlerinin eğitim örnek oranları sırasıyla %20 ve %10 olarak alınmıştır. Uygulamalarımızda ise IP ve SA veri setleri için sırasıyla 30 ve 15 temel bileşen kullanılmaktadır. Diğer derin öğrenme tabanlı yöntemlerle daha iyi bir karşılaştırma yapabilmek için değerler bu şekilde seçilmiştir. Yani komşuluk çıkarımı sonucunda elde edilen 3B yamaların boyutu sırasıyla IP için $11 \times 11 \times 30$ ve SA için $11 \times 11 \times 15$ olarak ayarlanmıştır.

Tablo 2. Her sınıfın IP ve SA verisetlerindeki örneklerle ilgili bilgiler

No	Renk	Indian Pines (IP)		Salinas (SA)	
		Sınıf	Örnek	Örnek	SA
1		Alfalfa	46	Brocoli_green_weeds_1	2009
2		Corn-notill	1428	Brocoli_green_weeds_2	3726
3		Corn-mintill	830	Fallow	1976
4		Corn	237	Fallow_rough_plow	1394
5		Grass-pasture	483	Fallow_smooth	2678
6		Grass-trees	730	Stubble	3959
7		Grass-pasture-mowed	28	Celery	3579
8		Hay-windrowed	478	Grapes_untrained	11,271
9		Oats	20	Soil_vinyard_develop	6203
10		Soybean-notill	972	Corn_senesced_green_weeds	3278
11		Soybean-mintill	2455	Lettuce_romaine_4wk	1068
12		Soybean-clean	593	Lettuce_romaine_5wk	1927
13		Wheat	205	Lettuce_romaine_6wk	916
14		Woods	1265	Lettuce_romaine_7wk	1070
15		Buildings-grass-trees-drives	386	Vinyard_untrained	7268
16		Stone-steel-towers	93	Vinyard_vertical_trellis	1807
Total Number			10,249		54,129

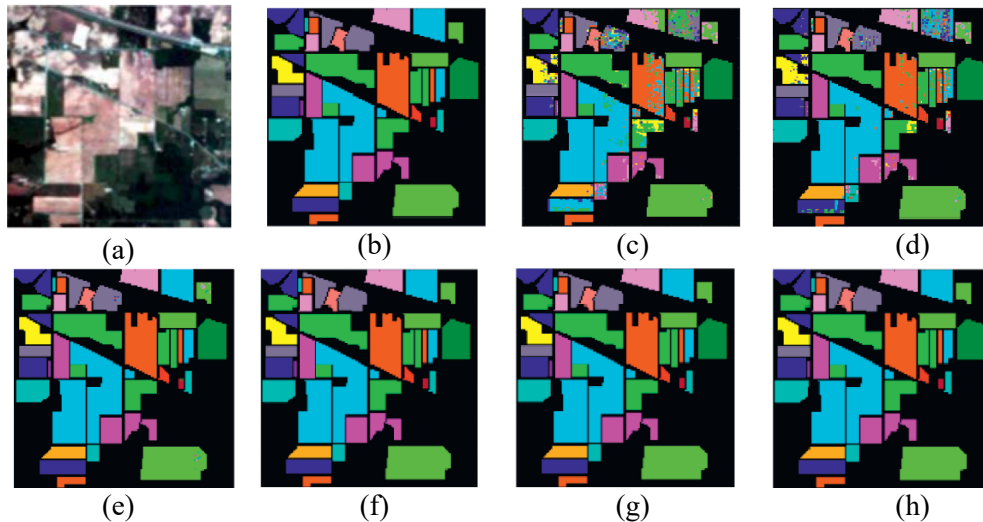
Her yöntemin sınıflandırma sonuçlarını değerlendirmek için genel doğruluk (GD), Ortalama doğruluk (OD) ve Kappa istatistikleri (K) kullanılmıştır. GD, test örneklerinde doğru sınıflandırılmış örnekler ile toplam test örnek sayısı arasındaki oran ile hesaplanmaktadır. OD, her sınıfın doğruluğunun ortalama değeridir. K, temel doğruluk haritası ile sınıflandırma haritası arasında güçlü bir anlaşmaya ilişkin karşılıklı bilgi sağlayan istatistiksel bir ölçüm metriğidir. Önerilen yöntem (ÖY), SVM-RBF [29], 2B ESA [30], 3B ESA [8], SSRN [21] ve HybridSN [22] gibi literatürden alınan derin öğrenmeye dayalı HUAG sınıflandırma yöntemleri ile karşılaştırılmıştır.

İlk uygulama IP veriseti kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her sınıfın sınıf bazında ve GD, OD ve K değerlendirme ölçütlerine göre sınıflandırma doğruluğu Tablo 3'te gösterilmiştir. IP veriseti ile yapılan uygulamalar sonucunda elde edilen temel doğruluk (ground truth) ve sınıflandırma haritaları Şekil 4'te verilmiştir. Tablo 3 incelendiğinde önerilen yöntemin GD, OD ve K değerlendirme ölçütlerine göre sırasıyla %99.45, %99.66 ve %99.37 ile en iyi sınıflandırma sonucunu elde ettiği görülmektedir. Önerilen yöntem en yakın sonuçlar %99.19 GD, %98.93 OD ve %99.07 K değerleri ile SSRN, %99.26 GD, %98.98 OD ve %99.09 K değerleri ile HybridSN yönteminde elde edilmiştir. Diğer sınıflandırma yöntemlerinden en düşük GD, OD ve K değerleri sırasıyla %82.83, %80.84 ve %82.23 ile SVM-RBF'de elde edilmiştir. SVM-RBF'deki OD değerine bakıldığında her sınıf için doğru sınıflandırma sayısının diğer yöntemlere göre daha az olduğu görülmektedir. 2B ESA yönteminde sırasıyla, %90.89 GD, %89.68 OD, %88.56 K değeri ve 3B ESA'da ise %94.07 GD, %93.72 OD, %93.87 K değeri elde edilmiştir. Sınıf bazlı sınıflandırma performansları göz önüne alındığında ise, önerilen yöntem ile 2., 3., 10., 11., 12. ve 15.

sınıflar dışındaki tüm sınıflarda %100 ile en iyi sınıflandırma doğrulukları elde edilmektedir. Sınıf 2 için % 99.17 ile SSRN’de, sınıf 3, 10, 11, 12,15 için sırasıyla %99.55, %99.61, %99.85, %99.31, %99.68 ile önerilen yöntem ile en iyi sınıflandırma doğrulukları elde edilmiştir. Şekil 4 incelendiğinde, temel doğruluk haritasına en çok benzeyen önerilen yöntem olduğu görülmektedir.

Tablo 3. IP verisetinin eğitim-test örnek sayıları ve sınıflandırma doğrulukları (%)

No	Eğitim/Test	SVM-RBF	2B ESA	3B ESA	SSRN	HybridSN	ÖY
1	9/37	61.5	85.88	94.63	97.82	97.98	100
2	285/1143	78.68	91.31	93.9	99.17	98.37	97.64
3	166/664	73.41	91.07	94.85	99.53	99.48	99.55
4	47/190	71.58	80.38	93.48	97.79	97.38	100
5	97/386	80.38	91.89	93.56	99.24	99.23	100
6	146/584	92.27	99.01	94.2	99.51	99.14	100
7	6/22	79.52	82.59	89.73	98.7	99	100
8	96/382	87.38	100	96.01	99.85	100	100
9	4/16	85.87	66.55	95	98.5	99.01	100
10	194/778	77.58	86.38	94.55	98.74	98.76	99.61
11	491/1964	83.75	90.47	93.87	99.3	99.64	99.85
12	118/475	83.21	82.89	91.52	98.43	99.12	99.31
13	41/164	84.64	99.06	93.89	100	100	100
14	253/1012	98.01	97.86	91.77	99.31	100	100
15	77/309	94.3	90.52	95.03	99.2	99.35	99.68
16	19/74	61.43	98.94	93.57	97.82	97.26	100
GD (%)		82.83	90.89	94.07	99.19	99.26	99.45
OD (%)		80.84	89.68	93.72	98.93	98.98	99.66
K x100		82.23	88.56	93.87	99.07	99.09	99.37



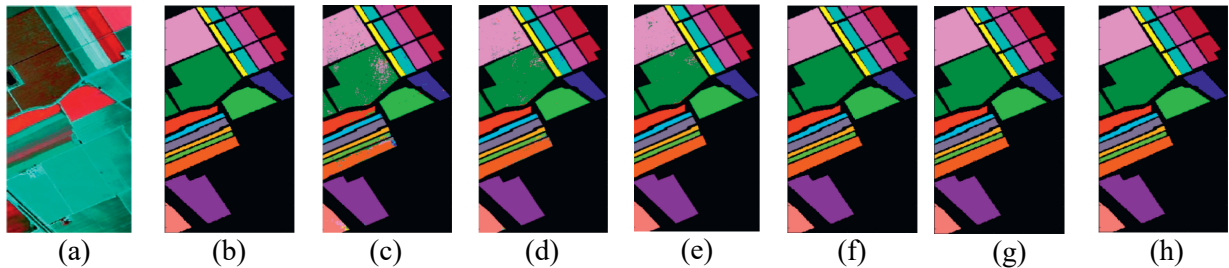
Şekil 4. IP için tahmin sonucunda elde edilen sınıflandırma haritaları. (a) HUAG RGB görüntüsü, (b) temel doğruluk (ground truth), (c) SVM-RBF, (d) 2B ESA, (e) 3B ESA, (f) SSRN, (g) HybridSN ve (h) ÖY

İkinci uygulama kapsamında SA veriseti kullanılmıştır. SA veri seti ile yapılan uygulamalar sonucunda elde edilen sınıflandırma doğrulukları Tablo 4'te verilmiştir. Sınıflandırma sonucunda elde edilen sınıflandırma haritaları Şekil 5'te gösterilmiştir. Tablo 4 incelendiğinde önerilen yöntemde en iyi sınıflandırma doğrulukları %99.95 GD, %99.93 OD ve 99.95 K değerleri ile elde edilmiştir. Önerilen

yönteme en yakın sonuçlar tüm değerlendirme metriklerinde %99.80 ile HybridSN ve %99.64 GD, %98.76 OD, %99.60 K değerleri ile SSRN yönteminde elde edilmiştir. En kötü sınıflandırma doğruluğu IP verisetinde de olduğu gibi %92.67 GD, %91.61 OD ve %92.21 değerleri ile SVM-RBF yöntemiyle elde edilmiştir. 3B ESA %94.02 GD, %93.49 OD, %93.57 K değeri ile SVM-RBF'den sonra en kötü sonuçların elde edildiği yöntem olmuştur. 2B ESA ile %95.34 GD, %94.75 OD ve %94.93 K değeri elde edilmiştir. Sınıf bazlı sınıflandırma doğrulukları incelendiğinde, önerilen yöntem en iyi sınıflandırma doğruluğuna %100 ile 1., 2., 3., 5., 7., 8., 9., 11., 12., 13., 16. sınıflarda ulaşmıştır. En iyi sınıflandırma sonuçları 4., 6., 10., 14. sınıflar için %100 ile HybridSN yönteminde elde edilmiştir. 15 nolu sınıf için %99.92 ile önerilen yöntem en iyi sınıflandırma sonuçlarını vermektedir. Şekil 5 göz önüne alındığında, temel doğruluk haritasına en çok benzeyen önerilen yöntem ile elde edilen sınıflandırma haritası olduğu görülmektedir. Önerilen yöntemden sonra ise HybridSN yönteminin sınıflandırma haritası temel doğruluk haritasına en çok benzemektedir.

Tablo 4. SA verisetinin eğitim-test örnek sayıları ve sınıflandırma doğrulukları (%)

No	Eğitim/Test	SVM-RBF	2B ESA	3B ESA	SSRN	HybridSN	ÖY
1	201/1808	92.56	95.51	95.19	99.78	100	100
2	372/3354	94.78	95.87	96.12	99.78	100	100
3	197/1779	94.22	95.64	95.89	99.78	100	100
4	139/1255	97.36	99.99	97.18	99.99	100	99.44
5	268/2410	93.38	94.51	94.70	99.78	100	100
6	396/3563	95.36	96.71	95.63	99.78	100	99.92
7	358/3221	95.79	95.51	95.36	99.78	100	100
8	1127/10144	80.21	86.93	86.33	99.78	100	100
9	620/5583	97.67	97.42	97.19	99.78	100	100
10	328/2950	88.99	90.93	90.94	92.69	100	99.76
11	107/961	90.20	94.24	90.20	90.68	98.24	100
12	193/1734	96.42	99.91	96.24	99.95	99.61	100
13	91/825	95.53	95.53	95.31	99.85	99.59	100
14	107/963	91.26	92.97	94.18	99.88	100	99.90
15	727/6541	72.67	90.93	81.39	99.12	99.32	99.92
16	181/1626	89.37	93.43	94.09	99.78	100	100
GD (%)		92.67	95.34	94.02	99.64	99.80	99.95
OD (%)		91.61	94.75	93.49	98.76	99.80	99.93
K x 100		92.21	94.93	93.57	99.60	99.80	99.95



Şekil 5. SA için tahmin sonucunda elde edilen sınıflandırma haritaları. (a) HUAG RGB görüntüsü, (b) temel doğruluk (ground truth), (c) SVM-RBF, (d) 2B ESA, (e) 3B ESA, (f) SSRN, (g) HybridSN ve (h) ÖY

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, hiperspektral uzaktan algılama görüntülerinin sınıflandırılması için derinlemesine ayrılabilir evrişim tabanlı artık ağ mimarisi önerilmiştir. Önerilen ağ mimarisi 4 bölümden oluşmaktadır. Öncelikle komşuluk çıkarımı sonucunda elde edilen 3B hiperspektral küp'e 3B evrişim işlemi uygulanmaktadır. Ardından tamamı 3B evrişimlerden oluşan ard arda 2 artık bloktan geçirilmektedir. Elde edilen özellik haritasına tekrardan 3B evrişim uygulanmakta ve yeni bir özellik haritası elde edilmektedir. 3B özellik haritasından daha fazla uzamsal özellik çıkarabilmek için yeniden boyutlandırma yapılarak özellik haritası 2B yapılmaktadır. Elde edilen 2B görüntüye, öncelikle 2B evrişim işlemi uygulanmaktadır. Daha sonra tamamı 2B derinlemesine ayrılabilir evrişimlerden oluşan ard arda 2 artık bloktan geçirildikten sonra elde edilen özellik haritasına tekrardan 2B evrişim uygulanmaktadır. Tüm işlemler tamamlandıktan sonra sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmektedir. Derinlemesine ayrılabilir evrişim kullanılmasının amacı, eğitilebilir parametre sayısını azaltarak eğitim işlemini hızlandırmak ve aşırı öğrenme problemini önlemektir. Önerilen yöntemi test etmek için Indian pines ve Salinas hiperspektral uzaktan algılama görüntü verisetleri kullanılmıştır. Gerçekleştirilen uygulamalar sonucunda, Indian pines verisetinde sırasıyla %99.45 GD, %99.66 OD, %99.37 K değeri elde edilirken, Salinas verisetinde %99.95 GD, %99.93 OD ve %99.95 K değeri elde edilmiştir. Bu sınıflandırma sonuçlarına göre, önerilen yöntem mimarisi, karşılaştırma için kullanılan diğer yöntemlerden başarılı olduğu görülmektedir. Gelecek çalışmalarda, derinlemesine ayrılabilir evrişim katmanları ile kodlayıcı-kod çözücü ağ mimarilerinin beraber kullanıldığında hiperspektral uzaktan algılama görüntü sınıflandırmasını nasıl etkilediği üzerinde çalışma yapılması planlanmaktadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] C. Chen et al., "Hyperspectral classification based on spectral-spatial convolutional neural networks," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 68, no. October 2017, pp. 165–171, 2018, doi: 10.1016/j.engappai.2017.10.015.
- [2] H. Fırat and D. Hanbay, "4CF-Net: Hiperspektral uzaktan algılama görüntülerinin spektral uzamsal sınıflandırılması için yeni 3B evrişimli sinir ağı," *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 1, pp. 439–453, 2021, doi: 10.17341/gazimmfd.901291.
- [3] S. K. Roy, S. Chatterjee, S. Bhattacharyya, B. B. Chaudhuri, and J. Platos, "Lightweight Spectral-Spatial Squeeze-and-Excitation Residual Bag-of-Features Learning for Hyperspectral Classification," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 58, no. 8, pp. 5277–5290, 2020, doi: 10.1109/TGRS.2019.2961681.
- [4] H. Fırat, M. E. Asker, and D. Hanbay, "Classification of hyperspectral remote sensing images using different dimension reduction methods with 3D/2D CNN," *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, p. 100694, 2022, doi: 10.1016/j.rsase.2022.100694.
- [5] J. Li, J. M. Bioucas-Dias, and A. Plaza, "Semisupervised hyperspectral image segmentation using multinomial logistic regression with active learning," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 48, no. 11, pp. 4085–4098, 2010, doi: 10.1109/TGRS.2010.2060550.
- [6] Y. Wang, W. Yu, and Z. Fang, "Multiple Kernel-based SVM classification of hyperspectral images by combining spectral, spatial, and semantic information," *Remote Sensing*, vol. 12, no. 1, 2020, doi: 10.3390/RS12010120.
- [7] J. S. Ham, Y. Chen, M. M. Crawford, and J. Ghosh, "Investigation of the random forest framework for classification of hyperspectral data," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 43, no. 3, pp. 492–501, 2005, doi: 10.1109/TGRS.2004.842481.
- [8] Y. Li, H. Zhang, and Q. Shen, "Spectral-spatial classification of hyperspectral imagery with 3D convolutional neural network," *Remote Sensing*, vol. 9, no. 1, 2017, doi: 10.3390/rs9010067.
- [9] A. Mohan and M. Venkatesan, "HybridCNN based hyperspectral image classification using

- multiscale spatio-spectral features,” *Infrared Physics & Technology*, vol. 108, no. March, 2020, doi: 10.1016/j.infrared.2020.103326.
- [10] H. Üzen, M. Turkoglu, M. Aslan, and D. Hanbay, “Depth-wise Squeeze and Excitation Block-based Efficient-Unet model for surface defect detection,” *The Visual Computer*, 2022, doi: 10.1007/s00371-022-02442-0.
- [11] C. Zhao, X. Wan, G. Zhao, B. Cui, W. Liu, and B. Qi, “Spectral-Spatial Classification of Hyperspectral Imagery Based on Stacked Sparse Autoencoder and Random Forest,” *European Journal of Remote Sensing*, vol. 50, no. 1, pp. 47–63, 2017, doi: 10.1080/22797254.2017.1274566.
- [12] H. Data et al., “Deep Learning-Based Classification of Hyperspectral Data,” *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 7, no. 6, pp. 2094–2107, 2014, doi: 10.1109/JSTARS.2014.2329330.
- [13] A. Mughees and L. Tao, “Efficient deep auto-encoder learning for the classification of hyperspectral images,” *Proc. - 2016 Int. Conf. Virtual Real. Vis. ICVRV 2016*, no. September, pp. 44–51, 2017, doi: 10.1109/ICVRV.2016.16.
- [14] Y. Chen, X. Zhao, and X. Jia, “Spectral-Spatial Classification of Hyperspectral Data Based on Deep Belief Network,” *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 8, no. 6, pp. 2381–2392, 2015, doi: 10.1109/JSTARS.2015.2388577.
- [15] J. Li, B. Xi, Y. Li, Q. Du, and K. Wang, “Hyperspectral classification based on texture feature enhancement and deep belief networks,” *Remote Sensing*, vol. 10, no. 3, 2018, doi: 10.3390/rs10030396.
- [16] C. Zhang et al., “Joint Deep Learning for land cover and land use classification,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 221, no. May 2018, pp. 173–187, 2019, doi: 10.1016/j.rse.2018.11.014.
- [17] H. Firat, M. Uçan, and D. Hanbay, “Classification of Hyperspectral Remote Sensing Images Using Hybrid 3D-2D CNN Architecture,” *Journal of Computer Science*, vol. IDAP-2021, no. Special, pp. 132–140, 2021.
- [18] C. Mu, Z. Guo, and Y. Liu, “A multi-scale and multi-level spectral-spatial feature fusion network for hyperspectral image classification,” *Remote Sensing*, vol. 12, no. 1, 2020, doi: 10.3390/RS12010125.
- [19] Z. Meng, L. Li, X. Tang, Z. Feng, L. Jiao, and M. Liang, “Multipath residual network for spectral-spatial hyperspectral image classification,” *Remote Sensing*, vol. 11, no. 16, pp. 1–19, 2019, doi: 10.3390/rs11161896.
- [20] L. Song, W.; Li, S.; Fang, “Hyperspectral Image Classification with Deep Feature Fusion Network,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 99, pp. 3173–3184, 2018, doi: 10.1109/IGARSS.2019.8898520.
- [21] Z. Zhong, J. Li, Z. Luo, and M. Chapman, “Spectral-Spatial Residual Network for Hyperspectral Image Classification: A 3-D Deep Learning Framework,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 56, no. 2, pp. 847–858, 2018, doi: 10.1109/TGRS.2017.2755542.
- [22] S. K. Roy, G. Krishna, S. R. Dubey, and B. B. Chaudhuri, “HybridSN: Exploring 3D-2D CNN Feature Hierarchy for Hyperspectral Image Classification,” *arXiv*, vol. 17, no. 2, pp. 277–281, 2019.
- [23] M. Ahmad, A. M. Khan, M. Mazzara, S. Distefano, M. Ali, and M. S. Sarfraz, “A Fast and Compact 3-D CNN for Hyperspectral Image Classification,” *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, no. April, pp. 1–5, 2020, doi: 10.1109/LGRS.2020.3043710.

- [24] Z. Ge, G. Cao, X. Li, and P. Fu, "Hyperspectral Image Classification Method Based on 2D-3D CNN and Multibranch Feature Fusion," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 13, pp. 5776–5788, 2020, doi: 10.1109/JSTARS.2020.3024841.
- [25] H. C. Mingyi He, Bo Li, "Multi-scale 3D deep convolutional neural network for hyperspectral image classification," *2017 IEEE Int. Conf. Image Process.*, pp. 3904–3908, 2017.
- [26] L. Dang, P. Pang, and J. Lee, "Depth-wise separable convolution neural network with residual connection for hyperspectral image classification," *Remote Sensing*, vol. 12, no. 20, pp. 1–20, 2020, doi: 10.3390/rs12203408.
- [27] K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun, "Deep residual learning for image recognition," in *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2016, vol. 2016-Decem, pp. 770–778, doi: 10.1109/CVPR.2016.90.
- [28] M. E. Paoletti, J. M. Haut, J. Plaza, and A. Plaza, "Deep learning classifiers for hyperspectral imaging: A review," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 158, no. September, pp. 279–317, 2019, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2019.09.006.
- [29] B. C. Kuo, H. H. Ho, C. H. Li, C. C. Hung, and J. S. Taur, "A kernel-based feature selection method for SVM with RBF kernel for hyperspectral image classification," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 7, no. 1, pp. 317–326, 2014, doi: 10.1109/JSTARS.2013.2262926.
- [30] Q. Wang, J. Gao, and Y. Yuan, "A Joint Convolutional Neural Networks and Context Transfer for Street Scenes Labeling," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 19, no. 5, pp. 1457–1470, 2018, doi: 10.1109/TITS.2017.2726546.



Investigation of The Effect of Different Layouts of Reinforced Shear Walls On Building Behavior

Elif BORU^{1,*} ¹Sakarya University of Applied Sciences, Faculty of Technology, Department of Civil Engineering, 54050, Serdivan/SAKARYA

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article
Received: 24.01.2022
Revision: 08.04.2022
Accepted: 15.04.2022

Highlights

- The effect of 6 different shear wall layouts on building behavior was investigated.
- Modal and equivalent seismic load analyzes were performed
- Comparisons were made taking into account the strength and stiffness parameters.

Keywords

Reinforced concrete
Shear Wall
Layout of shear walls
TBEC 2019
Interstory drift

In this study, the effect of different layouts of reinforced concrete shear walls on building behavior was investigated. The change in the behavior of the ten storey building was investigated by using six different shear wall layouts.

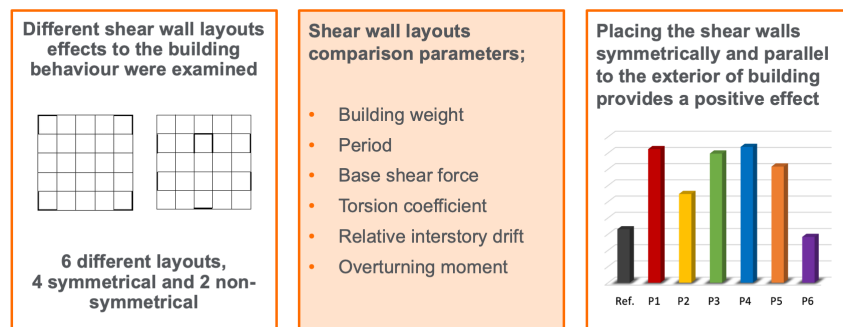


Figure A. General concept of study

Purpose: Considering the design and evaluation criteria of the Turkey Building Earthquake Code (TBDY) 2019, the effect of the different layout and geometry of the shear walls on the building behavior was investigated. In the study, six different building models with a 10-storey, 5-span structural system with shear walls were compared with the reinforced concrete frame system building model, taking into account the building weights, periods, base shear forces, torsion coefficients, interstory drifts and overturning moments.

Theory and Methods: The changes in the behavior of the building as a result of the shear wall layouts were decided by considering the parameters obtained by the modal and equivalent seismic load analysis.

Results: Frame system building was accepted as a reference in comparison. When the weight and period results are examined, the P1 model has a 4% higher weight than the reference building, and the P6 model has a 0.3% lower weight. Considering the periods, P2 building has the lowest period with 44% and P4 building has the highest period with 13%. When the base shear force results are examined, the highest base shear force was obtained with 130% in the P5 model. The highest torsion coefficient in the P1 model is 22% higher than the reference building. The highest decrease in the relative interstory drifts compared to the reference building was obtained in the P2 model with 67%. The highest overturning moment increase was in the P6 model (110%), and the lowest increase was in the P4 model (76%).

Conclusion: As a result of the study, is possible to say that placing the shear walls as symmetrically as possible in the plan and parallel to the exterior has a positive effect on the building behavior.



Investigation of The Effect of Different Layouts of Reinforced Shear Walls on Building Behavior

Elif BORU^{1,*} 

¹Sakarya University of Applied Sciences, Faculty of Technology, Department of Civil Engineering, 54050, Serdivan/SAKARYA

Abstract

It is expected that the designed structures will behave at a certain level of performance under design loads. The effects of structural system properties on the behavior of the structure are quite high. For this reason, the arrangement of the structural system of the structures, the dimensioning and placement of the carrier elements greatly affect the behavior of the structure under the effect of earthquakes. With today's technology, it is not possible to predict the time of earthquakes before a certain period of time. However, it is possible to build earthquake-resistant structures. It is important for multi-storey reinforced concrete buildings to have sufficient rigidity and strength and to limit displacements under the influence of earthquakes. At this stage, the use of shear walls in building design is used as an alternative. The geometry of the shear walls in the carrier system and their position in the plan affect the behavior under earthquake loads. In this study, the effect of the geometry of reinforced concrete shears and their different layouts in the plan on the structural behavior was investigated. For this purpose, the results obtained from the modal and earthquake analysis of seven different buildings, whose structural system is reinforced concrete frame and shear wall frame, were compared. In the comparison, the weight, period, base shear force, torsion coefficient, relative interstory drift and overturning moment values of the buildings were taken into account. In the parameters examined, it is possible to say that placing the shear walls as symmetrically as possible in the plan and parallel to the exterior has a positive effect on the building behavior.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 24.01.2022
Düzeltilme: 08.04.2022
Kabul: 15.04.2022

Keywords

Reinforced concrete
Shear Wall
Layout of shear walls
TBEC 2019
Interstory drift

Anahtar Kelimeler

Betonarme perde
Perde yerleşimi
TBDY 2019
Görel kat ötelemesi

Betonarme Perdelerin Planda Farklı Yerleşiminin Bina Davranışına Etkisinin İncelenmesi

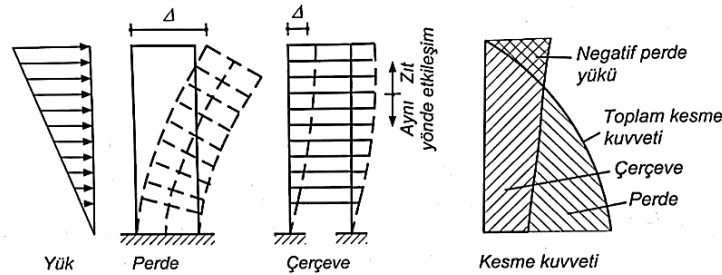
Öz

Tasarlanan yapıların etki eden yükler altında belli bir performans düzeyinde davranış göstermesi beklenir. Taşıyıcı sistem özelliklerinin yapı davranışı üzerinde etkisi oldukça fazladır. Bu sebeple yapıların taşıyıcı elemanlarının boyutlandırılması ve planda yerleşimi deprem etkisi altındaki yapı davranışını büyük ölçüde etkilemektedir. Günümüz teknolojisinde depremlerin zamanını belli bir süre öncesinde tahmin etmemiz mümkün değildir. Ancak depreme dayanıklı yapılar inşa etmek mümkündür. Deprem etkisi altında çok katlı betonarme binaların yeterli rijitlik ve dayanıma sahip olması, yer değiştirmelerin sınırlandırılması önem arz etmektedir. Bu aşamada bina tasarımında perde elemanların kullanılması bir alternatif olarak kullanılmaktadır. Perdelerin taşıyıcı sistemdeki geometrisi ve planda yerleşimi yatay yükler etkisindeki bina davranışını etkilemektedir. Bu çalışmada, betonarme perdelerin geometrisinin ve plandaki farklı yerleşiminin yapısal davranışa olan etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla taşıyıcı sistemi betonarme çerçeve ve perdeli çerçeve olan yedi farklı binanın modal ve deprem analizi yapılmış elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmada binaların ağırlık, periyod, taban kesme kuvveti, burulma katsayısı, görel kat ötelemesi ve devrilme momenti değerleri dikkate alınmıştır. İncelenen parametrelerde perde elemanların planda olabildiğince simetrik ve dış cepheye paralel olacak şekilde yerleşirmenin bina davranışına olumlu etkisi olduğunu söylemek mümkündür.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ülkemiz aktif fay hatları üzerindedir ve nüfusun büyük çoğunluğu belirli periyodlarla deprem gerçeği ile yüz yüze gelmektedir. Deprem etkilerini en aza indirebilme hedefi depreme dayanıklı yapı tasarımının ülkemizdeki önemi arttırmaktadır. Bu tasarım mantığında ana hedef, bir yapının ömrü boyunca etkisi altında kalacağı dış yüklere karşı yeterli dayanımı gösterebilmesidir. Binaya tabandan etkileyen yer hareketleri karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu nedenle tasarıma esas olacak deprem etkilerini tahmin etmek oldukça zordur. Deprem etkisiyle oluşan yatay ve düşey kuvvetler yapı kütleleri ile doğru orantılı artmaktadır. Depremler, tasarımda ekstra kuvvet oluşturmak dışında deformasyon ve burulma etkisine de neden olmaktadır. Bir yapının depreme dayanıklı olabilmesi için ilk şart, taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan sistem elemanlarının bir bütün olarak davranabilmesidir. Kolon ve perdeler düşey taşıyıcı elemanlar olmakla birlikte deprem etkisiyle meydana gelen yanıl ötelenmeyi sınırlandırmak için de kullanılır. Şiddetli deprem etkisinde çok katlı binalarda görelil kat ötelemeleri önemli hasarlara neden olmaktadır. Yapıların deprem güvenliğini sağlamak amacıyla hemen hemen her ülkenin deprem yönetmeliğinde görelil kat ötelemelerine sınırlamalar getirilmiştir. Özellikle yüksek katlı binalarda kolon elemanların tek başına görelil kat ötelemelerini sınırlandırması mümkün değildir. Kolon elemanlarla beraber kullanılan perdeler görelil kat ötelemelerinin sınırlandırılmasına önemli katkı sağlamaktadır. Perdelerin atalet momentleri uzun kenarları doğrultusunda daha büyük olduğu için, bu doğrultuda deprem veya rüzgârdan oluşan yatay yüklerin büyük çoğunluğunu rijitlikleriyle orantılı olacak şekilde taşır.

Taşıyıcı sistem yüksekliği arttıkça tasarımda perde kullanımının önemi de artmaktadır. Özellikle yüksek binalarda, perdelerin dayanım katkısının yanında yanıl ötelenmeyi sınırlandırması da tasarımda bir tercih sebebidir. Sistemin ani ve toptan yıkılmasına engel oldukları gibi, yapısal olmayan hasarları da sınırlandırmaktadır. Perde elemanlar çerçevelerle beraber kullanıldığında daha sünek sistemler tasarlanabilir. Eğilme momenti etkisi ile perde elemanlarda katlar arası en büyük yer değiştirme üst katlarda meydana gelirken, çerçevelerde, kat rijitliğine bağlı olarak yatay yer değiştirmeler kesme etkisinin en yüksek olduğu alt katlarda meydana gelir, üst katlara gidildikçe yer değiştirme miktarı azalmaktadır. İki farklı davranış gösteren çerçeve ve perde sistemler tasarım aşamasında birlikte kullanıldığında, elemanların birlikte çalışmasının sonucu olarak taşıyıcı sistemin yatay ötelenmesi hem kayma, hem de eğilme davranışı etkisi altında oluşur. Karma sistem olarak adlandırılan bu tasarım türünde binanın üst katlarındaki perde eğilmesi çerçeve sistem tarafından, çerçevelerin alt katlardaki kayma etkisi ise perdeler tarafından engellenmiş olur [1].



Şekil 1. Perde ve çerçevenin etkileşimi [1]

Binanın deprem performansında yetersizlik saptanması halinde ekonomik bir çözüm ise uygun bir teknikle güçlendirilmesi gerekir. Binaların taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan elemanlarının güçlendirilmesi için literatürde birçok farklı yöntem kullanılmaktadır [2-16]. Perdelerin farklı bir kullanımı ise binaların güçlendirilmesi aşamasıdır. Yüksek rijitliğe sahip olmaları nedeniyle perde elemanlar taşıyıcı sistem davranışını büyük ölçüde etkilemektedir. Binaların performansını arttırmak için ilave perde eklemek taşıyıcı sistemi iyileştirme seçeneği olarak kullanılır.

Perde duvarların yatay etkiler altında etkin bir biçimde çalışabilmeleri, kat planı içindeki yerleşimleri ile doğrudan ilişkilidir. Literatürde, planda farklı perde yerleşimlerinin bina davranışına ve performansına olan etkisi üzerine yapılmış çalışmalar görmek mümkündür [17-26]. Çavdar, çalışmasında mevcut bir okul binasının TBDY 2019'e göre yapısal düzensizliklerini incelemiş ve perde yerleşiminin bina düzensizlikleri üzerindeki etkisinden bahsetmiştir [27]. Bozdoğan ise çalışmasında iki farklı perdeli çerçeveli sistem

modeli kullanarak kayma ve rijitlik merkezinin bulunması için bir yaklaşım önermiştir. Elde ettiği sonuçları bilgisayar yazılımı ile karşılaştırmalı olarak sunmuştur [28]. Perdelerin binaların burulma davranışına olan etkisi göz ardı edilemeyecek seviyededir. Literatürde burulma düzensizliğine etki eden sebeplerin bulunması amacıyla yapılan çalışmalarda farklı yerleşim düzenlerine sahip perdeli çerçeveli sistemler kullanılmış ve perdelerin burulma düzensizliğine olan etkisi üzerine değerlendirmeler yapılmıştır [29-31].

Bu çalışmada, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) 2019 tasarım ve değerlendirme kriterleri göz önüne alınarak perdelerin plandaki farklı yerleşim ve geometrisinin bina davranışına olan etkisi araştırılmıştır. Literatürde önceki deprem yönetmeliklerindeki kriterler dikkate alınarak yapılmış, inceleme kapsamı daha az olan çalışmalar mevcuttur. Yapılan çalışmada bir çok farklı parametre üzerinden karşılaştırma yapılmıştır. Yeni deprem yönetmeliği kriterleri dikkate alınarak yapılan tasarım ve kullanılan karşılaştırma parametreleri çalışmaya özgünlük katmaktadır. Çalışmada 10 katlı, 5 açıklıklı taşıyıcı sistemi perdeli çerçeve sistem olan altı farklı bina modeli, betonarme çerçeveli bina modeli ile modal ve deprem analizi sonuçları dikkate alınarak karşılaştırılmıştır. Perdelerin bina davranışına olan katkıları detaylı bir şekilde sunulmuştur.

2. PERDE TASARIMINA AİT GENEL İLKELER (GENERAL PRINCIPLES OF SHEAR WALL DESIGN)

TBDY 2019’da planda uzun kenarının kalınlığına oranı minimum altı olan düşey taşıyıcı sistem elemanları perde olarak tanımlanmıştır. Betonarme perdelerde L, T, C, I veya U en kesitli olanların, her bir doğrultuda en az bir perde kolunun bu şartı sağlaması gerekliliği belirtilmiştir. Şartın sağlanmadığı durumda o doğrultuda taşıyıcı sistem elemanı perde olarak değerlendirilemez ibaresi yer almaktadır. Düşey bir taşıyıcı elemanın perde olarak kabul edilmesi için en güvenilir parametre perdenin deprem kuvvetleri altındaki moment diyagramına bakmaktır. Taşıyıcı elemanın moment diyagramının bir konsol davranışı gibi görünmesi, yani bina boyunca tabana doğru gittikçe artan bir grafik sergilemesi o taşıyıcı elemanın perde olarak davrandığının kanıtıdır. Ancak kat içerisinde moment yön değiştiriyor ise bu durumda taşıyıcı eleman bir kolon olarak değerlendirilir. Dikdörtgen ve U, L ve T tipi perdelerin gövde bölgesinde kalınlığı kat yüksekliğinin 1/16’sından ve 250 mm’den küçük olmamalıdır. Her iki ucundan yanal doğrultuda bir perde ile tutulu olan perde kolunun kalınlığı kat yüksekliğinin 1/20’sinden ve 250 mm’den küçük olmamalıdır. Perde kolunun veya dikdörtgen perdenin kalınlığı, perdenin veya perde kolunun plandaki yanal doğrultuda tutulmamış boyunun 1/30’undan küçük olmamalıdır. Perde en kesit ve donatı tasarımı ile ilgili bilgiler TBDY 2019 Bölüm 4.5 ve 7.6 ‘da detaylandırılmıştır [32].

3. NÜMERİK ÇALIŞMALAR (NUMERICAL STUDIES)

Çalışmada, kat yüksekliği 2,8 metre olan 10 katlı, taşıyıcı sistemi çerçevelerden oluşan, kat oturma alanı 625 m² ve planda simetrik bir bina kullanılmıştır. Perdeler planda simetrik olan ve simetrik olmayan 6 farklı şekilde binaya yerleştirilmiştir. Perde yerleşiminde toplam perde en kesit alanının tüm modellerde eşit olmasına dikkat edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda binaların ağırlıkları, hakim periyotları, taban kesme kuvvetleri, burulma düzensizlikleri, görelî kat ötelemeleri ve devrilme momentleri karşılaştırılmıştır.

Tablo 2. Binaların deprem parametreleri

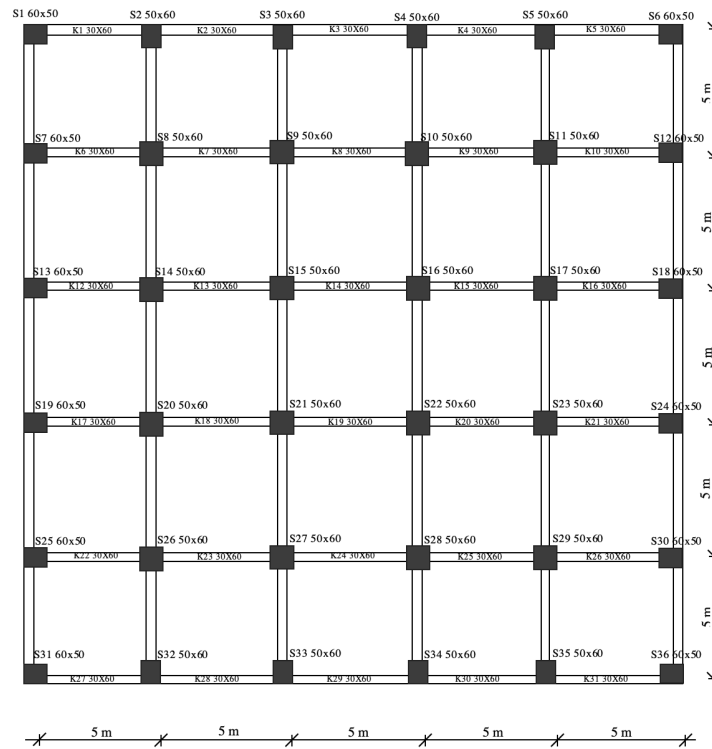
Deprem Parametreleri	
Zemin sınıfı	ZC
Deprem yer hareket düzeyi	DD-2
Bina kullanım sınıfı (BKS)	3
Bina önem kat sayısı (I)	1.0
Deprem tasarım sınıfı (DTS)	1

Bina yükseklik sınıfı (BYS)	5
-----------------------------	---

Gerçek davranışı temsil etmesi amacıyla binaların Kocaeli'nin Çayırova ilçesinde zemin etüt raporu mevcut olan bir arsa üzerinde yapıldığı kabul edilmiştir. Deprem parametreleri zemin etüt raporundaki bilgiler dikkate alınarak AFAD'ın hazırlamış olduğu Türkiye Deprem Haritaları kullanılarak belirlenmiştir (Tablo 2). Tasarımda TBDY 2019'da belirtilen yerinde dökme betonarme binalar için belirtilen minimum kesit ve malzeme şartlarını sağlayacak şekilde C35 beton ve B420C inşaat çeliği kullanılmıştır. Kirişler 30/60 cm, kolonlar ise 60/60cm ve 50/60 cm olarak kullanılmıştır. Tasarım için TS500 [33], TS 498 [34] ve TBDY 2019 yönetmelikleri dikkate alınmıştır.

3.1. Referans Bina (Reference Building)

Referans binanın taşıyıcı sistemi çerçevelerden oluşmaktadır, planda her iki doğrultuda simetrik ve aks açıklıkları 5m'dir (Şekil 2). Tasarımda binanın kontrollü hasar deprem performansını sağlaması dikkate alınmıştır. Yapılan modal analiz ve eşdeğer deprem yükü analizi sonucunda elde edilen veriler Tablo 3'te sunulmuştur. Deprem yükleri etkisindeki yapısal performansın belirlenmesinde hem referans binada hem de perdeli bina modellerinde TBDY 2019 Tablo 4.2'de verilen etkin kesit rijitlikleri dikkate alınmıştır. Yani çatlamış kesite ait rijitlik çarpanları kolonlar için 0.7, kirişler için 0.35, perdeler ve döşemeler için 0.25 olarak alınmıştır.



Şekil 2. Referans bina normal kat planı

Sonuçlar incelendiğinde maksimum burulma katsayısı, $\eta_{bi} < 1,2$ koşulu sağlandığından binada burulma düzensizliği olmadığı, her iki yönde maksimum etkin görel kat ötelemesi $\delta_{max} \leq 0,008$ koşulu sağlandığından görel kat ötelemelerinin maksimum sınırı aşmadığını söylemek mümkündür.

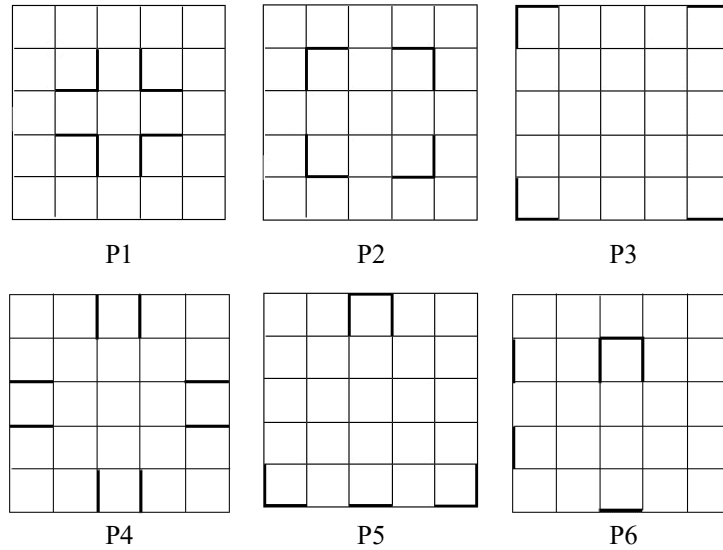
Tablo 3. Modal ve deprem analizi sonuçları

Referans Bina	
Bina ağırlığı (kN)	65148
Hakim period (s)	1,20

Hakim mod yönü	x
Taban kesme kuvveti (kN)	2732
Maksimum burulma katsayısı	1,13
Etkin görelî kat ötelemesi	0,0045

3.2. Perdeli Binalar (Shear Wall Buildings)

Perdeler yapıda yatay yer değiştirmeyi sınırlandırmak, yatay kuvvet etkisiyle yapıda oluşan kesme kuvvetinin önemli kısmını taşımak, dolayısıyla kolon ve kirişlere gelen yatay yükü azaltmak, son olarak da burulmayı önlemek amacıyla tercih edilmektedir. Tasarımdaki rolü dikkate alınarak, perdelerin yapıda etkin kullanılması için en uygun yerleşimi belirlemek amacıyla 6 farklı perdeli bina modeli oluşturulmuştur. İlk 4 modelde (P1, P2, P3, P4) iki deprem doğrultusunda eşit alana sahip simetrik yerleşimde perdeler kullanılmıştır. Bunların ikisinde perdeler binanın dış cephesine yerleştirilmiş, diğer iki modelde binanın merkezine yakın bir şekilde yerleştirilmiştir. Beşinci modelde (P5) simetrik olmayan fakat iki doğrultuda eşit perde alanı, altıncı modelde ise simetrik olmayan ve iki doğrultuda eşit olmayan perde alanı kullanılarak altı farklı bina modeli oluşturulmuştur (Şekil 3).



Şekil 3. Tasarlanan perdeli bina modelleri

TBDY 2019'da perdelerin kesit uzunluğunun kalınlığına oranı en az 6 olarak belirtilmiş ve kalınlığının 25cm'den az olmaması istenmiştir. Modellerde perde kalınlığı ilgili şartları sağlayacak şekilde 30cm olarak seçilmiştir. Modellerin tasarımında binaya gelen tüm yüklerin güvenle taşınması, yönetmeliklerin öngördüğü kapasite ve tasarım ilkelerinin sağlanması hedeflenmiştir. Eleman boyutları aynı olmakla birlikte kapasite ve tasarım ilkelerinin sağlanmadığı durumlarda eleman bazında güncellemeler yapılmıştır (kesit veya donatı değişiklikleri). Bu değişiklikler bina tasarımlarında farklar oluşmasına neden olmuştur. Bu farkları ortaya çıkartmak amacıyla bina modellerine modal ve eşdeğer deprem yükü analizleri yapılmıştır.

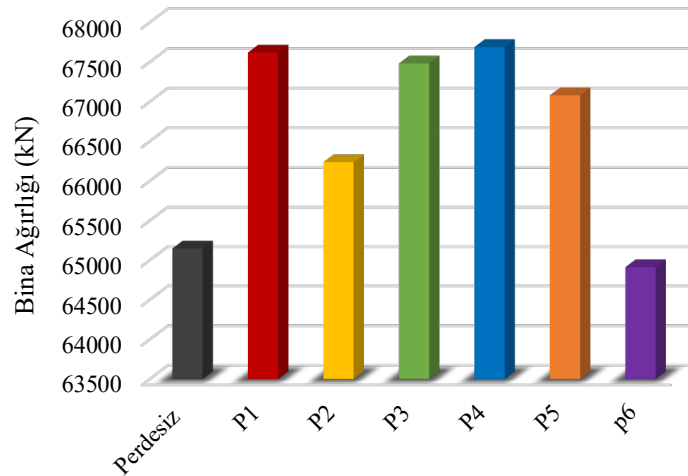
TBDY 2019'da deprem tasarım sınıfı 1, 1a, 2, 2a olan betonarme perdeli binalarda, herhangi bir deprem doğrultusunda tek bir perdenin taşıdığı taban devrilme momentinin (M_{dev}), ilgili doğrultuda tüm binada deprem etkisiyle oluşan toplam taban devrilme momentinin (M_o) 1/3'ünden fazla olmaması gerekliliği vurgulanmıştır. İkinci bir şart olarak da ilgili deprem doğrultusunda binanın kenar akslarında bulunan perde

veya perdelere gelen M_{DEV} veya toplam M_{DEV} , o doğrultuda tüm bina için deprem etkisiyle oluşan M_o 'ın $1/6$ 'sından az olmaması belirtilmiştir. Şartlar sağlanmazsa analizlerde taşıyıcı sistem davranış katsayısı R yerine $(4/5)R$ olarak kullanılmalıdır. Yapılan kontrollerde Model 3 ikinci şartı, Model 5 ve 6'da ilk şartı sağlamadığından 7 olan taşıyıcı sistem davranış katsayısı bu modellerde 5,6 olarak değiştirilmiştir. Referans ve perdeli bina modellerinin sonuçları daha kolay karşılaştırılması amacıyla hem tablo ve hem de grafik halinde sunulmuştur. İlk karşılaştırma hareketli yük katılım katsayısı 0,3 kullanılarak $(G+n.Q)$ ifadesi ile hesaplanmış bina ağırlıkları üzerinden yapılmıştır (Tablo 4, Şekil 4). Bina ağırlığının hesabında sabit yük olarak kolon, giriş, perde, döşeme ve bölme duvar kütlesi dikkate alınmıştır.

Tablo 4. Bina ağırlıkları

	Referans	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Ağırlık (kN)	65148	67620	66237	67482	67689	67081	64913

Tüm modellerin ağırlıkları birbirine yakın çıkmasına karşın, karşılaştırmada ağırlığı en yüksek bina 67689 kN ile planda simetrik P4 modeli, ağırlığı en düşük bina ise 64913 kN ile planda simetrik olmayan P6 modelidir.



Şekil 4. Bina ağırlıklarının grafiksel karşılaştırması

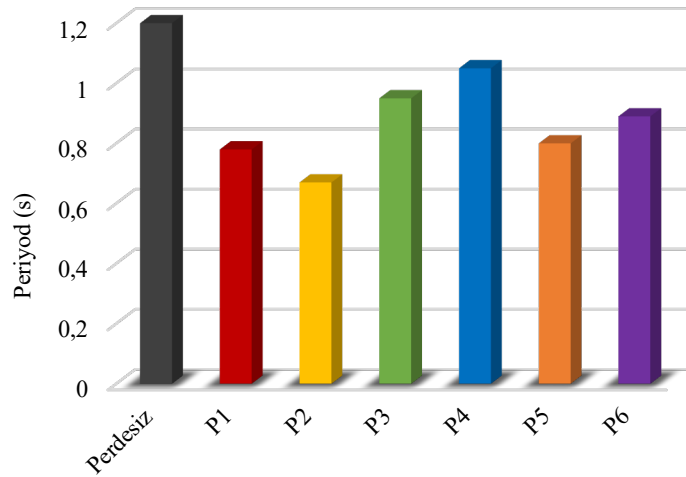
Grafiksel karşılaştırmaya bakıldığında da ağırlıklar arasında büyük farklar olmadığı görülmektedir. En yüksek ve düşük bina ağırlıkları arasında %4 fark vardır (Şekil 4).

Binaların kütle ve rijitliklerinde farklılıklar söz konusudur. Bu nedenle, modal analiz sonucunda elde edilen bina periyodlarında da farklı sonuçlar beklenmektedir. Bina periyodları x ve y olarak iki farklı yön için sunulmuştur (Tablo 5, Şekil 5). Planda simetrik binalarda her iki yönde periyod eşit çıkarken, simetrik olmayan binalarda bu eşitlik bozulmuştur. Referans bina 1,20s ile en yüksek hakim titreşim periyodu değerine sahiptir. Bunun sebebi olarak binanın dayanımını ve yatay yüklere karşı rijitliğini arttıran, binaya gelen kesme kuvvetinin büyük kısmını karşılayan perde elemanların binada bulunmaması söylenebilir. Perdeli binalar arasında ise en yüksek periyod değeri P4 modelinde, en düşük periyod değeri ise P2 modelinde elde edilmiştir (Tablo 5).

Tablo 1. Binaların periyodları

	Perdesiz		P1		P2		P3		P4		P5		P6	
T_x, T_y (s)	1,2	1,2	0,78	0,78	0,67	0,67	0,95	0,95	1,05	1,05	0,80	0,92	0,89	0,75

Grafiksel karşılaştırmada tüm modellerin x yönündeki periyodları dikkate alınmıştır. Bitişik nizamdaki binanın merkezine yakın şekilde yerleştirilen modellerin periyodlarının daha düşük olduğu sonucuna varmak mümkündür. Bina kütleleri birbirine yakın değerlerde olduğu için buradan kütle merkezine yakın tasarlanan bitişik perdelerin bina rijitliğine daha fazla katkı sağladığını söylemek mümkündür (Şekil 5).

**Şekil 5.** Bina periyodlarının grafiksel karşılaştırması

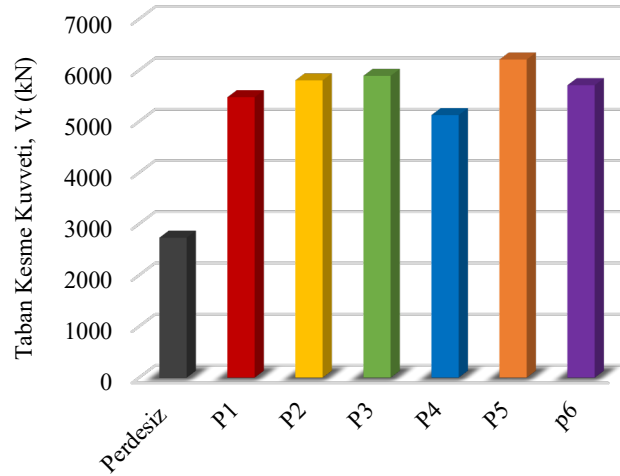
Tüm modellerin zemin parametreleri aynı kabul edildiği için, taban kesme kuvvetinin farklı çıkmasında bina kütlesi, taşıyıcı sistem davranış katsayısı ve periyodlar etkindir. Binaların taban kesme kuvvetleri karşılaştırmasında simetrik modellerin x ve y yönü aynı çıktığı için sadece bir değer, simetrik olmayan modellerin ise x ve y yönü değerleri verilmiştir (Tablo 6).

Tablo 2. Binaların taban kesme kuvvetleri

	Perdesiz	P1	P2	P3	P4	P5		P6	
V_t (kN)	2732	5474	5804	5892	5126	6210	5788	5709	6396

Taban kesme kuvvetleri karşılaştırıldığında en yüksek kütleyle sahip P5 modelinde taban kesme kuvveti değerinin de yüksek çıktığı, referans modelde ise taban kesme kuvveti değerinin en düşük çıktığı belirlenmiştir. En düşük kütleli bina P6 olmasına rağmen, en düşük taban kesme kuvveti bu binada elde edilmemiştir. Bu sonuç taban kesme kuvvetinde yalnız kütle değil bina periyodu ve taşıyıcı sistem davranış katsayısının da etkili olduğunu göstermektedir. Grafiksel karşılaştırmada P5 ve P6 modelinin

sadece x yönü sonuçları dikkate alınmıştır. P4 modelindeki taban kesme kuvvetinin diğer modellerden çok daha düşük olduğu belirgin bir şekilde görülmektedir (Şekil 6).



Şekil 1. Bina taban kesme kuvvetlerinin grafiksel karşılaştırması

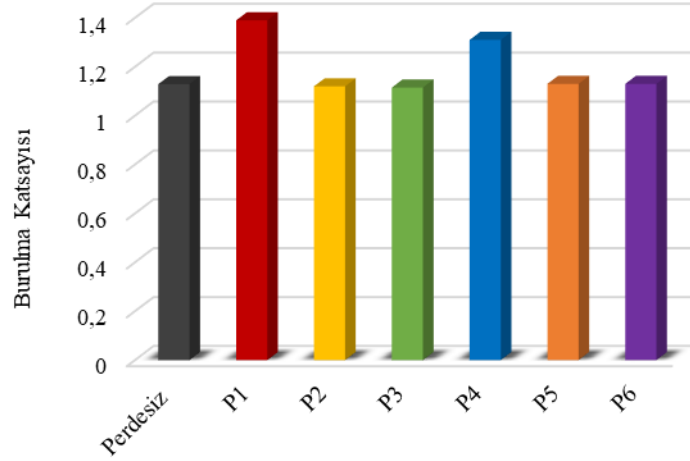
TBDY 2019'a göre, birbirine dik iki deprem doğrultusunun herhangi biri için, herhangi bir katta en büyük kat görelî ötelemesinin o katta aynı doğrultudaki ortalama kat görelî ötelemesine oranı olarak ifade edilen burulma düzensizliği katsayısı, η_{bi} 'nin 1,2'den büyük olması durumunda binada burulma düzensizliği olduğu kabul edilir [29]. Yapılan burulma düzensizliği kontrolleri sonucunda elde edilen burulma katsayıları simetrik modellerde tek bir değer olarak, simetrik olmayan P5 ve P6 modellerinde her iki deprem doğrultusu için Tablo 7 ve Şekil 7'de verilmiştir.

Tablo 3. Binaların her kattaki burulma katsayıları

	Perdesiz	P1	P2	P3	P4	P5 _x	P5 _y	P6 _x	P6 _y
10	1,096	1,134	1,095	1,067	1,142	1,055	1,118	1,139	1,140
9	1,102	1,153	1,092	1,067	1,153	1,028	1,132	1,131	1,130
8	1,105	1,163	1,093	1,061	1,163	1,019	1,132	1,137	1,140
7	1,107	1,179	1,093	1,058	1,171	1,012	1,131	1,142	1,140
6	1,108	1,193	1,093	1,055	1,179	1,006	1,131	1,147	1,150
5	1,108	1,206	1,093	1,052	1,185	1,004	1,130	1,148	1,150
4	1,108	1,220	1,094	1,051	1,195	1,006	1,128	1,148	1,140
3	1,107	1,234	1,094	1,050	1,206	1,013	1,134	1,136	1,130
2	1,110	1,250	1,098	1,049	1,212	1,034	1,155	1,110	1,100
1	1,129	1,375	1,122	1,115	1,304	1,236	1,352	1,102	1,130

P6 hariç tüm modellerde en yüksek burulma katsayısı değerleri 1. katta elde edilmiştir. Üst katlara doğru burulma düzensizliği katsayısı azalmıştır. Referans, P2, P3 ve P6 modellerinde burulma düzensizliği katsayısı TBDY 2019'un koyduğu 1,2 sınır şartının altındadır. P5 binasında ise sadece alt katlarda burulma düzensizliği katsayısının 1,2 sınırını aştığı görülmektedir (Tablo 7). Bu durumda ek dış merkezlik katsayısı (%5) TBDY 2019 4.7.4'te açıklanan ek dışmerkezlik büyütme katsayısı ile çarpılarak büyütülmüştür. Yapılan ekstra dışmerkezlik uygulaması ile deprem yüklerinin kat kütle merkezlerinin yanı sıra bu merkezlerin belirli oranda kaydırılması ile ortaya çıkabilecek ilave burulma momenti ve dönme yer değiştirmeleri de dikkate alınmış olur. Grafik gösterim her binanın maksimum burulma katsayısını

göstermektedir. Grafikten net bir şekilde P1 ve P4 binalarında burulma katsayısının en yüksek değerde olduğu görülmektedir (Şekil 7). Bu durum dışa dönük birleşik ve ayrıık perdelerin burulma düzensizliğini arttırdığını göstermektedir.



Şekil 7. Bina maksimum burulma katsayılarının grafiksel karşılaştırması

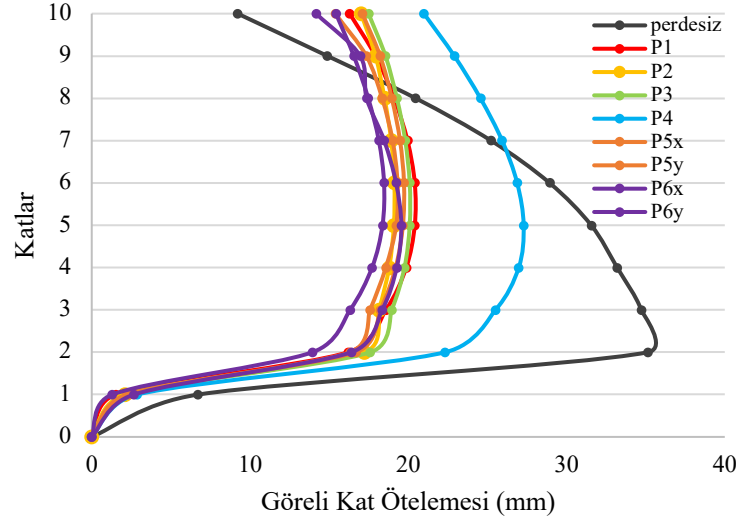
Perdelerin çok katlı binalarda şiddetli deprem etkisinde önemli hasarlar oluşmasına sebep olan görel kat ötelemesi değerlerini büyük oranda azalttığı bilinmektedir. Bu sebeple bina davranış özelliklerini incelerken görel kat ötelemesi değerleri dikkat edilmesi gereken bir parametredir. Çalışmada dolgu duvarların esnek derz veya bağlantı olmaksızın çerçeve elemanlarına bitişik olduğu kabul edildiği için TBDY 2019’da betonarme binalarda maksimum görel kat ötelemesi 0,008 ile sınırlandırılmıştır. Bu şart dikkate alınarak binaların etkin görel kat ötelemelerinin verilen 0,008 şartını sağlayıp sağlamadığı kontrol edilmiştir (Tablo 8, Şekil 8).

Tablo 4. Binaların her kattaki etkin görel kat ötelemesi değerleri

	Perdesiz	P1	P2	P3	P4	P5 _x	P5 _y	P6 _x	P6 _y
10	0,0012	0,0022	0,0018	0,0023	0,0030	0,0018	0,0022	0,0021	0,0020
9	0,0019	0,0023	0,0020	0,0024	0,0032	0,0019	0,0023	0,0024	0,0021
8	0,0027	0,0024	0,0022	0,0025	0,0034	0,0020	0,0024	0,0026	0,0023
7	0,0033	0,0026	0,0023	0,0026	0,0035	0,0021	0,0025	0,0028	0,0024
6	0,0038	0,0026	0,0024	0,0026	0,0036	0,0022	0,0026	0,0029	0,0024
5	0,0041	0,0026	0,0023	0,0026	0,0035	0,0021	0,0025	0,0028	0,0024
4	0,0043	0,0025	0,0022	0,0025	0,0034	0,0020	0,0025	0,0028	0,0023
3	0,0045	0,0023	0,0019	0,0024	0,0032	0,0019	0,0023	0,0026	0,0020
2	0,0046	0,0020	0,0015	0,0022	0,0028	0,0018	0,0021	0,0023	0,0017
1	0,0009	0,0002	0,0002	0,0003	0,0004	0,0003	0,0003	0,0003	0,0002

Etkin görel kat ötelemelerinin 2. kat değerleri dikkate alındığında en yüksek etkin görel kat ötelemesi değerleri referans binada elde edilmiştir. En düşük etkin görel kat ötelemesi değerleri ise P2 modelinde elde edilmiştir. Perdeli binalar arasında ise en yüksek etkin görel kat ötelemesi değeri P4 modelinde elde edilmiştir (Tablo 8). Görel kat ötelemesi değerleri etkin görel kat ötelemesi sıralamasına benzer şekilde en yüksek referans binada, perdeli binalardan ise P4 modelinde elde edilmiştir. En düşük görel kat ötelemesi değerleri ise P2 modelinde elde edilmiştir. Çerçeve binada alt katlarda görel kat ötelemesi farkı

yüksekken, perdeli binalarda üst katlarda görel kat ötelemesi değerleri çerçeve bina kadar azalmamıştır. Bunun sebebi olarak perde elemanlarda moment etkisi ile katlar arası yer değiştirmenin en çok üst katlarda, çerçeve sistemde ise kesme etkisinin en fazla olduğu alt katlarda meydana gelmesi, üst katlara doğru yer değiştirmenin azalması söylenebilir [1] (Şekil 8).



Şekil 8. Bina görel kat ötelemelerinin grafiksel karşılaştırması

Binalarda TBDY 2019’da 4.3.2 ve 4.3.4’te belirtilen devrilme momenti kontrolleri yapılmış ve tüm binalar belirtilen şartları sağlamıştır. Binalarda perdelerin tabanında depremden dolayı oluşan devrilme momenti (M_{dev}) ve tüm bina için deprem etkisinden ötürü bina tabanında oluşan toplam devrilme momenti (M_o) değerleri incelendiğinde en büyük değerler P5 modelinde elde edilmiştir. Perdeli binalar arasında en düşük M_{dev} P4 modelinde elde edilirken, en düşük M_o değeri P6 modelinin y doğrultusunda elde edilmesine rağmen perdeli binalarda sonuçlar birbirine yakın çıkmıştır. Birleşik perdelerin bulunduğu modellerde M_{dev} ’in daha büyük çıktığı belirlenmiştir (Tablo 9).

Tablo 5. Binaların devrilme momentleri

	Perdesiz	P1	P2	P3	P4	P5 _x	P5 _y	P6 _x	P6 _y
M_{dev} (kN.m)	69965	128276	133465	138753	123292	140087	147385	126981	140538
M_o (kN.m)	1077109	1109177	1107392	1110580	1131691	1147917	1145877	1109354	117465

4. SONUÇ VE ÖNERİLER ((CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS))

Çalışmada betonarme perdelerin plandaki farklı yerleşim ve geometrisinin yapısal davranışa olan etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla 10 katlı taşıyıcı sistemi betonarme çerçeve ve perdeli çerçeve olan yedi farklı binanın modal ve deprem analizinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmada binaların ağırlık, periyod, taban kesme kuvveti, burulma katsayısı, görel kat ötelemesi ve devrilme momenti değerleri dikkate alınmıştır. Yapılan karşılaştırmalar ve elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir.

Ağırlık ve periyod sonuçları referans bina ile karşılaştırıldığında P1 modeli referans binadan %4 daha yüksek, P6 modeli ise %0,3 daha düşük ağırlığa sahiptir. Periyodlara bakıldığında %44 ile P2 binası en düşük, %13 ile P4 binası en yüksek periyoda sahiptir. Sonuçlar değerlendirildiğinde en yüksek bina rijitliği P2 modelinde sonrasında sırayla P1, P5’in x doğrultusu ve P6’nın y doğrultusunda elde edilmiştir. Buradan bina merkezine daha yakın konumlandırılan ve bitişik şekilde tasarlanan perdelerin bina rijitliğine daha fazla katkı sağladığını söylemek mümkündür.

Taban kesme kuvveti sonuçları incelendiğinde ise P5 modelinde referans binaya oranla %130 ile en yüksek, P4 modelinde ise %88 ile referans binaya oranla en düşük taban kesme kuvveti elde edilmiştir. Bu parametre üzerinde binanın ağırlık, rijitlik ve spektral ivme değerinin etkisini görmek mümkündür. Perdeler konulduğu doğrultunun rijitliği arttırdığı için periyod düşmektedir, bu durumda binaya etki eden taban kesme kuvveti artmaktadır.

P1 modelinde en yüksek burulma katsayısı referans binadan %22 daha fazla, P6 modelinin x yönünde ise %2 daha düşüktür. Binanın dış cephesine ve aksa paralel yerleştirilen perdelerin burulma etkisini azaltmaktadır. Aksa dik yerleştirilen perdelerin burulma üzerindeki olumsuz etkisini görmek mümkündür.

Görelî kat ötelemesi karşılaştırması referans binanın maksimum öteleme oluşan 2. kat verileri dikkate alınarak yapılmıştır. Tüm modellerde bir azalma söz konusu olmakla birlikte referans binaya göre en yüksek düşüş %67 ile P2 modelinde, en az ise %40 ile P4 modelinde elde edilmiştir. Tüm modeller karşılaştırıldığında rijitlik ve kütle merkezinin birbirinden uzaklaştığı perde yerleşimlerinde kat görelî ötelemesi değerlerinin arttığı söylenebilir.

Tüm modellerin devrilme momenti değerleri referans binadan daha yüksek çıkmıştır. En yüksek artış P6 modelinde (%110), en düşük artış ise P4 modelinde (%76) görülmüştür. Binaya yerleştirilen bitişik nizamdaki perdelerle depremden dolayı daha fazla devrilme momentinin etki ettiğini söylemek mümkündür. Ayrık yerleştirilen perdelerde devrilme momenti etkisi daha düşüktür. Binanın tabanına etkiyen toplam devrilme momenti değerleri ise tüm binalarda birbirine çok yakın çıkmıştır.

Perdelerin bina davranışına olan olumlu etkisi göz ardı edilemeyecek bir gerçektir. Perdelerin plandaki toplam en kesit alanının yanı sıra plandaki yerleşiminin bina davranışında etkin rol oynadığı tüm sonuçlarda ön plana çıkmıştır. Perdeleri planda olabildiğince simetrik ve dış cepheye paralel olarak yerleştirmenin bina davranışına olumlu katkı sağladığı görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] Celep, Z. (2015). Betonarme Yapılar. Yenibosna/İstanbul: Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş.
- [2] Baran, M. (2020). Comparison of seismic performances of reinforced concrete frames strengthened by different techniques. Latin American Journal of Solids and Structures.
- [3] Aksoylu C, Kara N. (2020). Strengthening of RC frames by using high strength diagonal precast panels. Journal of Building Engineering, 31(10) 13-38.
- [4] Baran, M., Aktaş, M., Aykaç, S. (2014). Sıvanmış tuğla dolgu duvarların şerit beton/betonarme panellerle güçlendirilmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 29(1).
- [5] Kalkan, İ., Aykaç, B., Baran, M., Babayani, R., Aykaç, S. (2013). Delikli çelik levhalarla güçlendirilmiş dolgu duvarların deprem davranışı.
- [6] Aksoylu, C., Sezer, R. (2018). Investigation of precast new diagonal concrete panels in strengthened the infilled reinforced concrete frames. KSCE Journal of Civil Engineering, 22(1) 236-246.
- [7] Aksoylu, C., Mobark, A., Arslan, M.H., Erkan, İ.H. (2020). A comparative study on ASCE 7-16, TBEC-2018 and TEC-2007 for reinforced concrete buildings. Revista de la construcción, 19(2), 282-305.
- [8] Aykaç, B., Özbek, E., Babayani, R., Baran, M., Aykaç, S. (2017). Seismic strengthening of infill walls with perforated steel plates. Engineering Structures, 152, 168-179.
- [9] Aksoylu, C., Arslan, M.H. (2019). Çerçeve türü betonarme binaların periyod hesaplarının farklı ampirik bağıntılara göre irdelenmesi. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 8(2), 569-581.

- [10] Aksoylu, C., Arslan, M.H. (2021). 2007 ve 2019 Deprem Yönetmeliklerinde Betonarme Binalar İçin Yer Alan Farklı Deprem Kuvveti Hesaplama Yöntemlerinin Karşılaştırılması Olarak İrdelenmesi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 13(2), 359-374.
- [11] Aksoylu, C., Arslan, M.H. (2019). Çerçeve+ Perde Türü Betonarme Binaların Periyod Hesaplarının TBDY-2019 Yönetmeliğine Göre Ampirik Olarak Değerlendirilmesi. *Uludağ University Journal of the Faculty of Engineering*, 24(3), 365-382.
- [12] Aydın, E., Boru, E. (2020). Betonarme Bir Çerçevenin Farklı Yerleşim Düzenlerine Sahip Merkezi Çelik Çaprazlarla Güçlendirilmesi. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 8-2, 286-294.
- [13] Aksoylu, C., Kara, N. (2019). Güçlendirme tekniği olarak yeni nesil ön üretimli beton panel uygulamasının araştırılması. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(2), 346-361.
- [14] Baran, M. (2020). Comparison of seismic performances of reinforced concrete frames strengthened by different techniques. *Latin American Journal of Solids and Structures*.
- [15] Aksoylu, C., Kara, N. (2020). Strengthening of RC frames by using high strength diagonal precast panels. *Journal of Building Engineering*, 31, 101338.
- [16] Baran, M., Aktaş, M., Aykaç, S. (2014). Sıvanmış tuğla dolgu duvarların şerit beton/betonarme panellerle güçlendirilmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(1).
- [17] Aracı, E. (2012). Betonarme Perde Konumlarının Bina Deprem Performansına Olan Etkisinin Bilgisayar Destekli İrdelenmesi, Akdeniz Üniversitesi, FBE İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı.
- [18] Eken, S., (2012) Betonarme Yapıların Taşıyıcı Sistem Seçiminde Perde Yerleşiminin Davranışa Etkisi, İstanbul Teknik Üniversitesi / FBE/ İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı.
- [19] Güneş, B.E. (2017). Betonarme Yapılarda Perde Yeri Seçiminin Yapısal Davranış Üzerine Etkilerinin İrdelenmesi, Sakarya Üniversitesi / FBE / İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı.
- [20] Kalaycı, A. (2018). Betonarme Binalarda Perde Yerleşiminin Performansa Etkisi, T.C.Süleyman Demirel Üniversitesi FBE İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı,
- [21] Kaya, G. (2018) Betonarme Perde ve Çerçeveli Yapılarda Perde Boyutlandırması ve Yerleşiminin Deprem Davranışına Etkisi, Beykent Üniv. FBE,.
- [22] Kınık, K.E. (2019). Betonarme Binaların Taşıyıcı Sistem Seçiminde Perde Yerleşiminin Davranışa Etkisi, İstanbul Teknik Üniversitesi FBE İnşaat Müh.
- [23] Kasap, H., Akyüncü V. (2002). Perde Boyut Oranı Değişiminin Perdeler ve Çerçeve Arasında Kesme Kuvveti Dağılımına Etkisi, *Sau Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*.
- [24] Uçar, T., Merter, O. (2009). Planda Perde Yerleşiminin Betonarme Perde-Çerçeveli Binaların Deprem Davranışına Etkisi, *Deü Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 11, No. 2, Pp. 11-18.
- [25] Demir, S., Yaman, H., Teke, F. (2019). Betonarme Binalarda Perde Yeri Değişiminin Bina Performansına Etkisi, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, No. 16, Pp. 194-204.

- [26] Yüksel, M., Çağlar, N., Dok, G., Demir, A. (2017). Betonarme Yüksek Yapıların Deprem Performansına Betonarme Perde Oranın Etkisi, Fifth International Symposium On Innovative Technologies In Engineering And Science, Bakü-Azerbaycan.
- [27] Çavdar, Ö., Yolcu, A. (2018). Mevcut Bir Okul Binasının Türk Bina Deprem Yönetmeliği 2018'e Göre Yapısal Düzensizliklerinin İncelenmesi, Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, Cilt 8, No. 2, Pp. 153-164.
- [28] Bozdoğan, K.B., Aydın, S. (2020). Perde-Çerçeve Sistemlerde Rijitlik ve Kayma Merkezi, Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, Cilt 6, No. 2, Pp. 405-414.
- [29] Özmen, G. (2004). Çok Katlı Yapılarda Aşırı Burulma Düzensizliği, İmo Teknik Dergi, Pp. 3131-3144.
- [30] Özmen, G. (2001). Rijitlik Dağılımının Burulma Düzensizliğine Etkisi, Türkiye Mühendislik Haberleri, Cilt 1, No. 411, Pp. 37-40.
- [31] Demir, A., (2008). Dönmez, D. Çok Katlı Yapılarda Burulma Düzensizliğine Etki Eden Faktörler, C.B.Ü. Fen Bilimleri Dergisi, Cilt 4, No. 1, Pp. 31-36.
- [32] Afad, (2019). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY).
- [33] Türk Standartları, Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım (TS 500), (2000). Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [34] Türk Standartları, (1997). Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri (TS 498), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

The Effect of Sintering Number on Crystallographic and Microhardness Properties of MgB_2 Samples Obtained by Mixing Ready MgB_2 Powders and Mg and B Powders

Naki KAYA^{1,*} 0000-0003-2287-676X Serap SAFRAN² 0000-0001-5084-9369

¹ T.C. İstanbul Arel University, Vocational School, Opticianry Program, 34295, Küçükçekmece/İSTANBUL

² Ankara University, Faculty of Sciences, Department of Physics, 06100, Tandoğan/ANKARA

Article Info:

Research article
Received: 28.02.2022
Revision: 01.04.2022
Accepted: 25.04.2022

Highlights

- Superconductivity.
- Mechanical Properties.
- Structural Properties.

Keywords

MgB_2
XRD Method
Vickers Method

Graphical/Tabular Abstract

In this study classical solid state reaction method were used. The samples were prepared in the Solid State Laboratory of the Physics Department of Ankara University. Figure A shows the experimental process.

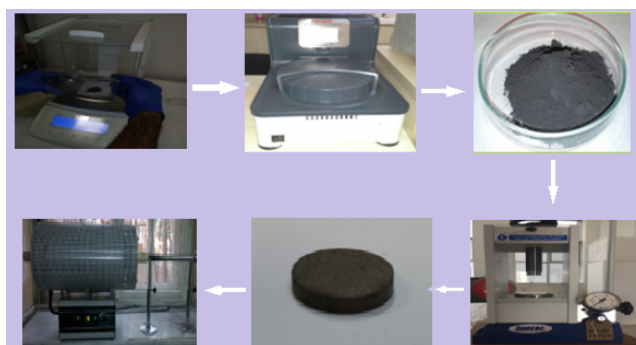


Figure A. Experimental process

Purpose: The main purpose of this study is to examine how the sintering number on crystallographic and microhardness properties of MgB_2 samples obtained by mixing ready MgB_2 powders and Mg and B powders, which is obtained by solid state reaction method.

Theory and Methods: In this study, classical solid state reaction method in sample preparation, X-Ray Diffraction Method in crystallographic analysis; In microhardness analysis, Vickers Method; Meyer's Law, Proportional Sample Resistance Model (PSR), Hays-Kendall Approach (HK) and Elastic/Plastic Deformation Model (EPD) are used for microhardness modelling.

Results: As a result of the analyzes, it was seen that the ready samples had better results in general.

Conclusion: The result shows that that the characteristic peaks of MgB_2 are dominant in all samples, in general, increasing the number of heat treatments decreased the particle size and spacing between the planes in the samples, and caused a general increase in the lattice parameters. Meanwhile, it is observed that Meyer's Law is the most successful model in explaining the microhardness character of the samples and all samples exhibited Indentation Size Effect (ISE) behavior.



The Effect of Sintering Number on Crystallographic and Microhardness Properties of MgB₂ Samples Obtained by Mixing Ready MgB₂ Powders and Mg and B Powders

Naki KAYA^{1,*} 0000-0003-2287-676X Serap SAFRAN² 0000-0001-5084-9369

¹T.C. İstanbul Arel Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Optisyenlik Programı, 34295, Küçükçekmece/İSTANBUL.

²Ankara Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, 06100, Tandoğan/ANKARA.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
 Başvuru: 28.02.2022
 Düzeltilme: 01.04.2022
 Kabul: 25.04.2022

Keywords

MgB₂
 XRD Method
 Vickers Method

Anahtar Kelimeler

MgB₂
 XRD Yöntemi
 Vickers Yöntemi

Abstract

In this study, it is investigated comparatively how the heat treatment number of MgB₂ samples obtained by mixing the MgB₂ powders purchased and elemental Mg and B powders changed on the crystallographic and microhardness properties. Within the scope of this study, ready-made MgB₂ powders and Mg-B powders are mixed and pressed in stoichiometric ratios and turned into 4 tablets of 1 gram each. Tablets are sintered 1, 2, 3 and 4 times at 670 °C in a 10 bar argon atmosphere for 60 minutes and subjected to crystallographic and microhardness analysis. Classical solid state reaction method in sample preparation, X-Ray Diffraction Method in crystallographic analysis; In microhardness analysis, Vickers Method; Meyer's Law, Proportional Sample Resistance Model (PSR), Hays-Kendall Approach (HK) and Elastic/Plastic Deformation Model (EPD) are used for microhardness modelling. The result shows that the characteristic peaks of MgB₂ are dominant in all samples, in general, increasing the number of heat treatments decreased the particle size and spacing between the planes in the samples, and caused a general increase in the lattice parameters. Meanwhile, it is observed that Meyer's Law is the most successful model in explaining the microhardness character of the samples and all samples exhibited Indentation Size Effect (ISE) behavior.

Hazır MgB₂ Tozları ile Mg ve B Tozlarının Karışımı Yolu ile Elde Edilen MgB₂ Numunelerinin Kristalografik ve Mikrosertlik Özellikleri Üzerinde Sinterleme Sayısının Etkisi

Öz

Bu çalışmada hazır olarak satın alınan MgB₂ tozları ile elementel Mg ve B tozlarının karışımı yolu ile elde edilen MgB₂ numunelerinin ısı işlem sayısının kristalografik ve mikrosertlik özellikleri üzerinde nasıl bir değişim meydana getirdiği karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu çalışma kapsamında hazır MgB₂ tozları ve Mg-B tozları stoikiyometrik oranlarda karıştırılıp preslenerek 1'er gram halinde 4 adet tablete dönüştürülmüştür. Tabletler 1, 2, 3 ve 4 kez 670 °C'de 10 bar argon atmosferinde 60 dakika boyunca ayrı ayrı sinterlenip, kristalografik ve mikrosertlik analizine tabi tutulmuştur. Numune hazırlama aşamasında klasik katıhal reaksiyon yöntemi, kristalografik analizlerde, X-Işını Kırınım Yöntemi; Mikrosertlik analizlerinde, Vickers Yöntemi; Mikrosertlik modellerinde, Meyer's Kanunu, Orantılı Numune Direnci Modeli (PSR), Hays-Kendall Yaklaşımı (HK) ve Elastik/Plastik Deformasyon Modeli (EPD) kullanılmıştır. Elde edilen analiz sonuçlarında tüm numunelerde MgB₂'ye ait karakteristik piklerin baskın olduğu, genel olarak ısı işlem sayısının artmasının numunelerde tanecik büyüklüğünü ve düzlemler arası mesafeyi azalttığı, örgü parametrelerinde ise genel bir artışa sebep olduğu görülmüştür. Aynı zamanda numunelerin mikrosertlik karakterini açıklamada en başarılı modelin Meyer's Kanunu olduğu ve tüm numunelerin Çentik Boyut Etkisi (ISE) davranışı sergilediği gözlenmiştir.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

MgB₂ bileşiğinde süperiletkenlik özelliğinin gözlemlenmesinden [1] bu yana, bu bileşik ile ilgili oldukça geniş bir ölçekte çok sayıda çalışmalar yapılmıştır ve günümüzde de yapılmaya devam edilmektedir. MgB₂ bileşiği basit kristal yapıya sahip olması, sentezlenme işlemlerinin kolaylığı, yüksek sıcaklık süperiletkenlerine göre maliyetinin daha ucuz olması, bazı fiziksel ve kimyasal özelliklerinin iyi olması, metallere ve alaşımlar içerisinde yüksek kritik geçiş sıcaklığı, eş-uyum uzunluğunun genişliği, taneler arası güçlü bağlar, yüksek kritik akım yoğunluğu, düşük anizotropi ve yüksek akım taşınması için uygun tanecikler arası sınırlara sahip olması gibi [2] özellikleri ile bu bileşiğe olan ilgiyi arttırmaktadır. Literatürde MgB₂'nin manyetik [3-5], elektriksel [6-8], kristalografik [9-10] ve mekaniksel özelliklerini [11-12] inceleyen çok sayıda çalışmaya rastlamak mümkündür. Literatürde MgB₂ üzerine yapılan çalışmaların, süperiletkenlerin en önemli fiziksel karakteristiklerinden olan elektrik ve manyetik özellikleri üzerinde yoğunlaştığı, buna karşın mikrosertlik açısından MgB₂ üzerine yapılan çalışmaların daha az olduğu görülmektedir. Bu çalışmada elde edilen numunelerin mikrosertlik ve kristalografik özellikleri üzerinde durulmuştur.

Mekanik özellikler süperiletkenler üzerinde teknolojik sahada kullanılabilirlik açısından belirleyici kriterlerden birisidir. Örneğin, yüksek akım taşıma özelliğine sahip çok sayıda seramik tabanlı süperiletken için sertlik değerlerinin yüksek oluşu nedeni ile kırılabilirliğe yatkınlık göstermesi, teknolojik uygulamalarda kullanımında nispeten olumsuz bir durum oluşturmaktadır.

Malzemelerin sertlik-yumuşaklık durumu, malzemeye uygulanan dış kuvvete karşı malzemenin göstermiş olduğu tepki, malzeme üzerine uygulanan kuvvet kaynağının malzeme içerisinde girme derinliği gibi malzemenin mikrosertlik karakteri açısından önemli yorumların yapılmasına olanak sağlayan aynı zamanda uygulanabilirliğinin kolaylığına ve kısa sürede ölçüm yapabilme özelliklerine sahip olduğu için Vickers Yöntemi birçok araştırmacı tarafından ürettikleri malzemelerin mikrosertlik analizleri için kullanılmaktadır [13]. Bu çalışmada da Vickers Yöntemi kullanılarak farklı yaklaşım modellerinde numunelerin mikrosertlik karakterleri tayin edilmiştir.

Literatür örneklerinde sıklıkla karşılaşılan bir durum; MgB₂'nin elde edilme aşamasında uygulanan yöntemlerin değişikliğinin, MgB₂'nin mikrosertlik davranış açısından Ters Çentik Etkisi (RISE) ve Çentik Etkisi (ISE) davranışı sergilemesinde doğrudan etkili olduğunu göstermesidir. MgB₂'nin Vickers Yöntemi ile mikrosertlik özelliklerinin incelendiği bir çalışmada, MgB₂'nin ISE davranışı sergilendiği bulunmuştur [14]. Yine MgB₂'nin Vickers Yöntemi ile mikrosertlik özelliklerinin incelendiği bir başka çalışmada da MgB₂'ye Bi₂Sr₂Ca₁Cu₂O_{8+x} (Bi-2212) eklenmesi ile MgB₂'de RISE davranışı sergilediği gözlenmiştir [15].

Bu çalışmada ex-situ (hazır MgB₂ tozlarını tablet haline getirdikten sonra ısıl işlem uygulanması) ve in-situ (Mg ve B tozlarını sitokiyometrik oranda karıştırıp tablet haline getirdikten sonra ısıl işlem uygulanması) yöntemleri ile üretilmiş MgB₂ numuneleri üzerinde sinterleme sayısının yapısal ve mekanik özellikler üzerindeki etkisi araştırılmış ve bu iki yöntem ile üretilmiş numuneler birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen numunelerin kristalografik analizleri yapılarak örgü parametreleri, tanecik boyutları, düzlemler arası mesafeleri hesaplanmıştır. Aynı zamanda Vickers Yöntemi ile mikrosertlik analizleri yapılarak Meyer's Kanunu, PSR modeli, HK yaklaşımı ve EPD modeline göre mikrosertlik modellemeleri yapılmıştır.

2. MATERYAL VE METOTLAR (MATERIALS AND METHODS)

Bu çalışmada numune eldesi için klasik katıhal reaksiyon yöntemi kullanılmıştır. Hazır olarak alınan MgB₂ tozlarının ve Mg ile B tozları kullanarak elde edilen MgB₂ karışımının birden çok sinterleme işlemi ile reakte edilmesi sonucu, MgB₂ üzerinde meydana gelen kristalografik ve mikrosertlik özelliklerindeki değişimler karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. % 95-97 saflıkta B tozları (PVZ-95-122, Pavezyum) ve ≥ 99 % saflıkta Mg tozları (13112-100G, Aldrich Chemistry) sitokiyometrik oranda karıştırılarak, toplamda 4 gram olacak şekilde tartıldı. Bu tozlar Retsch marka karıştırıcı ile 111 rpm dönme hızında 3 saat karıştırılmıştır. Karıştırılan tozlar ve satın alınan %99 saflıkta MgB₂ tozları (553913- Sigma Aldrich), 1'er gram olacak şekilde Specac marka manuel presleme aleti ile 8 ton/cm² basınç altında 4 adet tablete dönüştürülmüştür. Böylece toplamda 8 adet tablet elde edilmiştir. Daha sonra tabletler ayrı ayrı 1, 2, 3 ve

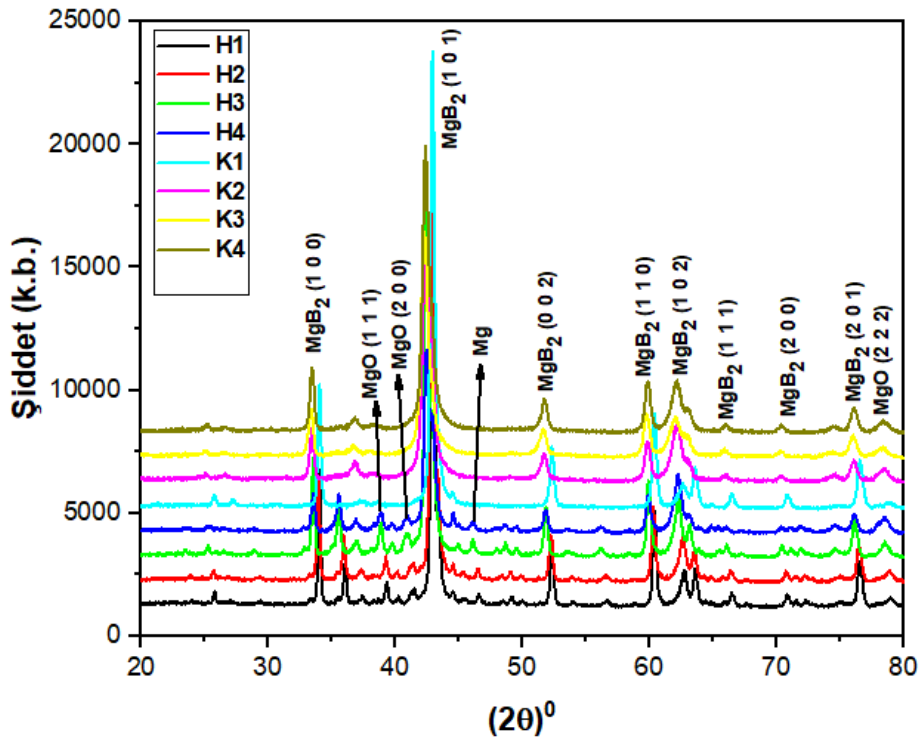
4 defa 10 bar argon atmosferi altında tüp fırında oda sıcaklığından başlanarak 5 dk/^oC ısıtma hızında 670 ^oC'ye kadar çıkartılıp 1 saat boyunca bu sıcaklıkta sinterlenmiştir.

Sinterleme sayısına göre hazır MgB₂ tozları sırası ile H1, H2, H3, H4 olarak isimlendirilirken, Mg ve B tozlarından elde edilen MgB₂'ye ise sinterleme sayısına göre sırası ile K1, K2, K3 ve K4 isimleri verilmiştir. Elde edilen numunelerin yapısal karakterizasyonu X-Işını Kırınımı Yöntemi ve mikrosertlik analizi ise Vickers Yöntemi ile yapılmıştır.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSION)

3.1. XRD Analizi Sonucu

Elde edilen numunelerin kristalografik analizlerinin yapılabilmesi açısından, numuneler Rigaku MiniFlex 2 marka x-ışını kırınım ölçer cihazı ile dalga boyu $\lambda=0,15418$ nm olan, 40 kV, 30 mA CuK _{α} ışını kullanılarak dakikada 0,02 derece tarama açısı ile $2\Theta=20^0-80^0$ aralığında XRD ölçümü alınmıştır. Ölçüm sonucu elde edilen grafik Şekil 3.1'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Numunelere ait XRD grafiği

XRD analizlerinde Eva Programı kullanılmıştır. Şekil 3.1.'de MgB₂'nin (1 0 0), (1 0 1), (0 0 2), (1 1 0), (1 0 2), (1 1 1), (2 0 0) ve (2 0 1) düzlemlerine ait kırınım çizgilerinin ortaya çıktığı görülmektedir. Bu durum tüm numunelerde MgB₂ yapısının oluştuğunu göstermektedir. MgB₂ düzlem piklerinin yanı sıra Mg ve MgO düzlem pikleri de görülmektedir. MgB₂'nin en güçlü kırınım çizgisi(ana pik) olduğu bilinen (1 0 1) düzlemine [16] ait karakteristik pikin tüm numunelerde keskin ve güçlü olduğu görülmektedir. Numunelerin tanecik boyutu, düzlemler arası mesafesi ve örgü parametreleri hesabında (0 0 2) ve (1 0 1) düzlem pikleri kullanılmıştır.

Numunelerin tanecik boyutu hesabı literatürde Debye Scherrer Denklemi [17,18] olarak bilinen ve Denklem 3.1'de gösterilen denklem ile hesaplanmıştır.

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (3.1)$$

Burada D; tanecik boyutu (nm), K; kübik sistemler için kullanılan sabit (0,9) [19], λ ; x ışını kaynağından gönderilen ışının dalga boyu (0,15418 nm), β ; en şiddetli pikin yarı pik genişliği (FWHM) ve θ ; pik açısıdır. Denklem 3.1'de gösterilen denklem ile hesaplanmıştır.

MgB₂'nin karakteristik olarak hegzagonal yapıda olduğu [20] bilindiği için numunelerin düzlemlerarası mesafeleri hegzagonal yapılarda kullanılan Denklem 3.2 ile hesaplanmıştır.

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right] + \frac{l^2}{c^2} \quad (3.2)$$

Hegzagonal yapıların örgü parametrelerini hesaplamada kullanılan bu denklemde; d düzlemler arası mesafe, h, k, l Miller indisleri, a ve c örgü parametreleridir. Örgü parametrelerinden a ile b hegzagonal yapılarda eşit değer aldıklarından denklemde b parametresi yer almamaktadır. Numunelerin düzlemlerarası mesafeleri ise Denklem 3.3 ile gösterilen ve literatürde sıklıkla kullanılan Bragg Yasası ile hesaplanmıştır.

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (3.3)$$

Bu denklemde λ dalga boyu, d düzlemler arası mesafe ve θ en güçlü düzlem pikine karşılık gelen pik açısıdır. Aynı zamanda Şekil 3.1'den yararlanılarak numunelerin her birine ait β (FWHM) ve (1 0 1) düzlemine karşılık gelen pik açıları bulunmuştur. Hesaplamalar sonucu elde edilen veriler Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Numunelere ait kristalografik veriler

	D (tanecik boyutu) (nm)	β (yarı pik genişliği) (radyan)	2(θ)⁰ (1 0 1) düzlemi pik açısı (derece)	d (düzlemler arası mesafe) (nm)	a=b (örgü parametre si) (nm)	c (örgü parametre si) (nm)
H1 (1 0 1)	30,378	0,288	42,926	2,106	2,809	4,214
H2 (1 0 1)	26,920	0,325	42,841	2,110	2,814	4,222
H3 (1 0 1)	24,918	0,348	42,443	2,129	2,839	4,259
H4 (1 0 1)	10,667	0,799	42,462	2,123	2,830	4,246
K1 (1 0 1)	23,323	0,365	42,920	2,107	2,809	4,214
K2 (1 0 1)	9,457	0,901	42,386	2,132	2,843	4,265
K3 (1 0 1)	12,906	0,660	42,293	2,124	2,831	4,247
K4 (1 0 1)	13,545	0,632	42,373	2,133	2,844	4,266

Tablo 3.1 incelendiğinde; numunelerin tanecik boyutlarında, sinterleme sayısına bağlı olarak genel bir azalış eğilimi görülürken bu azalış durumu H serisi numunelerde daha düzenli bir halde gerçekleşmektedir. K serisi numunelerin tamamının tanecik boyutları aynı sinterleme sayısına sahip olan H serisi numunelerinin tanecik boyutlarından daha küçük olarak bulunmuştur. Genel olarak sinterleme sayısının artışı ile numunelerin düzlemler arası mesafeleri artma eğilimi gösterirken, H serisi numunelerine nazaran K serisi numunelerinin düzlemler arası mesafelerinin daha fazla olduğu bulunmuştur.

Pik genişliğinin dar olması numunenin kristalleşmesinin daha hızlı ve daha düzgün olduğuna, kristalitenin de daha iyi olduğuna işaret eder [21]. Bu bağlamda değerlendirildiğinde; Tüm H serisi numunelerin, tüm K serisi numunelere oranla kristalleşmesinin daha hızlı, daha düzgün olduğu ve kristalitelerinin daha iyi olduğu görülmektedir. Tüm numunelerde sinterleme sayısının artışı kristalitenin bir miktar bozulmasına ve pik genişliklerinin de artmasına sebep olduğu Tablo 3.1'deki β değerlerinden anlaşılmaktadır. MgB₂ bileşiğinin (1 0 1) düzlemine karşılık gelen pik açısının 42.4⁰ olduğu bilinmektedir. Tablo 3.1 incelendiğinde tüm numunelerde sinterleme sayısının artması pik açısının kayma miktarını azaltırken, örgü parametrelerini de arttırdığı görülmektedir. H serisi ve K serisi tüm numuneler incelendiğinde; sinterleme sayısının artmasına bağlı olarak tanecik boyutunda azalış, yarı pik genişliği (β) değerinde artış,

(1 0 1) düzlemine karşılık gelen pik açısı ($2(\Theta)^0$) değerinde azalış, düzlemlerarası mesafe (d) değerinde ve örgü parametreleri (a, b, c) değerlerinde artış görülmüştür.

Tablo 3.2. Aynı sinterleme sayısına sahip H ve K serisi numunelerinin kristalografik değerlerinin karşılaştırılmasını vermektedir. Bu tablodan sinterleme sayısının tüm parametrelere etkisine bakıldığında H serisi numunelerinin K serisi numunelere kıyasla daha homojen yapıda üretildiği sonucuna ulaşılmıştır.

Tablo 3.2. Aynı sinterleme sayısına sahip numunelerin kristalografik değerlerinin karşılaştırılması

Tanecik Boyutu	H1>K1, H2>K2, H3>K3, H4>K4
Yarı Pik Genişliği	H1<K1, H2<K2, H3<K3, H4<K4
(1 0 1) Düzlemine ait Pik Açısı	H1>K1, H2>K2, H3>K3, H4>K4
Düzlemlerarası Mesafe	H1<K1, H2<K2, H3<K3, H4<K4
Örgü Parametreleri (a,b,c)	H1=K1, H2<K2, H3>K3, H4<K4

3.2. Mikrosertlik Analizi Sonuçları

3.2.1. Vickers Yöntemine Göre Analiz

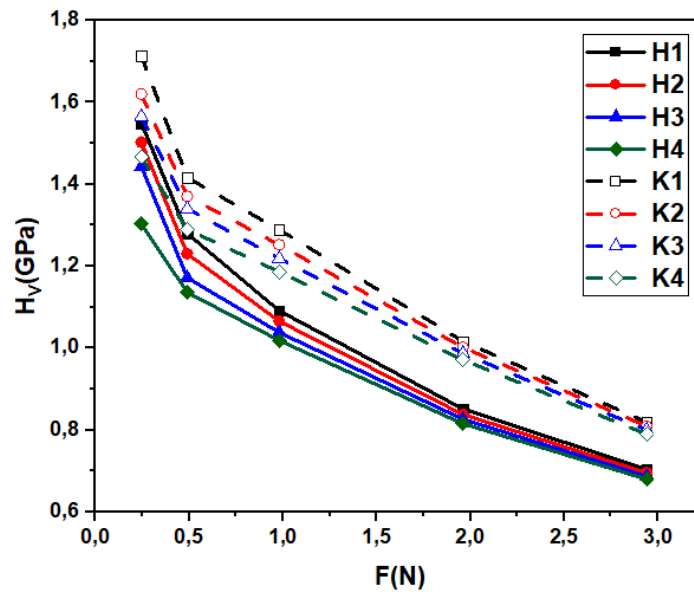
Yüke bağlı mikrosertlik değerleri (H_V), gerilme değerleri (Y), girme derinliği (d) tüm malzemeler için ayrı ayrı 0,24 N, 0,49 N, 0,98 N, 1,96 N ve 2,94 N değerinde yük uygulanarak hesaplanmış ve Tablo 3.3 oluşturulmuştur. Ayrıca Şekil 3.2'de gösterilen, uygulanan yük ile mikrosertliklerinin değişimi grafiği çizilmiş olup bu grafik sayesinde numunelerin ISE veya RISE davranışlarından hangisini gösterdikleri belirlenmiştir. Vickers Yönteminde Denklem 3.4, Denklem 3.5 ve Denklem 3.6 kullanılmıştır.

$$H_V = 1854,4 \times \frac{F}{d^2} \quad (3.4)$$

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (3.5)$$

$$Y \cong \frac{H_V}{3} \quad (3.6)$$

Burada H_V Vickers sertlik değeri, d_1 ve d_2 numune üzerinde oluşan çentici izinin köşegen uzunluğu ve Y gerilme değeridir.



Şekil 3.2. Vickers yöntemine göre numunelere ait mikrosertlik değerlerinin uygulanan yük ile değişim grafiği

Şekil 3.2.'de tüm numunelerde uygulanan dış yükün artması ile beraber mikrosertlik değerlerinde bir azalış görülmektedir. Bu durum numunelerin ISE davranışı sergilediklerini göstermektedir. H serisi numunelerin sertlik değerlerinin K serisi numunelerden daha küçük olduğu görülmekte olup bu durum H serisi numunelerin K serisine göre daha yumuşak olduğu şeklinde yorumlanabilir.

Tablo 3.3. Tüm numuneler için hesaplanan mikrosertlik değerleri

	F(N)	d (µm)	Hv (Gpa)	Y (GPa)		F(N)	d (µm)	Hv (Gpa)	Y (GPa)
H1	0,25	17,12	1,55	0,52	K1	0,25	16,28	1,71	0,57
	0,49	26,65	1,28	0,43		0,49	25,33	1,42	0,47
	0,98	40,81	1,09	0,36		0,98	37,55	1,29	0,43
	1,96	65,34	0,85	0,28		1,96	59,79	1,02	0,34
	2,94	88,03	0,70	0,23		2,94	81,60	0,82	0,27
H2	0,25	17,39	1,50	0,50	K2	0,25	16,74	1,62	0,54
	0,49	27,18	1,23	0,41		0,49	25,75	1,37	0,46
	0,98	41,30	1,07	0,36		0,98	38,10	1,25	0,42
	1,96	65,86	0,84	0,28		1,96	60,25	1,00	0,33
	2,94	88,56	0,70	0,23		2,94	82,08	0,81	0,27
H3	0,25	17,74	1,44	0,48	K3	0,25	17,04	1,57	0,52
	0,49	27,85	1,17	0,39		0,49	26,04	1,34	0,45
	0,98	41,85	1,04	0,35		0,98	38,62	1,22	0,41
	1,96	66,33	0,83	0,28		1,96	60,68	0,99	0,33
	2,94	89,12	0,69	0,23		2,94	82,55	0,80	0,27
H4	0,25	18,67	1,30	0,43	K4	0,25	17,60	1,47	0,49
	0,49	28,28	1,14	0,38		0,49	26,55	1,29	0,43
	0,98	42,24	1,02	0,34		0,98	39,14	1,19	0,40
	1,96	66,77	0,82	0,27		1,96	61,18	0,97	0,32
	2,94	89,56	0,68	0,23		2,94	83,09	0,79	0,26

Tablo 3.3 incelendiğinde hem H serisi numunelerde hem de K serisi numunelerde sinterleme sayısının artırılmasının, girme derinliğini arttırdığı buna bağlı olarak da gerilme değerinin azaldığı görülmektedir. Bu bağlamda sinterleme sayısının artışı ile elde edilen numunelerin sertlik değerlerinin azaldığı, daha yumuşak malzemelerin üretildiği ifade edilebilir. Aynı sinterleme sayısına sahip H ve K serisi numunelerinin karşılaştırılabilmesi açısından Tablo 3.4 oluşturulmuştur.

Tablo 3.4. Aynı sinterleme sayısına sahip numunelerin girme derinliği, gerilme değerleri ve yüke bağlı mikrosertlik değerlerine göre karşılaştırılması

Girme Derinliği	H1>K1, H2>K2, H3>K3, H4>K4
Gerilme Değeri	H1<K1, H2<K2, H3<K3, H4<K4
Yüke Bağlı Mikrosertlik Değerleri	H1<K1, H2<K2, H3<K3, H4<K4

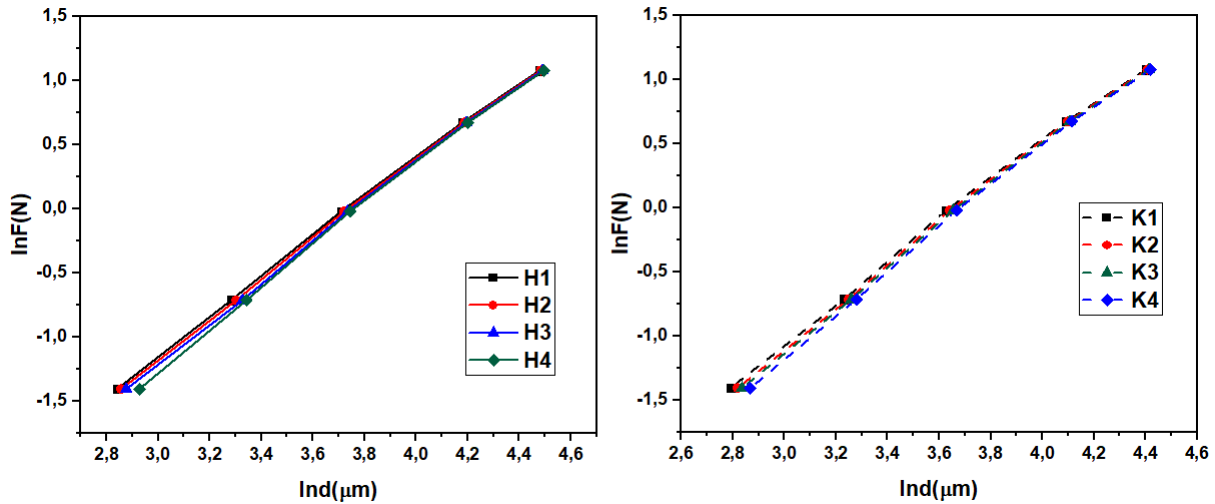
Tablo 3.4'te aynı sinterleme sayısındaki tüm H serisi numunelerin tüm K serisi numunelerine nazaran daha yumuşak olduğu dolayısı ile H serisi numunelerin aynı sinterleme sayısına sahip K serisi numunelerine nazaran girme derinliklerinin daha fazla, gerilme değerlerinin ve yüke bağlı mikrosertlik değerlerinin de daha az olduğu görülmektedir. Yapılan Vickers analizi sonucunda sinterleme sayısının artışı tüm numuneler üzerinde yumuşatıcı bir etki doğurduğu belirlenmiştir.

3.2.2. Meyer's Kanununa Göre Mikrosertlik Analizi Sonucu

Meyer's Kanununa göre yapılan mikrosertlik analizleri Denklem 3.7 kullanılarak yapılmaktadır.

$$F = Ad^{n_k} \quad (3.7)$$

Bu denklemde; n_k Meyer's üssü, A ise malzeme sabitidir. Meyer's Kanununa göre n_k 2'den küçük ise numuneler ISE davranışı sergilerken, n_k 2'den büyük ise numuneler RISE davranışı sergilemektedir dolayısı ile n_k 2 ve 2'den daha büyükse malzemede ISE davranışı görülmemektedir [22]. Aynı zamanda $1 < n_k < 1,6$ durumu numunenin sert olduğunu, $n_k > 1,6$ durumu ise numunenin yumuşak olduğunu göstermektedir [23]. Şekil 3.3 numunelerin $\ln F$ - $\ln d$ grafiğini gösterirken, Tablo 3.5. Meyer's Kanununa göre deneysel verilerden elde edilen değerleri göstermektedir.



Şekil 3.3. Numunelerin $\ln F$ - $\ln d$ grafiği

Tablo 3.5. Meyer's Kanununa göre deneysel verilerden elde edilen değerler

Numune	n_k	H_v (GPA)	Numune	n_k	H_v (GPA)
H1	1,525	0,703-1,549	K1	1,559	0,818-1,713
H2	1,537	0,695-1,502	K2	1,579	0,809-1,620
H3	1,553	0,686-1,443	K3	1,590	0,800-1,565
H4	1,593	0,679-1,303	K4	1,591	0,789-1,467

Tablo 3.5 incelendiğinde numunelerin n_k değerlerinin 2'den küçük olduğu dolayısı ile numunelerin ISE davranışı gösterdiği, aynı zamanda tüm numunelerde $1 < n_k < 1,6$ şartı sağlandığından numunelerin sert oldukları anlaşılmaktadır. H_v değerlerinin ise Vickers analizinde elde edilen H_v değer aralığında çıktığı görülmektedir. Bu durum Meyer's Kanununun numunelerin mikrosertlik davranışını açıklamada başarılı bir model olduğu şeklinde yorumlanabilir.

3.2.3. PSR Modeline Göre Mikrosertlik Analizi Sonucu

PSR modeline göre numunelerin W_{PSR} ve H_{PSR} değerleri hesaplanarak Tablo 3.6 oluşturulmuştur. Bu değerlerin hesaplanabilmesi için Denklem 3.8 ve Denklem 3.9 kullanılmıştır.

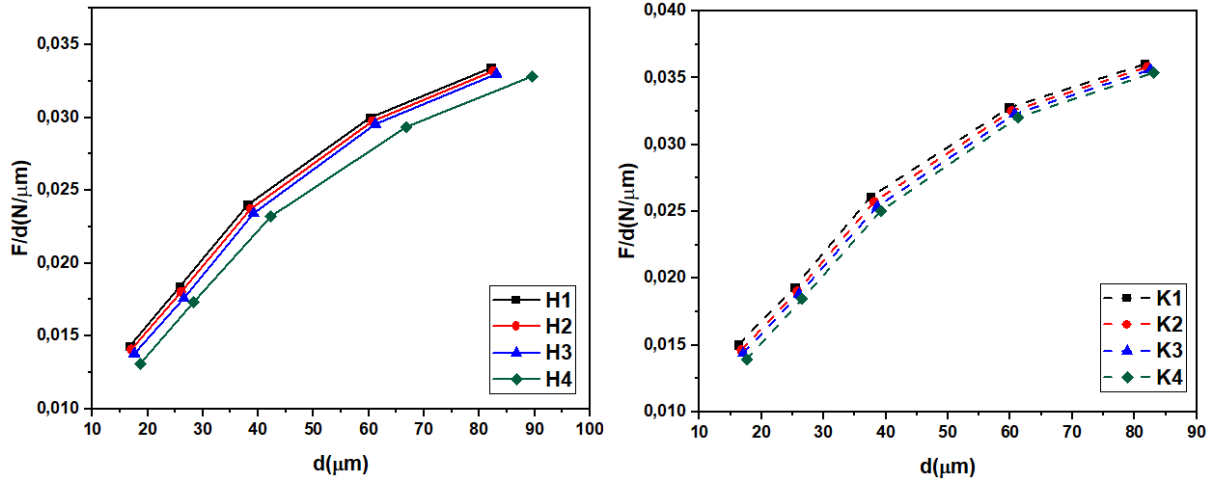
$$\frac{F}{d} = W_{PSR} + A_{1PSR}d \quad (3.8)$$

$$H_{PSR} = 1854,4 \times A_{1PSR} \quad (3.9)$$

Vickers analizi sonucu elde edilen verilerden yararlanılarak Şekil 3.4.'te gösterilen F/d-d grafiği çizilmiştir. PSR modeline göre W_{PSR} değeri negatif ise numuneler RISE, W_{PSR} pozitif ise numuneler ISE davranışı göstermektedir.

Tablo 3.6. PSR modeline göre deneysel verilerden elde edilen değerler

NUMUNE	W_{PSR} (N/(μm))	H_{PSR} (GPA)	NUMUNE	W_{PSR} (N/(μm))	H_{PSR} (GPA)
H1	0,011	0,495	K1	0,011	0,599
H2	0,010	0,496	K2	0,011	0,604
H3	0,010	0,500	K3	0,010	0,604
H4	0,009	0,512	K4	0,009	0,610



Şekil 3.4. PSR modeline göre numunelerin F/d-d grafiği

Tablo 3.6.'da W_{PSR} değerlerinin tüm numuneler için pozitif olduğu görülmektedir. Bu durum tüm numunelerde görülen ISE davranışının bu model ile de doğrulandığını göstermektedir. Ancak Tablo 3.6'daki elde edilen H_{PSR} değerleri incelendiğinde bu değerlerin Vickers analizi ile elde edilen H_v değer aralıklarında değerler almadığı görülmektedir. Dolayısıyla ile bu modelin numunelerin mikrosertlik karakterini açıklamada başarılı olmadığı ifade edilebilir.

3.2.4. HK Yaklaşımına Göre Mikrosertlik Analizi Sonucu

HK yaklaşımına göre Şekil 3.5'te gösterilen $F-d^2$ grafiği çizilmiştir. Denklem 3.10 ile Denklem 3.11 kullanılarak W_{HK} ve H_{HK} değerleri bulunup Tablo 3.7 oluşturulmuştur.

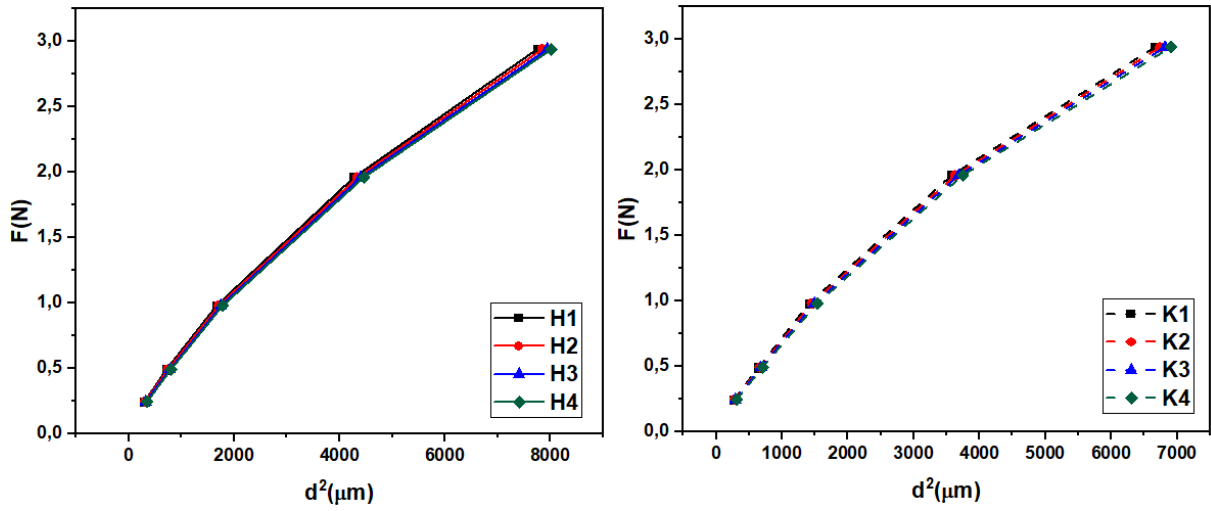
$$F - W_{HK} = A_{1HK}d^2 \quad (3.10)$$

$$H_V = 1854,4 \times A_{1HK} \quad (3.11)$$

HK yaklaşımına göre W_{HK} değerinin negatif çıkması, uygulanan dış kuvvetle numunede plastik deformasyon için yeterli kuvvete ulaşıldığı fakat elastik deformasyon için uygun kuvvet oluşturulmadığını, bu değer pozitif çıkması ise uygulanan dış kuvvetle numunede hem elastik hem plastik deformasyon meydana geldiğini göstermektedir [24].

Tablo 3.7. HK yaklaşımına göre deneysel verilerden elde edilen değerler

NUMUNE	W_{HK} (N)	H_{HK} (GPa)	NUMUNE	W_{HK} (N)	H_{HK} (GPa)
H1	0,272	0,663	K1	0,273	0,775
H2	0,226	0,656	K2	0,265	0,768
H3	0,258	0,650	K3	0,259	0,760
H4	0,249	0,645	K4	0,251	0,752

**Şekil 3.5.** HK yaklaşımına göre numunelerin $F-d^2$ grafiği

Tablo 3.7’de tüm numunelere ait W_{HK} değerinin pozitif olduğu görülmektedir. Bu durumda uygulanan dış kuvvetle numunelerde hem elastik hem plastik deformasyon meydana geldiği sonucu çıkmaktadır. Fakat HK yaklaşımına göre hesaplanan H_{HK} değerleri Vickers analizi ile elde edilen H_v değer aralığında bulunmadığı için bu yaklaşımın da numunelerin mikrosertlik karakterini açıklamada yeterli olmadığını göstermektedir.

3.2.5. EPD Modeline Göre Mikrosertlik Analizi Sonucu

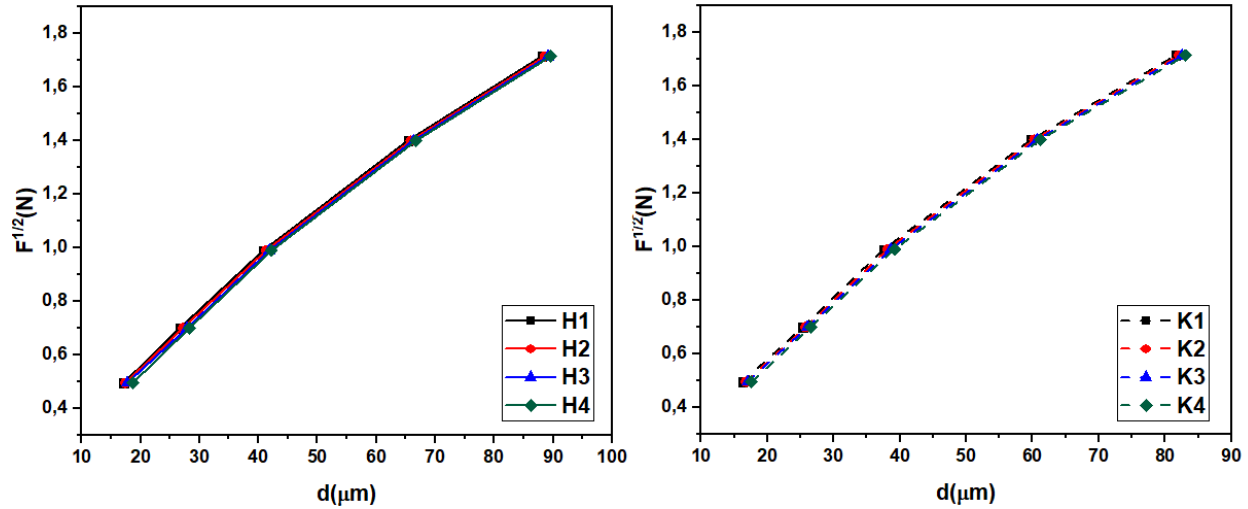
Bu modele göre Denklem 3.12 ve Denklem 3.13 kullanılarak Tablo 3.8 oluşturulmuş ve Vickers analizi verilerinden yararlanılarak Şekil 3.6’da gösterilen $F^{1/2}-d$ grafiği çizilmiştir.

$$F = A_2(d_p + d_e)^2 \quad (3.12)$$

$$H_{EPD} = 1854,4 \times A_2 \quad (3.13)$$

Tablo 3.8. EPD modeline göre deneysel verilerden elde edilen değerler

Numune	$A_2^{1/2}$ (N/(μm^2))	d_e ((μm))	H_{EPD} (GPa)	Numune	$A_2^{1/2}$ (N/(μm^2))	d_e ((μm))	H_{EPD} (GPa)
H1	0,017	0,242	0,546	K1	0,018	0,234	0,649
H2	0,017	0,236	0,543	K2	0,018	0,225	0,649
H3	0,017	0,228	0,543	K3	0,018	0,220	0,646
H4	0,017	0,216	0,547	K4	0,018	0,210	0,646

**Şekil 3.6.** EPD modeline göre numunelerin $F^{1/2}$ - d grafiği

Tablo 3.8 incelendiğinde tüm numunelerin d_e değerinin pozitif olduğu görülmektedir. Bu durum uygulanan yüke bağlı olarak tüm numunelerde hem elastik hem de plastik deformasyon oluştuğunu ifade etmektedir. Her ne kadar bu sonuç HK yaklaşım analizi sonucu ile uyumlu görülse de, Tablo 3.8’de verilen H_{EPD} değerleri Vickers analizi sonucu ile elde edilen H_v değer aralıklarında yer almadığı için, EPD modeli bu çalışmada elde edilen numunelerin mikrosertlik karakterlerini açıklamada yeterli olmadığı sonucu ortaya çıkmaktadır.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

Bu çalışmada elde edilen tüm numuneler incelendiğinde; sinterleme sayısının artışına bağlı olarak tanecik boyutunda azalış, yarı pik genişliği, düzlemlerarası mesafe ve örgü parametreleri değerlerinde artış görülmüştür. Tüm numunelere bakıldığında H serisi numunelerinin K serisi numunelere kıyasla kristalografik açıdan daha düzgün yapıda olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Numunelerin tamamında ISE davranışı gözlemlenirken, numunelerin mikrosertlik karakterini açıklamada en başarılı modelin Meyer’s Kanunu olduğu belirlenmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışmanın deneysel sürecinin gerçekleştirildiği Ankara Üniversitesi Fizik Bölümü Katihal Laboratuvarına teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Nagamatsu, J., Nakagawa, N., Muranaka, T., Zenitani, Y. and Akimitsu, J. (2001). Superconductivity at 39 K in magnesium diboride. Nature, 410, 6824, 63-64.
- [2] Buzea, C., Yamashita, T. (2001). Review of superconducting properties of MgB_2 . Superconductor Science and Technology, 14, 115-146.

- [3] Yamamoto, A., Ishihara, A., Tomita, M., Kishio, K. (2014). Permanent magnet with MgB₂ bulk superconductor. *Applied Physics Letters*, 105(3):032601-032601-4.
- [4] Rabbers, J.J., Oomen, M.P., Bassani, E., Ripamonti, G., Giunchi, G. (2010). Magnetic shielding capability of MgB₂ cylinders. *Superconductor Science and Technology*, 23, 125003 (4pp).
- [5] Patel, D., Matsumoto, A., Kumakura, H., Maeda, M., Kim, S-H., Liang, H., Yamauchi, Y., Choi, S., Kim, J.H., Hossain, Md., S. A. (2022). MgB₂ Superconducting Joint Architecture with the Functionality to Screen External Magnetic Fields for MRI Magnet Applications. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 14, 2, 3418–3426.
- [6] Wang, L., Chen, W., Li, C., Yan, G., Feng, Y., Zhang, P., Zhang, Y., Zhao, Y. (2022). Enhanced critical current density at high magnetic fields in MgB₂ wire processed by in-situ spark plasma sintering. *Journal of Alloys and Compounds*, Volume 891, 162007.
- [7] Jung, S.G., Pham, D., Han, Y., Lee, J.M., Kang, W.N., Kim, C., Yeo, S., Jun, B.H., Park, T. (2022). Improvement of bulk superconducting current capability of MgB₂ films using surface degradation. *Scripta Materialia*, Volume 209, 114424.
- [8] Wang, L., Chen, W., Li, C., Yan, G., Feng, Y., Zhang, P., Zhang, Y., Zhao, Y., (2022). Enhanced critical current density at high magnetic fields in MgB₂ wire processed by in-situ spark plasma sintering. *Journal of Alloys and Compounds*, Volume 891, 162007.
- [9] Xu, M., Kitazawa, H., Takano, Y., Ye, J., Nishida, K., Abe, H., Matsushita, A., Kido, G. (2001). Single crystal MgB₂ with anisotropic superconducting properties. *Applied Physics Letters*, 79, 2779.
- [10] Lee, S., Mori, H., Masui, T., Eltsev, Y., Yamamoto, A., Tajima, S. (2001). Growth structure analysis and anisotropic superconducting properties of MgB₂ single crystals. *Journal of the Physical Society of Japan*, 70, 2255-2258.
- [11] Yılmazlar, M., Terzioğlu, C., Doğruer, M., Karaboğa, F., Soylu, N., Zalaoglu, Y., Yıldırım, G., Öztürk, Ö. (2014). Evaluation of Microstructural and Mechanical Properties of Ag Diffused Bulk MgB₂ Superconductors. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, vol. 27, no. 1, pp. 77–82, Jan.
- [12] Öztürk, Ö., Aşıkuzun, E., Kaya, Ş. (2015). Significant change in micro mechanical structural and electrical properties of MgB₂ superconducting ceramics depending on argon ambient pressure and annealing duration,” *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 26, no. 6, pp. 3840–3852.
- [13] Liang, K. M., Orange, G. and Fantozzi, G. (2004). Evaluation by Indentation of Fracture Toughness of Ceramic Materials. *Journal of Materials Science*, Vol. 25, pp. 207-214
- [14] Kölemen, U. (2006). Analysis of ISE in microhardness measurements of bulk MgB₂ superconductors using different models. *Journal of Alloys and Compounds*, 425, 429–435.
- [15] Taylan Koparan, E., Savaskan, B., Ozturk, O., Kaya, S., Aksoy, C., Wang, J., Speller, S.C., Grovenor, C. R. M., Gencer, A., Yanmaz, E. (2016). Changes in mechanical and structural properties of Bi-2212 added MgB₂ superconductors. *J Mater Sci: Mater Electron*, 27:6060–6070. DOI 10.1007/s10854-016-4531-4.
- [16] Feng, Q. R., Chen, C., Xu, J., Kong, L., Chen, X., Wang, Y., Gao Z. (2004). Study on the formation of MgB₂ phase. *Physica C: Superconductivity*, 411(1), 41-46.
- [17] Suryanarayana, C., Norton, M. G. (1998). X-Ray diffraction a practical approach. (Birinci Basım). New York: Plenum Publishing Corporation, 212.

- [18] Scherrer P, Bestimmung der inneren Struktur und der Größe von Kolloidteilchen mittels Röntgenstrahlen. Kolloidchemie Ein Lehrbuch, Springer, Berlin (1912), p 387–409.
- [19] Altuntaş, G., Altuntaş, O., Bostan, B. (2021). Characterization of Al-7075/T651 Alloy by RRA Heat Treatment and Different Pre-deformation Effects. Trans Indian Inst Met. <https://doi.org/10.1007/s12666-021-02369-5>.
- [20] Shein, I.R., Ivanovskiy, A. L. (2002). Band Structure of ZrB_2 , VB_2 , NbB_2 , and TaB_2 Hexagonal Diborides: Comparison with Superconducting MgB_2 . Physics of the Solid State, Vol. 44, No. 10, 2002, pp. 1833–1839.
- [21] Shafi, P. M., Bose, A. C. (2015). Impact of crystalline defects and size on X-ray line broadening: A phenomenological approach for tetragonal SnO_2 nanocrystals. AIP Advances 5, 057137.
- [22] Quinn, J. B., Quinn, V. D. (1997). Indentation brittleness of ceramics: a fresh approach. Journal of Materials Science, 32, 4331-4346.
- [23] Mott, B. W., 1956. Microindentation Hardness Testing, Butterworths, London.
- [24] Li, H., Bradt, R. C. (1996). The effect of indentation-induced cracking on the apparent microhardness. Journal Material Science, 31, 1065.



Generative Adversarial Network for Generating Synthetic Infrared Image from Visible Image

Utku ULUSOY^{1*} Koray YILMAZ¹ Gülay ÖZŞAHİN²

¹TÜBİTAK BİLGEM Advanced Technologies Research Institute (İLTAREN), Ankara, Turkey

²TÜBİTAK BİLGEM Information Technologies Institute (BTE), Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 18/10/2021
Revision: 14/12/2021
Accepted: 13/04/2022

Keywords

Generative Adversarial
Network
Pix2Pix
Machine Learning
Normalization
Infrared Image
Image to Image
Translation

Abstract

One of the most important discoveries in the field of deep learning in recent years is the Generative Adversarial Networks (GAN). It offers great convenience and flexibility for image-to-image conversion processes. This study aims to obtain thermal images from visible band colour images by using Pix2Pix Network, which is a Conditionally Generative Adversarial Network (cGAN). For this purpose, a data set has been prepared by taking facial images at different angles in the visible and infrared bands. By applying image processing methods on this created dataset, pixel-by-pixel matching process was performed. Synthetic thermal face images were obtained thanks to this learning network fed with facial images consisting of visible and long wavelength infrared image (LWIR) pairs. In the generator and discriminator deep networks of the Pix2Pix GAN, Batch Normalization and Instance Normalization methods are applied and their effects on the outputs are examined. The same process has also been tested on the Google Maps dataset and thus its effects on different datasets have been demonstrated. Similarity values between synthetic outputs and real images of both studies has been calculated with several image quality metrics. As a result of offered most suitable method, it creates some details more successfully such as reflections, saturations and artifacts etc. These details in the infrared band images cannot be noticed or predicted by a person. Thanks to this study, hopeful results were obtained to produce infrared synthetic image.

1. INTRODUCTION

Artificial intelligence was defined by John McCarthy as the science or engineering of making intelligence machines and especially intelligent computer programs [1]. Artificial intelligence has been affecting many areas of our lives with recent developments. With the new deep learning methods developed recently, big data can be processed and interpreted. Electronic hardwares or computers with high processing power are required to process big data using artificial intelligence techniques. Developments in graphics processing unit (GPUs) technologies have also accelerated the work in this field. Many tasks such as making sense of large-scale data, making inferences, learning and producing unique new data can be performed by artificial intelligence.

One of the most important deep network discoveries in recent years is Generative Adversarial Networks which were developed by Goodfellow et al. in 2014 [2]. Generative Adversarial Networks have two deep networks called generator and discriminator. It produces its outputs by taking advantage of the competition between these networks. A lot of progress has been made in this field after the development of the first version of the Generative Adversarial Networks capable of generating images in 2014. The Pix2Pix Network, which was developed as a type of Generative Adversarial Network, is one of them. Developed as a Conditionally Generative Adversarial Network type, the Pix2Pix network provides much superiority over traditional models in converting between images [3].

Synthetic image generation is the process of producing fake images similar to real data. Synthetic data is used in many areas to imitate data that is impossible to measure. Thanks to synthetic data, the datasets included in the research are enriched and great flexibility is gained to the researches.

This study shows how different parameters in the generator and discriminator code blocks affect the output of the GAN. A dataset has been created from the images taken with visible band and long wavelength infrared cameras. Pix2Pix network, which is a type of cGAN, is trained by making use different parameters of this dataset. Synthetic thermal images obtained from visible band images, not used in training, have been created by this deep learning network. Thanks to this study, the results of different normalization methods in the Pix2Pix network are shown.

Within this article, information about the materials and methods used in the study is presented in Section 2, the detailed description of the research and the experimental results and graphics of the research are shown in Section 3. Topics open to discussion in this context are included in Section 4. The main achievements of the study, the results and inferences that can guide future studies are given in Section 5.

2. MATERIALS AND METHODS

Performing operations on digital images by using the capabilities of computers is called digital image processing [4]. Image processing is used in many areas such as image classification, image features extraction, pattern recognition, image restoration, and image enhancement.

The term artificial intelligence is used to describe systems or machines that can perform human-specific tasks by imitating human intelligence [5]. It finds its place in many areas of our lives, and appears as artificial intelligence chat engines, suggestion systems, smart assistants etc. [6]. Machine learning can be defined as a subset of artificial intelligence. It produces new outputs with the algorithms that learn using training datasets. Deep learning is also a subset of machine learning. In deep learning, the system can be trained both supervised and unsupervised methods. One of the first deep learning network methods that can generate images is named as Generative Adversarial Networks.

In deep learning, our system is designed with multiple layers and it is a machine learning method that produces results with a dataset given to it. Pix2Pix, a type of GAN, was used in this study. Before the use of Pix2Pix Network, pixel-by-pixel mapping was made with digital image processing algorithms in the dataset created in order to realize the efficient operation of the network.

2.1. Generative Adversarial Networks

Since deep learning methods produce better results than classical image processing methods, their use in the field of digital image processing has become widespread. Thanks to the GAN developed by Goodfellow et al. in 2014, deep networks have become capable of producing images [2]. Generative Adversarial Networks have two different deep networks, unlike classical deep network models. These are called generators and discriminators. GAN is shown in Figure 1. The generator network tries to generate pictures similar to real pictures from randomly generated vectors (usually a noise is used for these vectors). The discriminator network takes these pictures as input values and tries to detect whether they are real or fake. The loss values are calculated with the contention between these two deep networks at the end of each epoch. Gradients are calculated with back-propagation to reduce these losses. Generator starts to better render real images from randomly generated vector with each update.

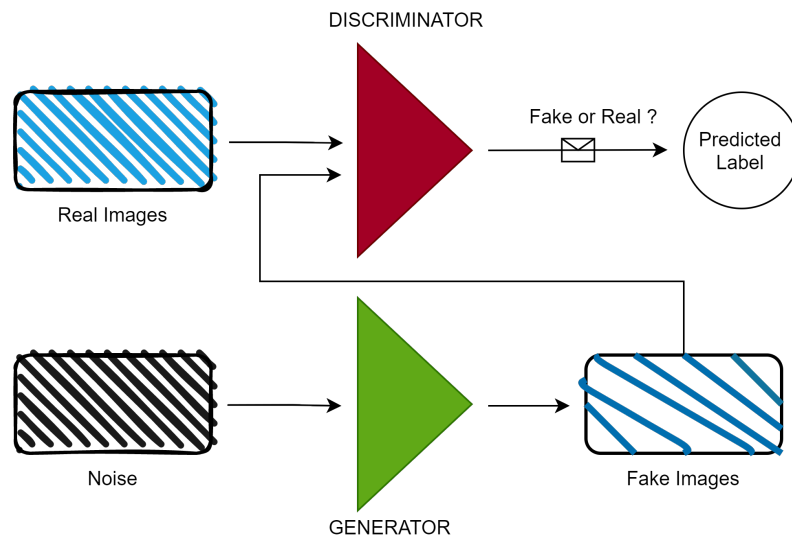


Figure 1. GAN model

Despite its popularity, the early work of the GAN had many limitations on the generator network [7]. In recent years, studies on GAN have increased and many GAN types have been created in order to produce deep networks that give better outputs by eliminating these deficiencies. Some of the best known of them are: cGAN, DCGAN, InfoGAN, DiscoGAN, VanillaGAN, Pix2Pix GAN etc. Pix2Pix GAN, which is one of the popular GAN types, was used in this study.

2.2. Pix2Pix GAN Network

Pix2Pix is a Conditional Generative Adversarial Network, developed to solve image-to-image conversion problems [3]. The study, carried out by P. Isola et al. in 2018, is not the first research in the field of Conditional GANs, but it differs from other studies in many ways. Pix2Pix uses a 'U-Net' based architecture in the generator deep network block. The difference between the Encoder-Decoder architecture and U-Net is shown in Figure 2. U-Net is an encoder-decoder architecture including skip connections. It uses skip connections to overcome the bottleneck limitation.

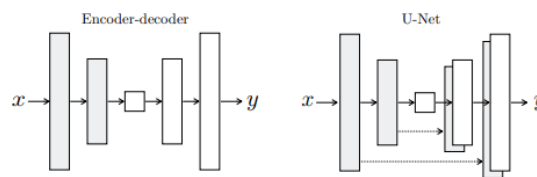


Figure 2. Encoder-decoder and U-Net network models [3]

In the discriminator deep network block, small image segments are evaluated using the convolutional 'PatchGAN' classifier. In addition, Pix2Pix, unlike cGAN, uses the L1 norm instead of the L2 norm in its objective function. L1 causes less turbidity. Generator and discriminator deep networks in the Pix2Pix network use convolution, BatchNorm and ReLU modules. The success value that is tried to be obtained in the Pix2Pix network is given in Equation 1.

$$G^* = \arg \min_G \max_D \mathcal{L}_{CGAN}(G, D) + \lambda \mathcal{L}_{L1}(G) \quad (1)$$

The objective of conditional GAN (G^*) is shown in the Equation 1, G tries to minimize this objective. Conversely, D tries to maximize it. Mixing the GAN objective with more traditional loss such as L2 distance is a beneficial approach. In the pix2pix network, they explore that using L1 distance rather than L2 generates less blurring outputs [3]. Importance of L1 loss can be changed with hyperparameter lambda λ .

In conventional GAN models, the output image y is obtained from the random noise vector z , $G: z \rightarrow y$. In conditional GAN models, the output image y is obtained from the observed image x and the random noise

vector as a condition, $G: \{x, z\} \rightarrow y$ [8]. The conditional GAN architecture is shown schematically in Figure 3. In the cGAN's generator network G , condition class label c and random noise vector z generate a data $G(z)$. Discriminator network D compares the observed image x , generated data from the generator and condition class label. Then it classifies as a "real" or "fake".

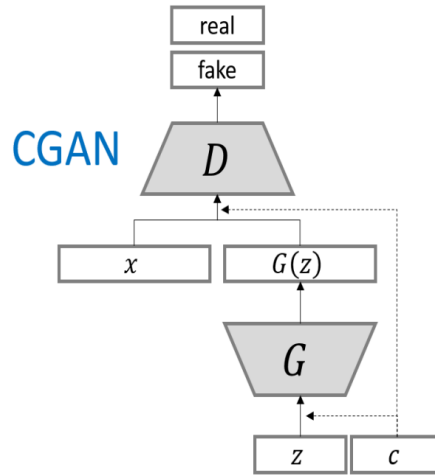


Figure 3. cGAN model [9]

In the Pix2Pix network, two images are given as input. The first one is used for fake image production in the generator and the other one is used for evaluating the fake image corresponding to this image in the discriminator. The pixels of these two images must match exactly. Unlike popular traditional GAN models, the Pix2Pix GAN is a supervised and unidirectional model [10]. For Pix2Pix, as in other GAN deep network architectures, the training parameters (learning coefficient, number of iterations, ReLu value, etc.) must be adjusted very precisely, otherwise the output images will be distorted. Examples of images produced with Pix2Pix GAN are given in Figure 4.

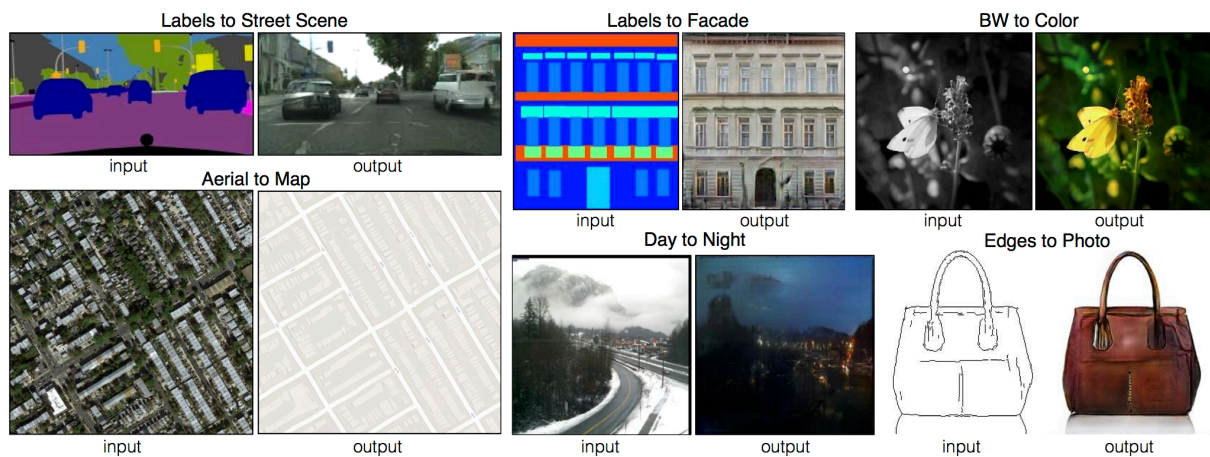


Figure 4. Example results on several image-to-image translation problems via Pix2Pix network [3]

3. EXPERIMENTAL RESULTS

This study aims to obtain long wavelength infrared (IR) synthetic images from visible band camera images. The research carried out for this purpose consists of 3 steps.

- 1- Setting up the Pix2Pix network
- 2- Creating the dataset
- 3- Creating infrared synthetic image and evaluating research results

The experimental results were concluded by performing the steps given above in order.

3.1. Setting up the Pix2Pix network

A working Pix2Pix network was built using the Python programming language. Pytorch was used as an artificial intelligence library. The work was carried out on the Visual Studio Code IDE. Before working on the network, Google Maps dataset was used to measure the operability of the network. The dataset consists of satellite images and Google Maps images. There are 1097 map image pairs for training and validation. An example from the dataset is shown in Figure 5.



Figure 5. Sample image from Google Maps' dataset

The operation of the Pix2Pix network was tested on this dataset and the operability of the network was tested by observing the results of the study. After this successful setting up, the step of creating a dataset was started.

3.2. Creating the dataset

In our study, a dataset consisting of visible band camera image and LWIR camera image pairs is needed to be used as input in our Pix2Pix network. For this purpose, it was decided to create a dataset consisting of human faces both because it is a heat source and in order to examine the performance in details. It is very difficult to establish pixel-by-pixel matching between color images and grayscale images [11]. Pixel-by-pixel mapping of these images to be used while feeding the Pix2Pix deep network is a very important issue. In order to ensure the realization of this match, the image acquisition conditions have been created to meet these conditions. Image processing methods were used in the Matlab environment in order to increase the matching in the received images from cameras. The experimental setup created to obtain LWIR and visible band images is as in Figure 6.

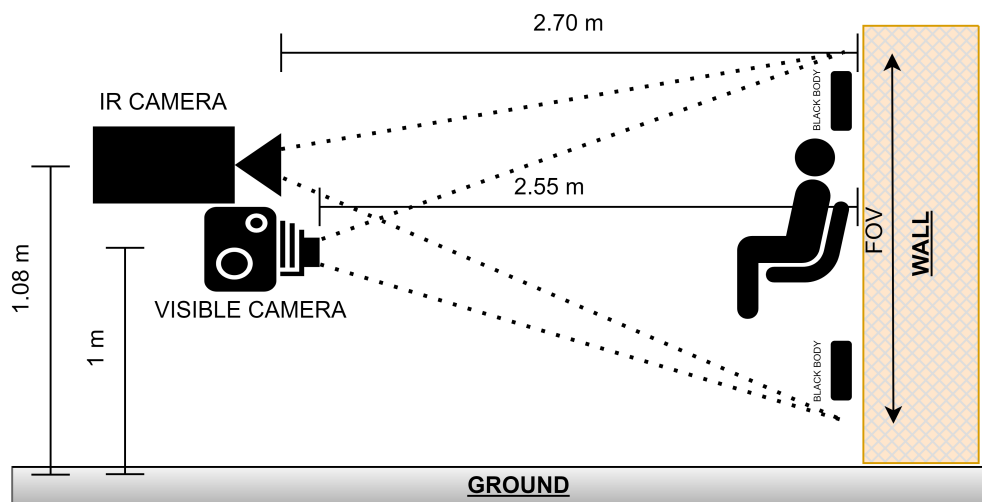


Figure 6. Cameras and scene locations scheme

In order to match with minimum error in LWIR camera images and visible band camera images, blackbodies (BB) at 40°C temperatures were used to determine the reference points in the Field of Views (FOVs) of both cameras. The upper right and lower left FOV references of the cameras are determined by these blackbodies. The lenses of the cameras are brought to the closest position to each other in the same direction and inclination as far as the physical conditions allow. The FOV of the cameras was created by paying attention to include the whole scene while ensuring that they overlap at the highest level.

Images of 23 men and women were taken to create the dataset. While taking these images, images were taken in VGA format using 7 different angles, with 640 x 480 dimensions. These angles are shown in Figure 7.

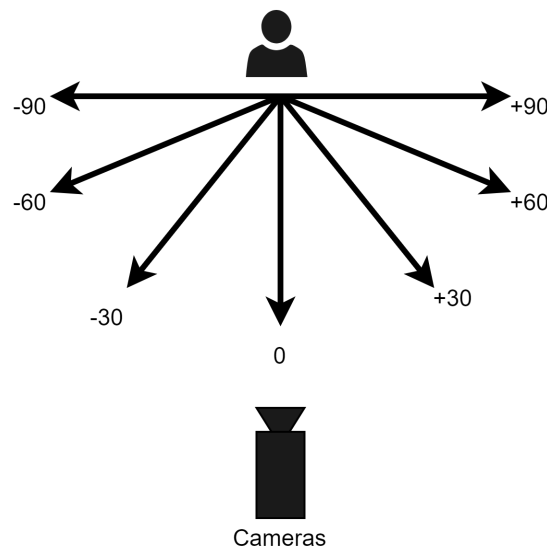


Figure 7. Photos shooting angles

In order to see the performance of the Pix2Pix GAN network in details, both glasses and non-glasses images of people with glasses were taken for each angle. Objects containing glass, such as glasses, are objects that have low transmittance level at infrared wavelengths. Such objects become more prominent in infrared images by creating contrast. Infrared image pairs with and without glasses are shown in Figure 8.



Figure 8. Glasses effect

Here, it is aimed to check whether the deep network makes such a detail separation during the image transformation. The acquired images were subjected to image processing methods such as scaling, shifting and rotation in the Matlab environment and consequently pixel-by-pixel matching was performed. Pixel matching was controlled with `imshowpair` methods in matlab. The matching errors caused by the experimental setup are minimized in this way. The images before and after the image matching performed in the Matlab environment are shown in Figure 9.a and Figure 9.b.



Figure 9. a) Acquired IR and visible images taken from cameras on top of each other using `imshowpair` method in matlab environment, b) superimposing images using pixel-by-pixel matching methods, c) display of mapped and cropped images for use in dataset with `imshowpair` method, d) representation of the visible and ir image pair to be used in the dataset

Infrared and visible band images were combined in Matlab after cutting at 470×470 so 250 infrared and visible image pairs were obtained in 940×470 dimensions (Figure 9.c). 43 of these pairs were randomly selected as a validation dataset. These images were used to fine-tune the network parameters during training. Moreover, 7 image pairs of a person who was not included in the training and validation dataset were selected as a test dataset. Images of a person were not included in the training data in order to show the result of the Pix2Pix network creating unmemorized infrared image of an individual. In addition, the results were examined by giving face images with and without glasses in the validation data. The remaining 200 image sets are labeled as training data. An example of this data set is also shown in Figure 9.d. This created dataset is given as an input to the Pix2Pix deep network.

If we want to test the discriminator's ability to generalize data it has never seen before, it is necessary to split our dataset into train and test and also increase the test datas. However, the aim of this study is slightly different. We did not choose this as we aimed to test the performance of the experiments. One of the reasons why we do not prefer it is that our dataset is limited. Relying on our experience, the train and validation

data were kept high and it was aimed to increase the training of the network. Test datas were used to examine performance on unknown images. In addition, different parameters (MSE, SNR etc.) are given below to measure this performance.

3.3. Creating infrared synthetic image and evaluating research results

The Pix2Pix deep network uses convolution, BatchNorm and ReLu modules in both the generator and the discriminator. When there is a change in the input distribution to our network, and hidden layers of network try to learn new distribution. These layers update their weights after each batch. This problematic change in the distribution is named as an Internal Covariate Shift. As a result of Internal Covariate Shift, undesirable results are obtained at the output. The main reason for this is the incompatibility of the data used as training and test data. Datasets with similar functional properties do not always take values in the same range. During the training, the input values of each layer change depending on the change in the previous layer. This causes both a lower learning rate to be used and a very fine tuning of the initial parameters. The decrease in learning rate also slows down training. In order to prevent this, the error rate is reduced by normalizing the input of each layer [12]. For this purpose, in the Pix2Pix network, Batch Normalization is applied in order to prevent these internal covariate shifts that occur while the weights are updated during the back propagation stage, and it is aimed to give the network more stable and better results. Optimization of the neural network has been increased by performing batch normalization. Thus, it provided much better results in DCGAN (Deep Convolutional GAN) [13-14].

In 2016, a study was carried out by Ulyanov et al. to obtain repetitive patterns (texture) and stylized images. In this study, it was seen that adding Batch Normalization after each convolution layer and concatenation layer gave significant better results [15]. It has been observed that applying normalization before each layer causes oscillation and unstable conditions on the results [13]. In 2017, D.Ulyanov et al. discovered that small changes they made on the fast stylization method they had performed before gave much better results [16]. As a result of mentioned study, the Instance Normalization method, also known as Contrast Normalization, has emerged, which gives much better results than Batch Normalization in image production. In Contrast Normalization, unlike Batch Normalization, each image is normalized separately.

In this study, while trying to obtain infrared images from visible band images, we aimed to determine which normalization pair is the best used in generator and discriminator deep networks. We created four different weight normalization usage tables in our experiments on our own dataset [Table 1].

Table 1. Experiments Control Table

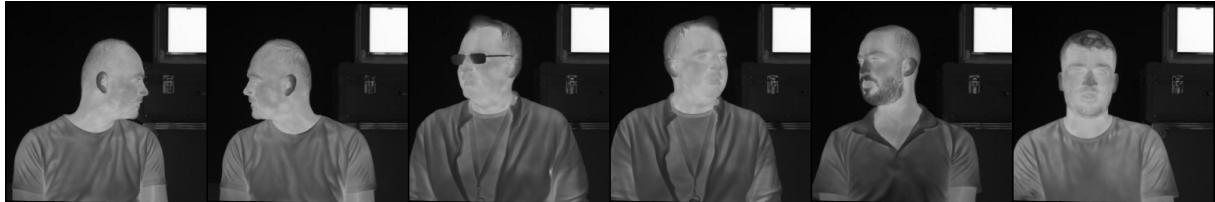
<i>Experiment Name</i>	<i>Discriminator</i>	<i>Generator</i>
<i>Experiment 1</i>	<i>Instance Normalization</i>	<i>Batch Normalization</i>
<i>Experiment 2</i>	<i>Instance Normalization</i>	<i>Instance Normalization</i>
<i>Experiment 3</i>	<i>Batch Normalization</i>	<i>Batch Normalization</i>
<i>Experiment 4</i>	<i>Batch Normalization</i>	<i>Instance Normalization</i>

Sample results of four different experiments performed are given in Figure 10. As can be seen from the images, it is very difficult to distinguish the similarities between synthetic infrared images and real images.

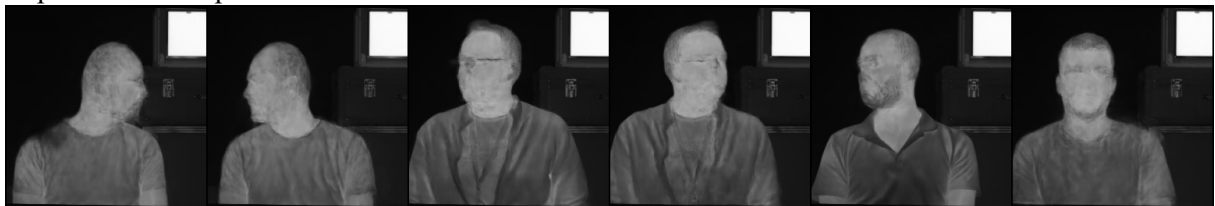
Input Images:



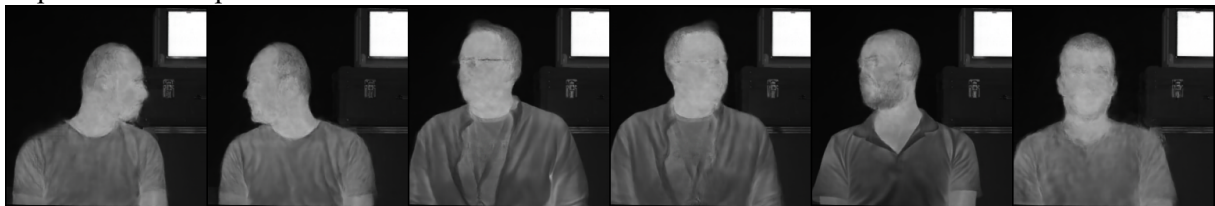
Ground Truth:



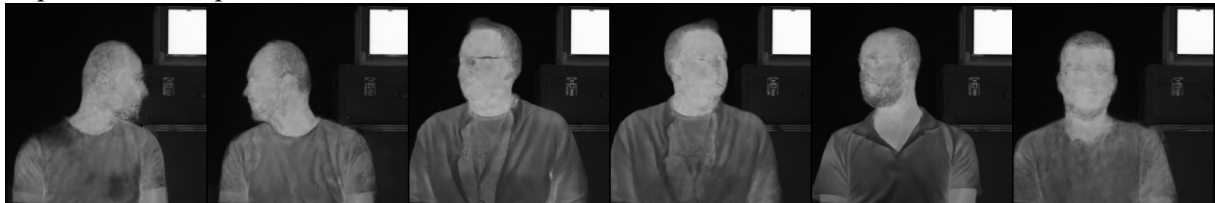
Experiment 1 Outputs:



Experiment 2 Outputs:



Experiment 3 Outputs:



Experiment 4 Outputs:

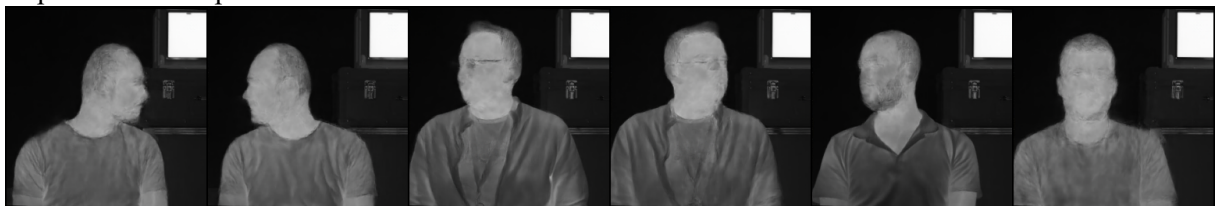


Figure 10. Sample of input images, ground truth and experiments outputs

For this reason, Mean Square Error (MSE), Structural Similarity Index Measure (SSIM), Signal to Noise Ratio (SNR) and Peak Signal to Noise Ratio (PSNR) parameters between real images and synthetic images created to evaluate the best result among experiments were calculated. The results of these are shown in the chart below [Figure 11].

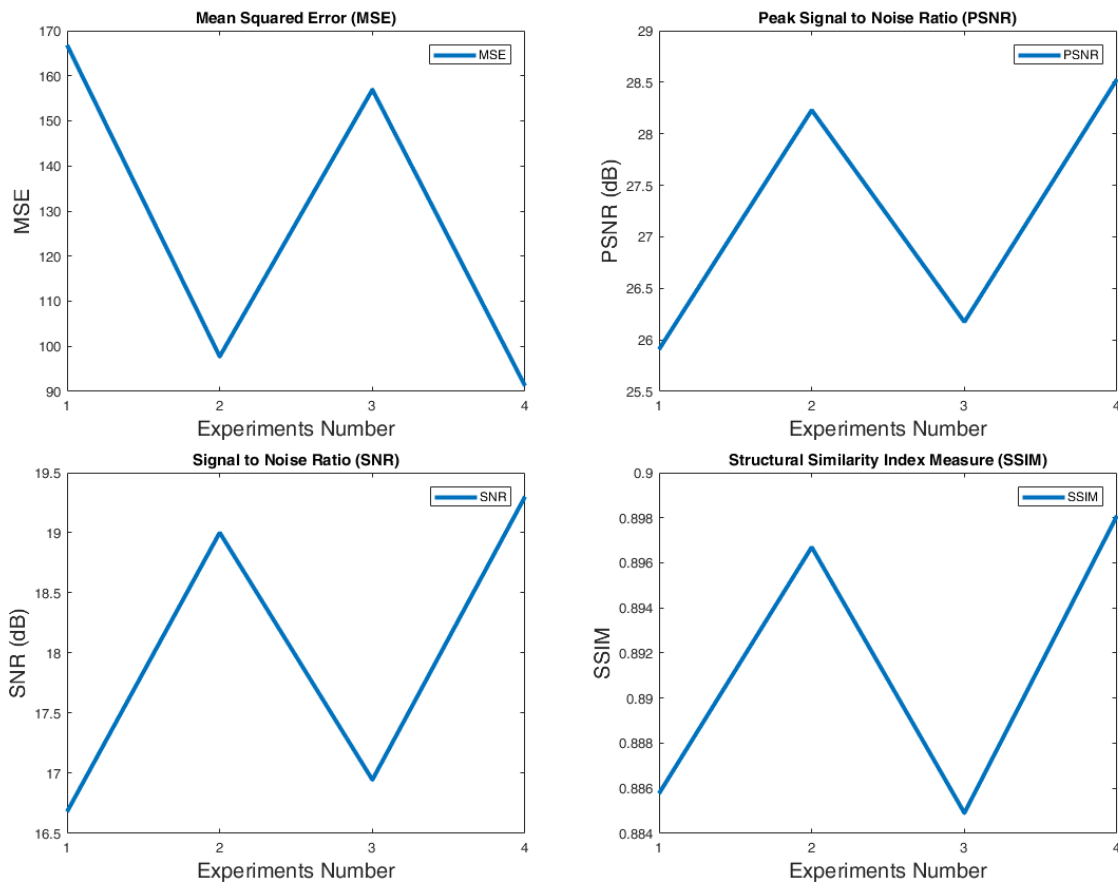


Figure 11. Own dataset experiments result

Four different synthetic infrared images were obtained in four different experiments. The obtained output results were compared with the real infrared accuracy images (ground truth images). When the results are compared, it is seen that the best results are obtained when Batch Normalization is used on the discriminator and Instance Normalization is used on the generator as in Experiment 4 [Figure 12]. The second best results are Experiment 2 results. According to Experiment 2, the use of Contrast Normalization in generator and discriminator produces better results.



Figure 12. Best experiment result with never trained face image (left to right: visible real image, infrared image and fake infrared image)

We would like to point out that our study is not valid for all datasets. For this purpose, the same experiment was used to obtain a google map from the satellite image on Google Maps dataset. SNR, PSNR, SSIM and MSE values of the output results were calculated according to the actual data and are shown in Figure 13.

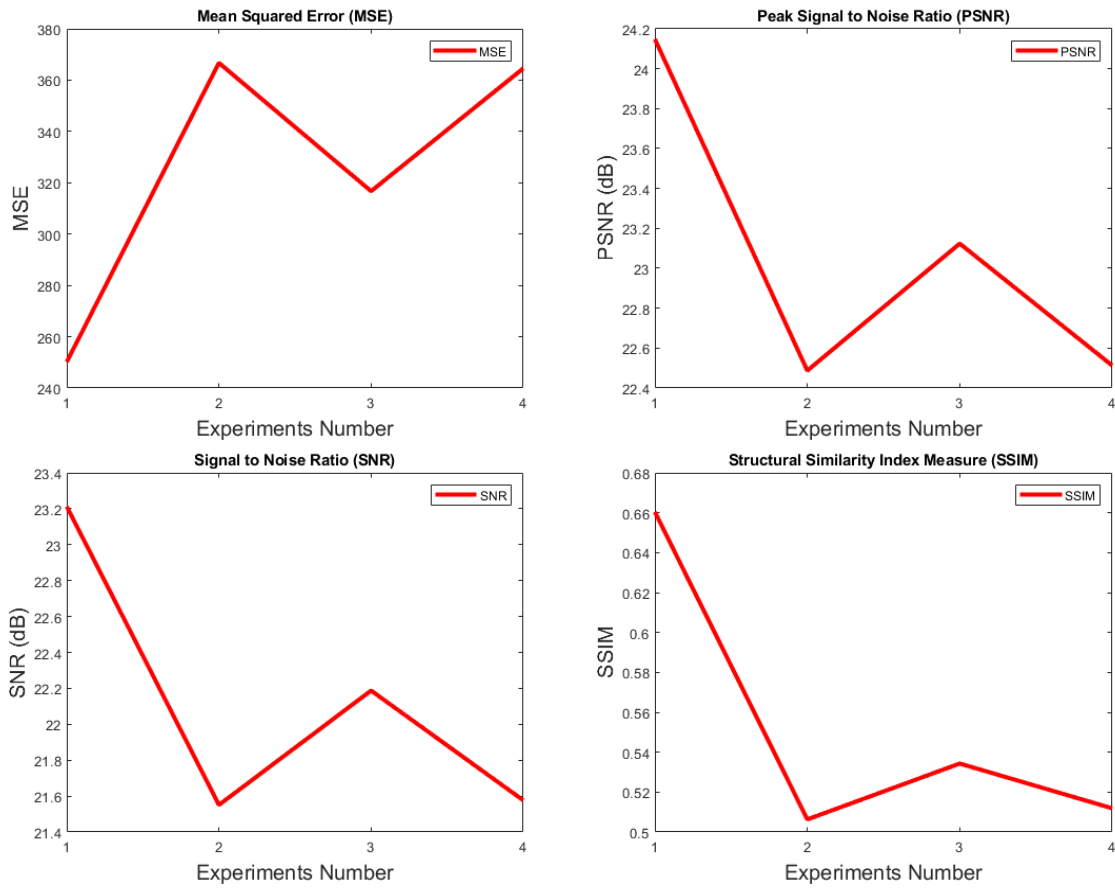


Figure 13. Google maps dataset experiments result

In this study carried out on the Google Maps dataset, it was observed that using Instance Normalization on the discriminator and Batch Normalization on the generator, which are the conditions of Experiment 1, gave much better results than other methods. The worst performance was obtained under Experiment 4 conditions. Figure 14 shows the correct and incorrect results obtained from the discriminator network under the conditions of Experiment 4.

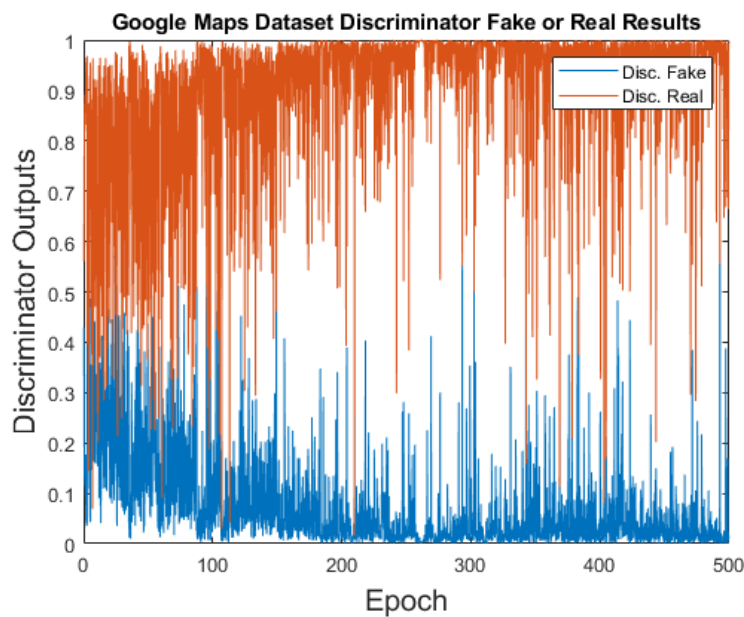


Figure 14. Google Maps dataset discriminator fake or real loss results for Experiment 4

In this model, which was trained using RGB 3-channel images, it was observed that the learning process became stable after approximately 200 epochs. The discriminator network has been quite successful in separating the generator's outputs from the real.

As shown in Figure 15, the discriminator outputs of Experiment 4 applied on own dataset, which we determined as the most successful model in generating infrared images from visible band images, are given.

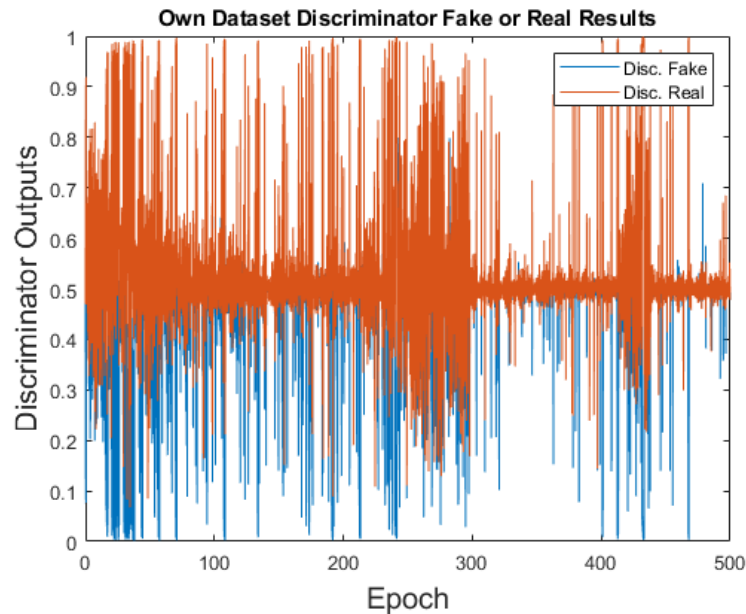


Figure 15. Own dataset discriminator fake or real loss results for Experiment 4

The results of the model trained for 500 epochs are as in the Figure 15. It is seen that the deep network has difficulty in making the necessary discrimination due to the fact that the same data is repeated in all 3 channels of the infrared image. In the production of infrared synthetic data, performance of the generator deep network has also increased. It has been observed that as the number of epochs is increased; the steady state increases and the loss values decrease, creating better results for the generator.

4. DISCUSSION

It is predicted that more successful results can be obtained with more sampling of the dataset created from the visible band and infrared images used in the research. In the study carried out, images of people with and without glasses were used and it was observed that the Pix2Pix network could not fully distinguish these details in people. The pre-trained Pix2Pix network fed with glasses-free input data started to create thermal human figures with glasses [Figure 10]. There is a possibility that the Patch Network used on the discriminator in Pix2Pix networks may cause this. The possibility that the number of training data in the network may prevent making this separation should also be considered. Since the samples taken at 30° and 60° angles do not match at the contrast change points where the frequency is high depending on the camera positions, additional studies are needed to make the infrared images created at these angles more successful. In the studies carried out on Google Maps dataset and own dataset, it has seen that the most successful results were in the different experiments. Input images of Google Maps dataset were RGB and outputs of network were also RGB images. On the other hand, input images of own dataset were RGB and outputs of network were Grayscale images. For these reason, the synthetic images produced have different properties. As a result, the effects of normalization methods on these produced images differ.

5. CONCLUSION AND FUTURE WORKS

With the help of this study, a Pix2Pix deep network was created that obtains infrared synthetic images from the images of the visible band camera. Different normalization methods were tried on the Pix2Pix network and their effects on the network were examined. The most suitable method is proposed for infrared image conversion from visible band images. In addition, the effects of changes such as batch size, color toning

and horizontal rotation on the deep network output should not be ignored. Infrared cameras are costly radiometric devices. Obtaining infrared images in researches in this field can be challenging. Thanks to this study, synthetic infrared image generation was performed and an improvement in this field was proposed. It is also possible to convert to the temperature and radiance values in the desired calibration range from the obtained synthetic images. With the help of the trained datasets, conversions can be performed between infrared images in different band gaps (Longwave IR, Midwave IR, Shortwave IR etc.). Thus, reflections, saturations and artifacts that a person cannot notice or predict with the naked eye can be created by artificial intelligence. As it is known, Pix2Pix is a unidirectional architecture. In future studies, it is planned to increase the dataset and present improvements and different methods in the formation of visible band facial images from infrared images [Figure 16].



Figure 16. Infrared image to visible image conversion

It is considered that an improvement study to be carried out in this area may be beneficial in terms of extracting real face image features from the data obtained from infrared cameras in security, intelligence and military fields.

ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank TÜBİTAK BİLGEM İLTAREN and Turkish Land Forces. This work is partially carried out at their laboratories and equipments. We are also grateful to Dr. Demet Sevil ARMAĞAN ŞAHINKAYA, İlhami BEKTAŞ, Emrah ODUNCU and Umut KAYIKÇI for their support, without whom this study could not be accomplished.

REFERENCES

- [1] McCarthy J., What is Artificial Intelligence?, Stanford University, Available at: <http://www-formal.stanford.edu/jmc/whatisai.pdf>, (Accessed: 2021-10-05), 2.
- [2] Goodfellow I. J., Pouget-Abadie J., Mirza M., Xu B., Warde-Farley D., Ozair S., Courville A. C., and Bengio Y., Generative Adversarial Nets, In Proceedings of NIPS, (2014) 2672–2680.
- [3] Isola P., Zhu J., Zhou T., Efros A., Image-to-Image Translation with Conditional Adversarial Networks, 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), (2017).
- [4] Balcı O., Terzi Ş. B., Balaban Ö., Map Generation & Manipulation With Generative Adversarial Network, Journal of Computational Design, 1 (3), (2020) 95-114.
- [5] Demirhan A., Kılıç Y. A., Güler İ., Artificial Intelligence Applications in Medicine, Yoğun Bakım Dergisi 9(1):31-41, (2010).
- [6] ELMAS Ç., Yapay zeka uygulamaları, Ankara: Seçkin Yayıncılık 2018, pp.479.
- [7] Turhan C. G., Bilge H. S., Variational Autoencoded Compositional Pattern Generative Adversarial Network for Handwritten.

- [8] M. Mirza, S. Osindero, Conditional Generative Adversarial nets., arXiv preprint arXiv:1411.1784, (2014).
- [9] A. Mino, G. Spanakis, LoGAN: Generating Logos with a Generative Adversarial Neural Network Conditioned on color, 17th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications, (2018) 966.
- [10] Altun S., Talu M.F., Review of Generative Adversarial Networks for Image-to-Image Translation and Image Synthesis, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, Ejosat Özel Sayı 2021 (HORA), (2021) 53-60.
- [11] Liu M., Breuel T., Kautz J., Unsupervised Image-to-Image Translation Networks, arXiv preprint arXiv:1703.00848, (2017).
- [12] Ioffe S., Szegedy C., Batch Normalization: Accelerating Deep Network Training by Reducing Internal Covariate Shift, ICML'15: Proceedings of the 32nd International Conference on International Conference on Machine Learning, Volume 37 (2015) 448–456.
- [13] Radford A., Metz L., Chintala S., Unsupervised Representation Learning with Deep Convolutional Generative Adversarial Networks, arXiv:1511.06434, (2015).
- [14] Salimans T., Goodfellow I., Zaremba W., Cheung V., Radford A., Chen X., Improved Techniques for Training GANs, arXiv:1606.03498, (2016).
- [15] Ulyanov D., Lebedev V., Vedaldi A., Lempitsky V., Texture Networks: Feed-forward Synthesis of Textures and Stylized Images, ICML'16: Proceedings of the 33rd International Conference on International Conference on Machine Learning, Volume 48 (2016) 1349–1357.
- [16] Ulyanov D., Vedaldi A., Lempitsky V., Instance Normalization: The Missing Ingredient for Fast Stylization, arXiv preprint arXiv:1607.08022, (2016).



Investigation of Mechanical Behavior of Pre-Heat Treated Wooden Beams in Different Climate Conditions

Mehmet GÜNEŞ^{1,*} Mustafa ALTUNOK²

¹Cankiri Karatekin University, Technical and Business College, Department of Design, 18100, Merkez/CANKIRI

²Gazi University, Faculty of Technology, Department of Wood Product Industry Engineering, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article
Received: 29.11.2021
Revision: 12.01.2022
Accepted: 18.04.2022

Highlights

- Wooden Beams.
- Heat Treatment.
- Climate Conditions.
- Mechanical Behavior

Keywords

Pre-Heat Treatment
Wood Modification
Oak Tannin
Modulus of Elasticity
Bending Strength

The degrading effect of the pre-heat treatment at low temperature with tannin modification was investigated. The applied pre-heat treatment takes place in 3 stages: drying at high temperature, actual heat treatment and cooling.

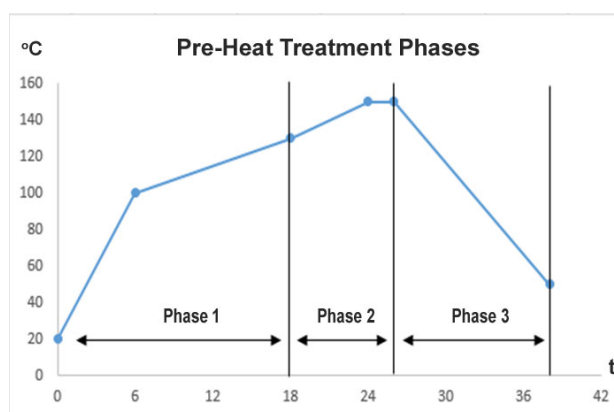


Figure A. Pre-heat treatment temperature-time graph

Purpose: In this study, the behavior of tannin-modified and pre-heat treated wooden beams in different climatic conditions were determined.

Theory and Methods: Samples prepared according to TS EN 386 standards from Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), oak (*Quercus petraea* L.) and chestnut (*Castanea sativa* Mill.) woods were impregnated with acorn tannin and pre-heated for 2 hours at 150°C and 160°C. After the samples were conditioned at 20°C temperature and 65% RH, 40°C temperature and 35% RH, 10°C temperature and 50% RH, bending strength tests according to TS 2474 and modulus of elasticity in bending according to TS 2478 were applied.

Results: As a result; At the level of wood species-process type interaction, the highest increase in bending strength was determined as 7.6% in tannin modified scotch pine samples at 150°C compared to the control samples. Decreases in bending strength and modulus of elasticity were determined from the mechanical properties of other wood species.

Conclusion: Accordingly, it can be suggested to use Scotch pine wood in the manufacture of lightly loaded wooden house columns and beams and other building elements.



Investigation of Mechanical Behavior of Pre-Heat Treated Wooden Beams in Different Climate Conditions

Mehmet GÜNEŞ^{1,*} Mustafa ALTUNOK²

¹Çankırı Karatekin Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Tasarım Bölümü, 18100, Merkez/ÇANKIRI

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Ağaçlıçleri Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Abstract

In this study, the behavior of tannin-modified and pre-heat treated wooden beams in different climatic conditions were determined. For this purpose; Samples prepared according to TS EN 386 standards from Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), oak (*Quercus petraea* L.) and chestnut (*Castanea sativa* Mill.) woods were impregnated with acorn tannin and pre-heated for 2 hours at 150°C and 160°C. After the samples were conditioned at 20°C temperature and 65% RH, 40°C temperature and 35% RH, 10°C temperature and 50% RH, bending strength tests according to TS 2474 and modulus of elasticity in bending according to TS 2478 were applied. As a result; At the level of wood species-process type interaction, the highest increase in bending strength was determined as 7.6% in tannin modified scotch pine samples at 150°C compared to the control samples. Accordingly, it can be suggested to use Scotch pine wood in the manufacture of lightly loaded wooden house columns and beams and other building elements.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 29.11.2021
Düzelme: 12.01.2022
Kabul: 18.04.2022

Keywords

Pre-Heat Treatment
Wood Modification
Oak Tannin
Modulus of Elasticity
Bending Strength

Anahtar Kelimeler

Ön Isıl İşlem
Ağaç Modifikasyonu
Meşe Taneni
Elastikiyet Modülü
Eğilme Direnci

Ön Isıl İşlem Uygulanmış Ahşap Kirişlerin Farklı İklim Şartlarındaki Mekanik Davranışlarının İncelenmesi

Öz

Bu çalışmada, tanen ile modifiye edilip ön ısıtma işlemi uygulanmış ahşap taşıyıcı kirişlerin farklı iklim koşullarındaki davranışları belirlenmiştir. Bu maksatla; Sarıçam (*Pinus sylvestris* L.), meşe (*Quercus petraea* L.) ve kestane (*Castanea sativa* Mill.) odunlarından TS EN 386 standartlarına göre hazırlanan örnekler meşe palamodu taneni ile emprenye edilmiş, 150°C ve 160°C'de 2 saat süre ile ön ısıtma işlemi uygulanmıştır. Örnekler sırasıyla 20°C sıcaklık ve %65 bağıl nem, 40°C sıcaklık ve %35 bağıl nem, 10°C sıcaklık ve %50 bağıl nemde kondüsyonlandıktan sonra TS 2474'e göre eğilme direnci, TS 2478'e göre eğilmede elastikiyet modülü testleri uygulanmıştır. Sonuç olarak; ağaç türü-işlem çeşidi etkileşimi düzeyinde kontrol örneklerine göre en yüksek eğilme direnci artışı 150°C'de tanen ile modifiye edilmiş sarıçam örneklerinde %7.6 tespit edilmiştir. Buna göre, hafif yüklü ahşap ev kolon ve kirişleri ile diğer yapı elemanlarının imalatında sarıçam odununun kullanılması önerilebilir.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ağaç malzeme eski çağlardan bu yana insanların yaşamsal faaliyetlerini sürdürebilmeleri için kullandıkları doğal kaynaklardan bir tanesidir. İnsanlar ağaçlardan barınma ihtiyaçlarını karşılamak için ahşap evler imal ederek dış etkilerden kendilerini izole etmişlerdir. Ahşap kullanılarak yapılan evlerde zamanla böcekler, mantarlar, iklim şartları ile güneşin zararlı ışınları bir araya gelerek ahşabı bozunmaya uğratarak fiziksel ve mekanik dayanımlarını azaltmıştır.

Ağaç tarih boyunca insanlığın vazgeçilmez hammadde kaynağı olmuş; günümüzde de orman varlığının giderek azalması ve daha uzun zaman kullanımı ile daha etkin işlenmesini zorunlu hale getirmiştir [1]. Ağaç malzemenin yapılarda taşıyıcı olarak uygulanması 18. yy bitiminde başlamış ve mimari anlayışa özgürlük

kazandırmıştır. Ayrıca yeni teknik ve yeni tutkallarla ahşap malzeme birlikte kullanılarak “tutkallı lamine konstrüksiyonlar” gibi farklı ürünler elde edilmiştir [2].

Dış ortam şartlarında böcekler, mantarlar ve güneşten gelen UV ışınları gibi faktörler altında bulunan ağaç malzemeyi bu etkenlerden korumak, fiziksel ve mekanik dayanımını iyileştirmek önemlidir. Sıralanan bu etkilere karşı ağacı muhafaza etmek için günümüzde yaygın olarak kullanılan işlemlerden biriside emprenyedir [3]. Gelişen teknoloji ile ahşabı bu tür etkilerden korumak için emprenye tekniği kullanılarak bu tür bozunmaların önüne geçilmiştir. Günümüzde, ağacın çevreye duyarlı ve zararsız yöntemlerle modifiye edilmesiyle ilgili uygulamalar artmaya başlamış ve ısıl işlemlerde bu alanda uygulama yöntemlerinden biri olmuştur [4].

Ağaç işleri endüstrisinde “ThermoWood” adıyla bilinen ısıl işlemin uygulanışı diğer ülkelerde farklı isim ve yöntemle gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemler sıralanacak olursa, Finlandiya (ThermoWood) yöntemi ağaç malzemenin ısıtılmasında sıcak buharın kullanılmasını prensip alır. Plato yönteminin uygulanması Hollanda da sıcak havanın ve buharın beraber kullanıldığı, Fransa’da (Rectification) asal gaz kullanıldığı Almanya da ise (Oil Heat Treatment) sıcak yağ kullanılan yöntemdir [5]. Isıl işlem ile muamele gören ağaç malzeme dış ortam şartlarında bahçe mobilyası, cephe kaplaması, pencere, kapı, lambri, yer döşemesi, sauna, banyo gibi alanlarda kullanılabildiği gibi iç mekânda da kullanım alanı giderek genişlemektedir [6]. Isıl işlemin ağaç malzemenin higroskopisitesini azaltıp boyutsal stabilizasyonunu arttırarak malzemenin fiziksel özelliklerini iyileştirdiği anlaşılmıştır [7]. Fakat ısıl işlem uygulanan ağaç malzemede kütle kayıplarına bakıldığında işlem sıcaklığı ve uygulama süresinin artmasıyla kayıplarında arttığı görülmüştür [8].

150°C üstündeki ısıl işlem sıcaklıklarında boyutsal stabilizasyon ile biyolojik dayanım iyileşmekte, sıcaklığın artması ile mekanik özelliklerde düşüşler meydana gelip malzemenin kimyasal özellikleri değişmektedir. Olumsuz olarak görülen bu durum, ısıl işlem görmüş odunun bazı kullanım yerlerini sınırlandırmaktadır [9]. Thermowood yöntemi Termo-S ve Termo-D olarak bilinen 190°C ve 212°C sıcaklıklarda yapılmaktadır [10]. Bu sıcaklıklardan daha düşük derecelerde ısıl işlem yöntemi uygulanmakta fakat belirtilen sıcaklıklardaki istenilen mekanik ve fiziksel özellik değerlerine ulaşılması zorlaşmaktadır. Bu çalışmada ısıl işlem sıcaklıkları literatürdeki Thermowood değerlerinden daha düşük sıcaklıklarda yapıldığından ön ısıl işlem olarak adlandırılmıştır.

Düşük sıcaklıklarda modifiye edilen ağaç malzemenin mekanik özelliklerindeki kayıpların daha az olduğu tespit edilmiştir. 130°C, 165°C ve 200°C’de 2, 6, 10 saat ısıl işleme maruz bırakılan örneklerde mekanik özelliklerdeki en az düşüş 130°C sıcaklık 2 saat muamele edilmiş örneklerde bulunmuş ve ısıl işlemin zamanı arttıkça mekanik direncinde azaldığı tespit edilmiştir [11].

Kauçuk ağacına (*Hevea brasiliensis*) 140°C, 150°C, 160°C’de ve 1, 2 ve 3 saat süre ile sıcak buhar yöntemiyle ısıl işleme tabi tutulduktan sonra adsorpsiyon kabiliyeti ve mekanik özellikleri araştırılmış. Basınç direnci değerleri 140°C ve 3 saat süre ile işlem gören örneklerde daha yüksek çıkmıştır. Tüm sıcaklıklarda denge rutubet içeriğinin azaldığı görülmüştür [12]. Eğilme direnci, ısıl işlem başarısının en önemli belirleyicisi olarak ifade edildiği çalışmada kavak ağacından (*Populus alba* L.) hazırlanan örnekler 120, 150, 180 ve 210°C’lerde 2 ve 4 saat süreyle ısıl işleme tabi tutulmuştur. Odunun şişme ve büzülme özelliklerinde iyileşmeler olmuş ancak eğilme direnci ve elastikiyet modülünde azalmalar meydana gelmiştir. Mekanik özelliklerde en iyi ısıl işlem sonuçları 120°C’de 2 saat süreyle düşük sıcaklıklarda elde edilmiştir. Genel olarak, 150°C veya 4 saatin üzerinde ısıl işlem uygulamaları mekanik özelliklerde düşüşe neden olması sebebiyle önerilmemiştir [13].

Meşe palamodu taneni ile emprenye edilen doğu kayını (*Fagus orientalis* L.) 20 x 20 x 30 mm liflere paralel basınç direnci ve 20 x 20 x 150 mm ölçülerinde eğilme direnci örnekleri 150°C, 170°C, 190°C ve 210°C’de 2 saat ısıl işleme tabi tutulmuştur. Eğilme direnci ve liflere paralel basınç direnci düşük sıcaklıklarda bir miktar yükselirken, yüksek sıcaklıklarda belirtilen dirençler düşmüştür [14]. Tanenli bileşiklerin karışımı ile emprenye edilen sarıçam odununa 190°C’de 4 saat ısıl işlem uygulandıktan sonra belirli periyotlarda dış ortam şartlarında bekletilmiştir. Tanen ile muamele edilen odun örneklerinin çürümeye neden olan organizmalara karşı etkili sonuçlar gösterdiği tespit edilmiştir [15].

Isıl işlemin sert lif levhaların mekanik özelliklerine etkisini araştırmak için levhalara 140°C ve 180°C’de farklı sürelerde ısıl işlem uygulanmıştır. Sıcaklığın artmasıyla beraber mekanik özellik değerlerinde düşüş olduğu belirlenmiştir [16].

Beyaz meşe (*Quercus alba* L.) odunundan 20°C sıcaklık ve %65 bağıl nem ortam şartında elde edilen deney örneklerine 160°C, 180°C ve 200°C sıcaklıklarda 3, 6 ve 9 saat boyunca ısı işlem termal modifikasyon yapılmıştır. MOR değerleri sıcaklık değerleri arttıkça azalmaya başladığı görülmüştür. Kontrol örneklerinde MOR değeri 203,85 MPa iken en az düşüş 160°C de 3 saat işlem gören örneklerde 202,36 MPa, en fazla düşüş 200°C de 9 saat işlem gören örneklerde 169,28 MPa olarak bulunmuştur [17].

Kestane odunundan oluşturulan kaplamalar Polivinil Asetat esaslı PVAc-D4 tutkalı ile yapıştırılarak lamine edilmiştir. Tanenli ve tanensiz örnekler etüvde 103°C ±2 sıcaklık ve %65±5 bağıl neme (%12 denge rutubetine) getirildikten sonra 180°C ve 2 saat ısı işlem uygulanmıştır. Eğilme direnci en yüksek tanen-ısı işlemli örneklerde, en düşük değer ise tanensiz-ısı işlemli örneklerde elde edilmiştir. Basınç direnci kontrol numunelerinde 51,2 N/mm², tanen-işlemsiz örneklerde en yüksek 58,22 N/mm² ve tanen-işlemli örneklerde 55,12 N/mm² bulunmuştur [18].

Bu çalışmada, meşe palamudu taneni çözültüsü ile emprenye edildikten sonra ön ısı işlem uygulanmış ahşap taşıyıcı (kiriş) yapı elemanlarının, bazı mekanik özellikleri üzerine farklı iklim koşullarının etkisi araştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOTLAR (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Ağaç Malzeme (Wood Material)

Bu çalışmada, yapısal uygulamalardaki yaygın kullanımlarından dolayı sarıçam (*Pinus sylvestris* L.), meşe (*Quercus petraea* L.) ve kestane (*Castanea sativa* Mill.) odunları kullanılmıştır. Hava kuru rutubete sahip (yaklaşık %12) keresteler Ankara-Siteler semtinden rasgele seçim yöntemi ile temin edilmiştir. Kerestelerin düzgün lifli, ardaksız, budaksız ve diri odundan olmasına özen gösterilmiştir.

2.2. Tanen Çözültüsü (Tannin Solution)

Meşe palamudu taneni, orman bölgelerinde fazlaca bulunan meşe ağacının bir meyvesi olan palamuttan ekstraksiyon yöntemi ile elde edilen, çevreci ve doğal bir malzemedir. Tanen Türkiye’de ve dünyada en yaygın olarak dericilik sektöründe kullanılmaktadır. Deneylerde kullanılan meşe palamudu taneni imalatçı firmadan toz halinde tedarik edilmiştir. Çözelti haline getirmek için 80°C ye kadar ısıtılan saf su içerisinde %10 oranında daldırma kabında çözüldürülerek hazırlanmıştır.

2.3. Deney Örneklerinin Hazırlanması (Preparation of Experimental Samples)

Deneylerde kullanılacak örnekler rastgele seçilen 1. sınıf ağaçlardan, çatlaksız, budaksız, ardaksız, düzgün lifli, yoğunluk ve renk farkı olmayan şekilde diri odun kısımlarından TS 2470 ve TS 53 standartlarına göre hazırlanmıştır [19, 20]. Deney örneklerinin boyutları 1/5 ölçekli olarak küçültülmüş ve 32 x 64 x 880 mm ölçülerinde hazırlanmıştır.

2.3.1. Hava kuru yoğunluk (Air Dry Density)

Hava kuru yoğunluk tayini TS 2472 standartlarında 20x20x30 mm ebatlarında örnekler hazırlanmıştır, örnekler 20±2°C sıcaklık ve % 65±5 bağıl nem iklim koşullarında değişmez ağırlığa gelene kadar bekletilmiştir. Örnek ağırlıkları 0,01g hassasiyetteki terazide tartılıp 0,01mm duyarlılıkta dijital kumpas ile boyutları ölçülmüştür. Yoğunluklarının hesaplanması için eşitlik 1 kullanılmıştır.

$$\delta_{12} = \frac{M_{12}}{V_{12}} g/cm^3 \quad (1)$$

M₁₂: Hava kuru ağırlık (g), V₁₂: Hava kuru hacim (cm³).

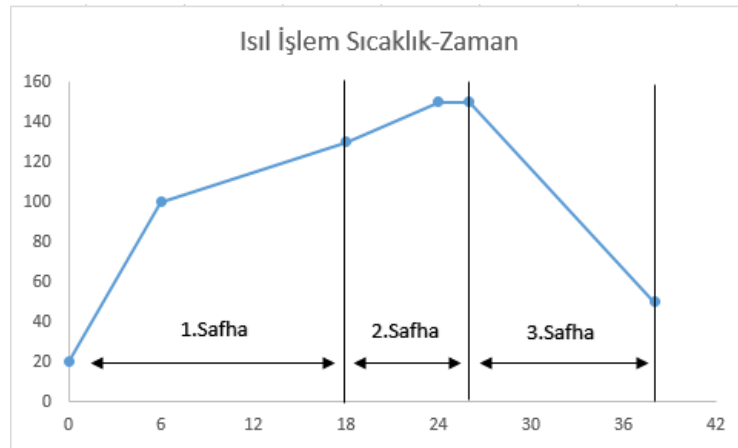
2.3.2. Emprenye (Impregnation)

Örnekler %10 doğal tanen çözültüsü içerisine tamamı çözelti içinde kalacak şekilde daldırılarak 24 saat bekletilmiştir. Bekletme sonrası daldırma kabından çıkarılan örnekler üzerindeki çözelti kalıntılarını

temizlenerek ısı işlem uygulamak için hazır hale getirilmiştir. Emprenye sonrası örnekler hava sirkülasyonu sağlanan bir ortamda hava kurusu hale gelinceye kadar bekletilmiştir. Ağırlıkları 0,001g hassasiyette dijital terazide tartılarak retensiyon (tutunma) miktarları ve oranları belirlenmiştir.

2.3.3. Isıl İşlem (Heat Treatment)

Isıl işlemin ilk aşaması yüksek sıcaklıkta kurutmadır. Isıl işlem uygulanmadan önce ağaç malzeme içerisinde bulunan rutubetin ısı işleme bir etkisi olmadığından ısı işlem öncesi herhangi bir kondüsyonlama işlemi yapılmamıştır. Isıl işlem yeni kesilmiş ağaca ya da herhangi kuruluktaki bir ağaca uygulanabilir. Isıl işlem sürecinde en çok zaman alan safha kurutma sürecidir. Şekil 1’de görüldüğü gibi fırın içerisine 3 Atm basınçta kızgın buhar gönderilerek sıcaklık 6 saatte 100°C ye çıkarılmış, daha sonra sıcaklık 12 saatte 130°C ye çıkarılarak yüksek sıcaklıkta kurutma yapılmıştır. Bu sayede ahşabın barındırdığı rutubet %0 a kadar düşürülmüştür. Yüksek sıcaklıkta kurutma (1.safha) tamamlandıktan sonra fırın sıcaklığı sarıçam odununda (iğne yapraklı ağaç türlerinde) 150°C, meşe ve kestane odununda (yayvan yapraklı ağaç türlerinde) 160°C’ye 6 saatte çıkartılmıştır (2.safha). Bu sıcaklıklarda 2 saat bekletilerek soğutma safhasına (3.safha) geçilmiştir. Isıl işlemin son safhası olan soğutma kısmında fırın içerisindeki sıcaklık 12 saatte 50°C’ye düşürülmüştür.



Şekil 1. Isıl İşlem Safhaları

2.3.4. Laminasyon (Lamination)

150°C ve 160°C’de 2 saat süre ile ön ısı işlem uygulandıktan sonra 32 x 32 x 880 mm ölçülerindeki iki parça nem kürlenmeli DIN/EN 204 standartlarında D4 özellikli poliüretan tutkalı (PUR) ile pres altında radyal yönde yapıştırılarak 32 x 64 x 880 mm ölçülerinde TS 386’ya göre lamine edilmiştir [21].

2.3.5. Kondüsyonlama (Conditioning)

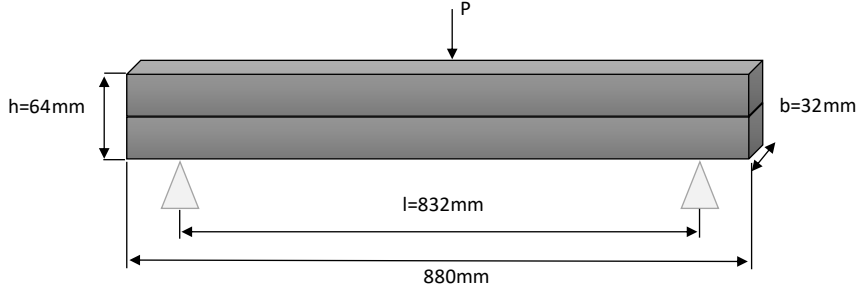
Lamine sonrası toplamda 270 adet deney örneği Tablo 1’de belirtilen değerlerden sırasıyla 20°C sıcaklık %65 bağıl nem, 40°C sıcaklık %35 bağıl nem ve 10°C sıcaklık %50 bağıl nem değerlerinde değişmez ağırlığa gelene kadar iklimlendirme cihazında kondüsyonlanmıştır.

Tablo 1. Deneylere ait örnek sayıları

Ağaç	İşlem	20°C-%65	40°C-%35	10°C-%50	Örnek sayısı
Sarıçam	İşlemsiz	10	10	10	30
Meşe	Ön ısı işlem	10	10	10	30
Kestane	Tanen + Ön ısı işlem	10	10	10	30
	Toplam				90+90+90
	Genel Toplam				270

2.4. Eğilme Direnci ve Eğilmede Elastikiyet Modülü (Bending Strength and Modulus of Elasticity in Bending)

Eğilme direnci ve eğilmede elastikiyet modülü testleri Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Ağaççileri Endüstri Mühendisliği Bölümü Ahşap Teknoloji Laboratuvarında yapılmıştır. Örnekler (Şekil 2) TS 2474'e göre eğilme direnci [22], TS 2478'e göre eğilmede elastikiyet modülü [23] esasları doğrultusunda üniversal test cihazına yerleştirilmiş ve testlerden elde edilen kuvvetler eşitlik 2-3'de yerlerine konularak hesaplanmıştır.



Şekil 2. Eğilme direnci testi

$$\sigma_e = (3 \cdot P_{max} \cdot l) / (2 \cdot b \cdot h^2) \quad (2)$$

$$E_m = (\Delta F \cdot l^3) / (4 \cdot b \cdot h^3 \cdot \Delta f) \quad (3)$$

P_{max} : Kırılma anında uygulanan maksimum kuvvet (N),

P: Yüklemin alt ve üst limitlerinin aritmetik ortalamaları arasındaki farka eşit yük (N),

ΔF : Elastikiyet bölgesindeki kuvvet farkı (N),

l: Destek noktaları arasındaki açıklık (mm),

b: Deney numunesinin genişliği (mm),

h: Deney numunesinin yüksekliği (mm),

f: Net eğilme alanındaki sehim (mm).

2.5. İstatistiksel Analiz (Statistical Analysis)

Modifikasyon işlemleri ve iklimlendirme şartlarının lamine ahşap malzemelerde eğilme direnci ve eğilmede elastikiyet modülü üzerindeki etkisini tespit etmek amacıyla $p \leq 0,05$ önem düzeyinde çoklu varyans analizi yapılmıştır. Ağaç türü, işlem çeşidi ve iklim şartlarının test edilmiş özellikler üzerindeki etkisi anlamlı bulunduğu homojenlik gruplarını belirlemek için Duncan testi uygulanmıştır.

Konum servisleri birçok mobil uygulamanın önemli ve ayırt edici özelliklerinden biri olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Konum servislerinden alınan bilgilerin görselleştirilmesi için haritalar servisi kullanılmaktadır. Google, konum servisleri ile birlikte Android için uygulama geliştirene kullanıcıya bulunduğu yeri göstermek ya da aradığı bir konumu harita üzerinde göstermek için Google içinde yer alan Google Maps Android uygulama programlama arayüzünü sunmaktadır [16]. Bu uygulama programlama arayüzünü herhangi bir uygulamaya eklemek ve harita üzerinde istenilen işlemleri gerçekleştirebilmek için Google üzerinden bir uygulama programlama anahtarının elde edilmesi gerekir. Google, söz konusu anahtar uygulamaya özel oluşturup kullanıcıya sunmaktadır.

3. BULGULAR (FINDINGS)

3.1. Hava Kurusu Yoğunluğu (Air Dry Density)

Deney örneklerinin hava kurusu yoğunluk ortalamaları Tablo 2’de varyans analiz (ANOVA) değerleri ise Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 2. Hava kurusu yoğunluk ortalamaları (g/cm³)

Ağaç Türü	Örnek Sayısı	Toplam	Ortalama (X)	SS	min	max
Sarıçam	10	4.415	0.442	0.01	0.427	0.453
Meşe	10	8.353	0.835	0.01	0.846	0.821
Kestane	10	4.357	0.436	0.01	0.426	0.445
Toplam	30	17.125	0.571	0.19		

Tablo 3. Hava kurusu (ANOVA) varyans analizi

Varyans Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Değeri	Önem Düzeyi p<0.05
Gruplar arası	2	1.049	0.525	6686.000	0.000
Grup içi	27	0.002	0.000		
Toplam	29	1.051			

Ahşap türlerinin hava kurusu yoğunluk değerleri p<0.05 önem düzeyinde anlamlı bulunmuştur. Duncan test sonuçlarına göre; en yüksek hava kurusu yoğunluk değerleri sırasıyla meşe odununda (0.835 g/cm³), sarıçam odununda (0.442 g/cm³) ve kestane odununda (0.436 g/cm³) bulunmuştur.

3.2. Retensiyon Miktar ve Oranları (Retention Amount and Rates)

Rasgele yöntemle belirlenen hava kurusu halde bulunan bir kısım sarıçam (*Pinus sylvestris* L.), meşe (*Quercus petraea* L.) ve kestane (*Castanea sativa* Mill.) örneği ısıl işlemde önce %10’luk meşe palamudu tanen çözeltisine daldırılmış ve 24 saat bekletilerek emprenye edilmiştir. Örneklere tutunan doğal ahşap koruyucu tanen miktarları, oranları ve yoğunlukları tartı yöntemi ile belirlenerek Tablo 4’te verilmiştir.

Tablo 4. Örneklere ait yoğunluk değerleri, retensiyon miktarı ve oranları

Ağaç Türü	Sarıçam	Meşe	Kestane
Hava Kurusu (gr/cm ³)	0.5219	0.6737	0.5167
Tanenli Hava Kurusu (gr/cm ³)	0.5303	0.6743	0.5217
Retensiyon Miktarı (gr)	1.8564	1.0910	1.2961
Retensiyon %	%2.62	%1.02	%1.63

Emprenyeli örneklerin işlemi sonrasında örneklere nüfus eden tanen maddesi tutunma miktarı eşitlik 4’te ve % retensiyon oranları eşitlik 5’e göre hesaplanmıştır.

$$R = [(G * C) / V] * 10 \quad (4)$$

$$R(\%) = [(Moes - Moeö) / Moeö] * 100 \quad (5)$$

G: T2 -T1,

T1: Emprenye öncesi örnek ağırlığı (g), T2: Emprenye sonrası örnek ağırlığı (g),

Moes: Emprenye sonrası tam kuru ağırlık (g), Moeö: Emprenye öncesi örnek tam kuru ağırlık (g),

V: Örnek hacmi (cm³), C: Çözelti konsantrasyonu (%).

3.3. Eğilme Direnci (Bending Strength)

Eğilme direnci değerleri ağaç türü (A), işlem çeşidi (B), ağaç türü – işlem çeşidi (AxB) ikili etkileşimi, işlem çeşidi – iklim şartı (BxC) ikili etkileşimi $p < 0.05$ önem düzeyinde anlamlı bulunmuştur (Tablo 5). Diğer faktörel kaynakların anlamsız olduğu belirlenmiştir.

Tablo 5. Eğilme direncine ilişkin çoklu varyans analizi

Varyans Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler	F Değeri	Önem ($p < 0,05$)
Ağaç Türü (A)	2	12977.804	6488.902	32.5610	0.0000
İşlem Çeşidi (B)	2	4087.657	2043.828	10.2558	0.0001
AxB	4	6915.529	1728.882	8.6754	0.0000
İklim (C)	2	1178.939	476.654	2.9579	0.0561
AxC	4	1807.327	451.832	2.2673	0.0666
BxC	4	2404.980	601.245	3.0170	0.0211
AxBxC	8	2312.942	289.118	1.4508	0.1839
Hata	108	21522.749	199.285		
Toplam		53207.927			

Ağaç türlerine ait homojenlik grupları Tablo 6’da, işlem çeşidine ait homojenlik grupları ise Tablo 7’de verilmiştir. Ağaç malzeme türleri arasında eğilme direnci değişimleri en yüksek (89.04 N/mm^2) meşe odununda, daha sonra sarıçam (80.75 N/mm^2) ve en düşük ise (65.37 N/mm^2) kestane odununda elde edilmiştir (Şekil 3). Meşe odununun eğilme direnci değerleri, sarıçam ve kestane türü odunlara göre daha yüksek çıkmıştır [24]. Isıl işlem sonrası işlem gören örneklerin eğilme dirençleri kontrol örneklerine göre daha düşük çıkmıştır [25]. Kontrol (işlemsiz) örneklerinin eğilme direnci esas alındığında ön ısıl işlemin, eğilme direncini %13 azalttığı, tanen + ön ısıl işlem uygulamasının ise eğilme direncini bir miktar artırıp (74.52 N/mm^2) ısıl işlemin bozundurucu etkisini azalttığı tespit edilmiştir (Şekil 4).

Tablo 6. Ağaç türüne ait homojenlik grupları

Ağaç Türü	X	HG
Sarıçam	80.75	B
Meşe	89.04	A
Kestane	65.37	C

LSD value = 5.886

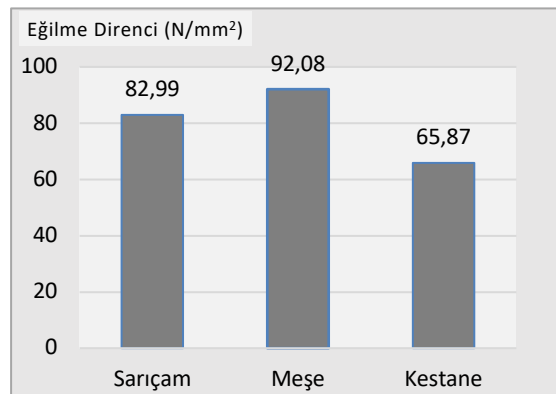
X: Aritmetik ortalama, HG: Homojenlik grubu, LSD: Önemli En Küçük Fark

Tablo 7. İşlem çeşidine ait homojenlik grupları

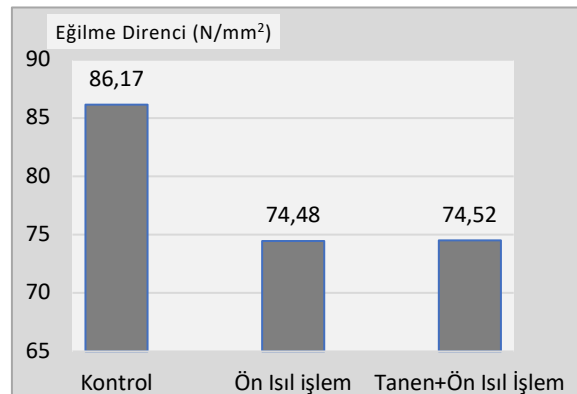
İşlem Çeşidi	X	HG
Kontrol	86.17	A
Ön ısıl işlem	74.48	B
Tanen+Ön ısıl işlem	74.52	B

LSD value = 5.886

X: Aritmetik ortalama, HG: Homojenlik grubu, LSD: Önemli En Küçük Fark

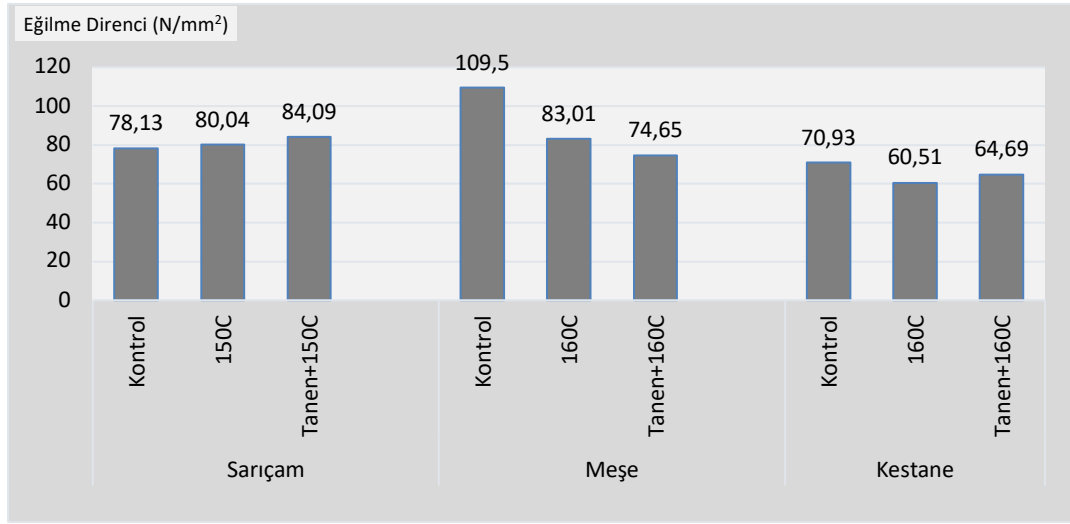


Şekil 3. Ağaç türlerine ait eğilme direnci



Şekil 4. İşlem çeşidine göre eğilme direnci

Ağaç türü+işlem çeşidine ait homojenlik grupları Tablo 8’de, işlem çeşidi+iklim şartına ait homojenlik grupları ise Tablo 9’da verilmiştir. Sarıçam kontrol örneklerine göre ön ısıtma işlem ve tanen empresyonu yapılan örneklerin eğilme dirençlerinin arttığı tespit edilmiştir. Kestane kontrol örneklerine göre ön ısıtma işlem gören örneklerin eğilme dirençlerinde düşüşlerin ardından tanen takviyesi yapılan örneklerde bir miktar artış görülmüştür. Geniş yapraklı ağaçlarda trahelerin tüllerle veya yabancı maddelerle tıkanmış olması odun içerisine sıvı maddelerin nüfus etmesine engel teşkil edebilir [26]. Meşe odununda tüllemeden dolayı tanen çözeltisinin serbest daldırma yöntemi ile çeperlere girememesinden, bu işlemin meşe için uygun olmadığı belirlenmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. Ağaç türü ve işlem çeşidi ikili etkileşiminin eğilme direnci değişimine etkileri

Buradan; sarıçam ve kestane odunu için ön ısıtma işleminin ahşabın selüloz ve lignin bileşenlerindeki bozunumunu azalttığı ve geciktirdiği, bu nedenle de ahşabın mekanik özelliklerindeki kaybını azalttığı söylenebilir.

Tablo 8. Ahşap türü-işlem çeşidi homojenlik grupları

	İşlem	X	HG
Ahşap türü + İşlem Çeşidi	Sarıçam+Kontrol	78.13	BC
	Sarıçam+150°C Ön Isıl İşlem	80.04	BC
	Sarıçam+Tanen+150°C Ön Isıl İşlem	84.09	B
	Meşe+Kontrol	109.5	A
	Meşe+160°C Ön Isıl İşlem	83.01	B
	Meşe+Tanen+160°C Ön Isıl İşlem	74.65	BC
	Kestane+Kontrol	70.93	CD
	Kestane +160°C Ön Isıl İşlem	60.51	E
	Kestane +Tanen+160°C Ön Isıl İşlem	64.69	DE

LSD:10.20

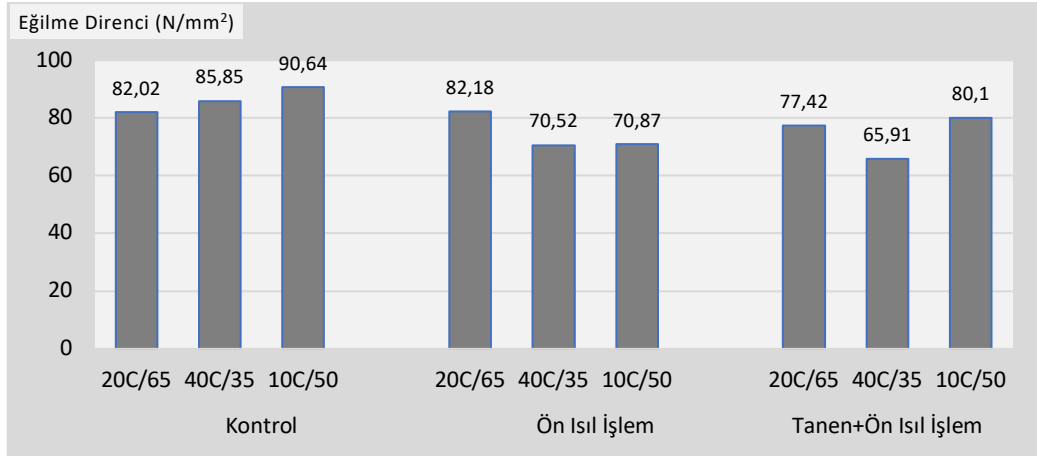
X: Aritmetik ortalama, HG: Homojenlik grubu, LSD: Önemli En Küçük Fark

Tablo 9. İşlem çeşidi-iklim şartı homojenlik grupları

	İşlem	X	HG
İşlem Çeşidi + İklim Şartı	Kontrol+20°C %65	82.02	AB
	Kontrol+40°C %35	85.85	AB
	Kontrol+10°C %50	90.64	A
	Ön Isıl İşlem +20°C %65	82.18	AB
	Ön Isıl İşlem +40°C %35	70.52	CD
	Ön Isıl İşlem +10°C %50	70.87	CD
	Tanen+ Ön Isıl İşlem+20°C %65	77.42	BC
	Tanen+ Ön Isıl İşlem+40°C %35	65.91	D
	Tanen+ Ön Isıl İşlem+10°C %50	80.10	BC

LSD:10.20

En yüksek eğilme direnci 10°C sıcaklık %50 bağıl nemde kontrol örneklerinde (90.64 N/mm²), en düşük ise ön ısıtma işlemli 40°C sıcaklık %35 bağıl nemde bekletilen örneklerde (70,52 N/mm²) bulunmuştur (Şekil 6).



Şekil 6. İşlem çeşidi ve iklim şartı ikili etkileşiminin eğilme direnci değişimine etkileri

Kontrol örneklerine göre ön ısıl işlemin eğilme direncini azalttığı, fakat tanen takviyeli ön ısıl işlemlili 10°C sıcaklık %50 bağıl nemde iklimlendirilmiş örneklerin eğilme direncinde artışlara neden olduğu belirlenmiştir. Ağaç malzemenin mekanik özelliklerindeki artış ve azalışlar genellikle yıllık halka düzeni, lif yapısı, ağacın yoğunluğu gibi yapısal özelliklerinin yanı sıra malzemenin sıcaklığı ve nem içeriğinin karmaşık bir etkileşimine de bağlıdır [27-29]. Sıcaklık ve rutubet miktarının, ağaç malzeme mekanik özelliklerinin üzerinde önemli bir etkisi vardır. Ağaç malzeme bünyesindeki lif doyumluğu rutubet miktarının ortalama %30'un altına düşmesi ve sıcaklığın azalmasıyla mekanik özelliklerde artış görülmektedir [30]. 10°C sıcaklık %50 bağıl nemde sıcaklığın düşmesiyle ahşap malzemede rijitleşmeden dolayı eğilme direncinin arttığı söylenebilir.

3.4. Elastikiyet Modülü (Modulus of Elasticity)

Elastikiyet modülü ahşap hakkında bilgilendirilmede en öne çıkan özelliklerden birisidir. Odunda rutubet miktarının ve sıcaklığının artışı ile değişen bir mekanik özelliktir. Özellikle sıcaklığın artması ile ters orantılı olarak elastiklik modülünün azaldığı bilinmektedir. Ağaç türü, ısıl işlem çeşidi ve iklim şartlarının eğilmede elastiklik modülüne yönelik çoklu varyans analizi sonuçları Tablo 10'da gösterilmiştir.

Tablo 10. Eğilmede elastikiyet modülüne ilişkin çoklu varyans analizi

Varyans Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler	F Değeri	Önem (p<0,05)
Ağaç Türü (A)	2	364586508	182293254	169.7306	0.0000
İşlem Çeşidi (B)	2	74823169	37411584	34.8334	0.0000
AxB	4	4711127	1177781	1.0966	0.3620
İklim (C)	2	7333664	3666832	3.4141	0.0365
AxC	4	5660564	1415141	1.3176	0.2680
BxC	4	12579352	3144838	2.9281	0.0242
AxBxC	8	14723162	1840395	1.7136	0.1033
Hata	108	115993646	1074015		
Total	134	600411195			

Tablo 10'a göre ağaç türü (A), işlem çeşidi (B), iklim şartı (C) faktörleri ile işlem çeşidi x iklim şartı (BxC) ikili etkileşimi p<0.05 önem düzeyinde anlamlı bulunmuştur. Diğer faktörel kaynakların anlamsız olduğu belirlenmiştir. Tablo 11, 12, 13 ve 14'te bu etkileşimlere ait homojenlik grupları verilmiştir.

Ağaç türüne göre eğilmede elastikiyet modülü en yüksek (11690 N/mm²) meşe odununda, en düşük değer (7874 N/mm²) kestane odununda elde edilmiştir (Şekil 7). İşlem çeşidine göre eğilmede elastikiyet modülü en yüksek tanen takviyeli ön ısıl işlem görmüş örneklerde (10070 N/mm²) bulunmuştur, en düşük ise işlemsiz örneklerde (8370 N/mm²) bulunmuştur (Şekil 8). İklim şartına göre elastikiyet modülü en yüksek (9735 N/mm²) 20°C sıcaklık ve %65 bağıl nemde, en düşük (9196 N/mm²) 10°C sıcaklık ve %50 bağıl

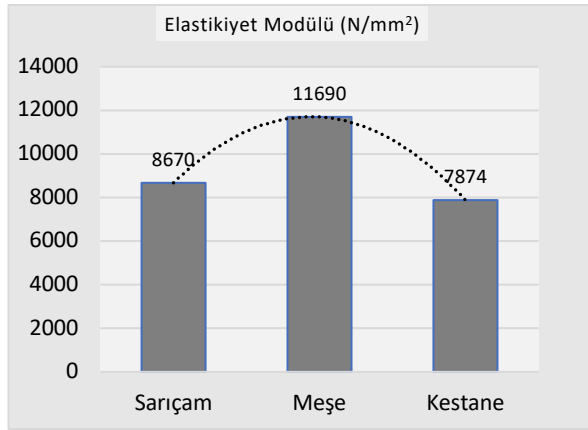
nemde iklimlendirilen örneklerde bulunmuştur. Elastikiyet modülü değerlerinin 10°C sıcaklık ve %50 bağıl nem şartlarında düşük çıkmasının, düşük sıcaklık ve düşük bağıl nemde odunun aşırı gevrekleşmesinden kaynaklandığı söylenebilir (Şekil 9). Isıl işlemlerle örneklerde sıcaklık ve bağıl nem değişimleriyle ahşabın temel kimyasal bileşiminde meydana gelen bozunumlar, elastikiyet modülünde bir azalmaya neden olmuş olabilir. Kontrol örneklerine göre tanen takviyeli ve ön ısıl işlemlerle örneklerde elastikiyet modülünün arttığı tespit edilmiştir. Bunun nedeninin, ısıl işlem uygulamasında tanen takviyeli odunun temel bileşenleri olan hemiselüloz, lignin ve selülozu desteklemesinden, bozunum derecesini azaltmış olabileceği söylenebilir.

Tablo 11. Ağaç türüne ait homojenlik grupları

Ağaç Türü	X	HG
Sarıçam	8670	B
Meşe	11690	A
Kestane	7874	C

LSD value = 432.1

X: Aritmetik ortalama, HG: Homojenlik grubu, LSD: Önemli En Küçük Fark

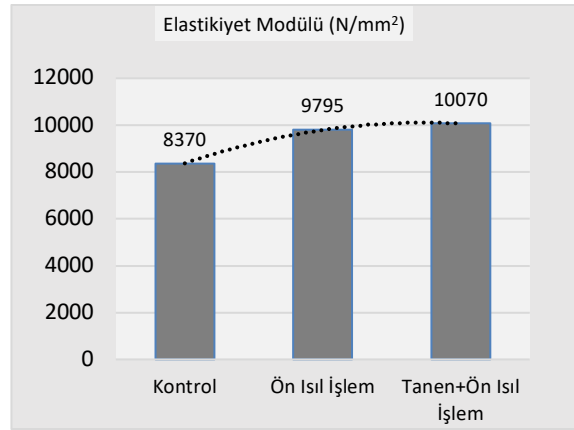


Şekil 7. Ağaç türüne göre elastikiyet modülü

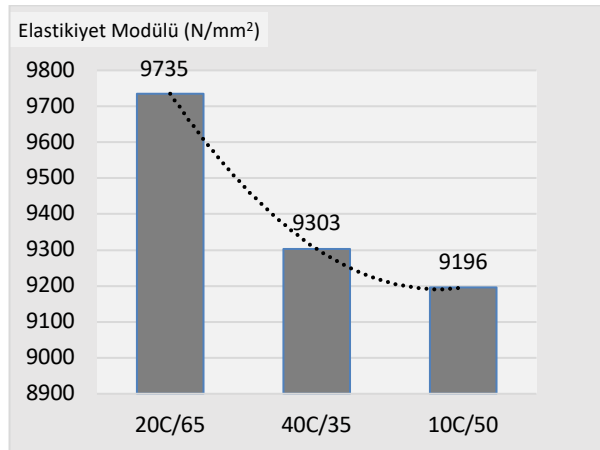
Tablo 12. İşlem çeşidine ait homojenlik grupları

İşlem Çeşidi	X	HG
Kontrol	8370	B
Ön ısıl işlem	9795	A
Tanen+Ön ısıl işlem	10070	A

LSD value = 432.1



Şekil 8. İşlem çeşidine göre elastikiyet modülü



Şekil 9. İklim şartına göre elastikiyet modülü değişimi

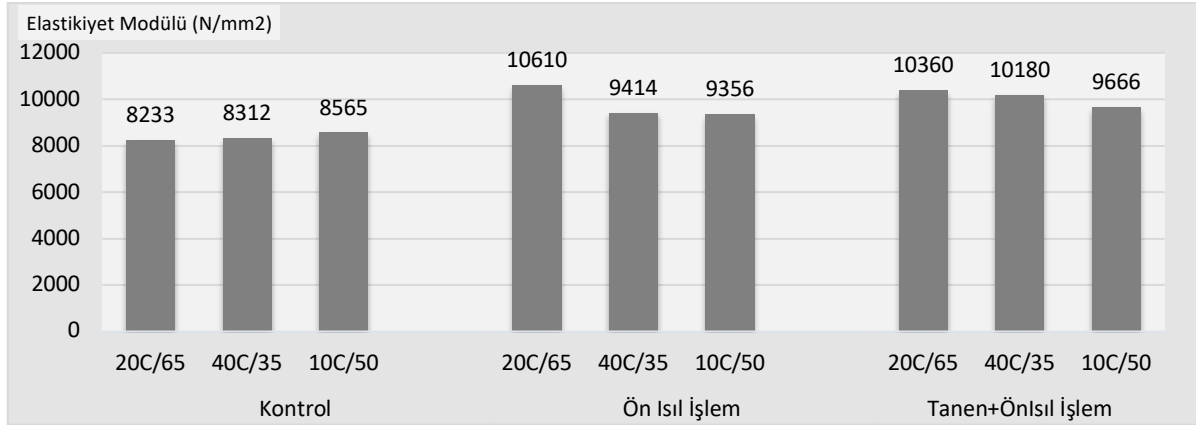
Tablo 13. İklim şartına ait homojenlik grupları

İklim Şartı	X	HG
20°C-%65	9735	A
40°C-%35	9303	B
10°C-%50	9196	B

LSD value = 432.1

X: Aritmetik ortalama, HG: Homojenlik grubu, LSD: Önemli En Küçük Fark

Şekil 10'da işlem çeşidi ve iklim şartı etkileşiminin elastikiyet modülü değişimi grafiği verilmiş olup bu verilere ait homojenlik grupları da Tablo 14'de gösterilmiştir. Eğilmede elastikiyet modülü değerleri en yüksek 20°C sıcaklık %65 bağıl nemde ön ısıl işlemlerle örneklerde (10610 N/mm²), en düşük ise 20°C sıcaklık %65 bağıl nemde kontrol örneklerinde (8233 N/mm²) bulunmuştur.



Şekil 10. İşlem çeşidi ve iklim şartı etkileşiminin elastikiyet modülü değişimi

Tablo 14. İşlem çeşidi ve iklim şartı homojenlik grupları

	İşlem	X	HG
İşlem Çeşidi + İklim Şartı	Kontrol+20°C %65	8233	D
	Kontrol+40°C %35	8312	D
	Kontrol+10°C %50	8565	D
	Ön Isıl İşlem +20°C %65	10610	A
	Ön Isıl İşlem +40°C %35	9414	C
	Ön Isıl İşlem +10°C %50	9356	C
	Tanen+ Ön Isıl İşlem+20°C %65	10360	AB
	Tanen+ Ön Isıl İşlem+40°C %35	10180	AB
	Tanen+ Ön Isıl İşlem+10°C %50	9666	BC

LSD:748.4 X: Aritmetik ortalama, HG: Homojenlik grubu, LSD: Önemli En Küçük Fark

Kontrol grubunda 10°C sıcaklık %50 bağıl nemde iklimlendirilmiş örneklerin 20°C sıcaklık %65 bağıl nemde iklimlendirilmiş örneklere göre sıcaklık ve bağıl nemin azalması ile elastikiyet modülünde artışların olduğu tespit edilmiştir. Sıcaklık ve rutubet miktarının ağaç malzemenin mekanik özellikleri üzerinde etkisi olduğu bilinmekle beraber malzeme sıcaklığının düşüşü mekanik özelliklerden elastikiyet modülünde artışlara sebep olmuştur [30]. Isıl işlemlili ve tanen modifiyeli örneklerde bu durum tam tersi olarak tespit edilmiştir. Bunun sebebinin işlemlili örneklerin denge rutubet miktarlarının değişiminden kaynaklandığı düşünülmektedir.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (CONCLUSIONS AND DISCUSSION)

Ağaç malzemeye sıcaklık ve kızgın buhar altında uygulanan ısı işlem sonucunda malzemenin içerisinde yeni kimyasal bileşikler oluşmaktadır. Bu işlem sonucunda fiziksel ve kimyasal yapıda meydana gelen değişimler ile bazı özelliklerine olumlu bazılarına da olumsuz olarak yansımaktadır. Isıl işlemde uygulanan sıcaklık derecesi ve ahşabın sıcaklığa maruz kalma süresinden dolayı odun ana bileşenleri lignin, selüloz ve hemiselülozun yapısının bozulup, odunun polimer yapısının değişmesiyle her üç tür ahşapta mekanik özelliklerde azalmalar olduğu tespit edilmiştir. Tanen modifiyeli ön ısı işlem görmüş örneklerin eğilme dirençlerinde ön ısı işlemli örneklere göre bir miktar artış gözlenmiş, bu artış en çok sarıçamda odununda tespit edilmiştir. Meşe odunu örneklerine serbest daldırma yöntemi ile tanen çözeltisi daha az nüfuz edebildiği için, tanen takviyeli ve ön ısı işlemli meşe örneklerinde mekanik özelliklerde artış olmadığı söylenebilir. Düşük sıcaklık ve bağıl nemde (10°C sıcaklık ve %50 bağıl nem) iklimlendirilen örneklerin eğilme dirençlerinde literatüre paralel olarak artış meydana gelmiştir. Bu durumda, sarıçam ve kestane odunlarının tanen takviyeli ön ısı işlemli uygulamalar ile dış ortamda kullanımının uygun olacağı söylenebilir. Özellikle sarıçam hafif yüklü ahşap ev kolon ve kirişlerinde, diğer yapı elemanlarının imalatında da kullanılması önerilebilir. Sonraki çalışmalarda vakumlu emprenye yöntemi ile ağaç

malzemeye tanen çözeltisi daha çok nüfus ettirilerek düşük sıcaklıkta ısı işleme ile mekanik özelliklerindeki değişimler araştırılabilir.

TEŞEKKÜRLER (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu araştırma Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 07/2019-24 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Kurtoğlu A., Ağaç Malzeme Yüzey İşlemleri ve Genel Bilgiler, İstanbul Orman Fakültesi Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, (2000) 31-32.
- [2] Beceren R., Mimaride Ahşap, Bursa Güney Marmara Mimarlık Dergisi, 35 (2000) 12-14.
- [3] Ayar S. (2008). Basınç ve Bekletme Süresinin Emprenye Maddelerinin Ağaç Malzemeye Nüfuzuna Etkisinin Belirlenmesi, Bilim Uzmanlığı Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- [4] Bourgois J., Bartholin M., Guyonnet R., Thermal treatment of wood: analysis of the obtained product, Wood Science and Technology, 23 (1989) 303-310.
- [5] Mayes D., Oksanen O., Thermowood Handbook, Finnforest, (2002) 5-15.
- [6] Viitaniemi P., New properties for thermally-treated wood, Indust Horizons, (2000) 9-13.
- [7] Özçiğçi A., Altun S., Yapıcı F., Isıl İşlem Uygulamasının Ağaç Malzemenin Teknolojik Özelliklerine Etkisi, Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, (2009) 13-15.
- [8] Hillis W.E., High temperature and chemical effects on wood stability, Wood Science and Technology, 8 No. 4 (1984) 281-293.
- [9] Aydemir D., Gündüz G., Ahşabın Fiziksel, Kimyasal, Mekanik ve Biyolojik Özellikleri Üzerine Isıyla Muamelenin Etkisi, Bartın Orman Fakültesi Dergisi, 11 No. 15 (2009) 61-70.
- [10] Jones D., Suttie E., Ala-Viikari J., Bergstrom N., Mayes D., The commercialisation of ThermoWood products, International Research Group on Wood Preservation, Doc. No. IRG/WP 06-40339, (2006).
- [11] Doruk Ş., Perçin O., Isıl İşlemin Bazı Ağaç Malzemelerin Eğilme ve Basınç Direncine Etkileri, Politeknik Dergisi, 13 No. 2 (2010) 143-150.
- [12] Patcharawijit A., Choodum N., Yamsaengsung R., Effects of superheated steam treatment on moisture adsorption and mechanical properties of pre-dried rubberwood, Drying Technology, 37 No. 13 (2018) 1647-1655.
- [13] Kaymakci A., Bayram B.Ç., Evaluation of Heat Treatment Parameters' Effect on Some Physical and Mechanical Properties of Poplar Wood with Multi-criteria Decision Making Techniques, BioResources, 16 No. 3 (2021) 4693-4703.
- [14] Perçin O., Altunok M., Doruk Ş., Saçlı C., Emprenye ve Isıl İşlemin Kayın Ağacının Bazı Mekanik Özelliklerine Etkisi, İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi, 6 No. 3 (2017) 494-502.
- [15] Lopes D.J., Barnes H.M., Bobadilha G., Influence of Heat Treatment and Tannin Impregnation on Boron Depletion and Wood Durability, Forests, 11 No. 2 (2020) 201-213.
- [16] Voss K. Heat treatment of hardboards, Holz Roh-u, Werkstoff, (1952).

- [17] Xu J., Zhang Y., Shen Y., Li C., Wang Y., Ma Z., Sun W., New perspective on wood thermal modification: Relevance between the evolution of chemical structure and physical-mechanical properties, and online analysis of release of VOCs, *Polymers*, 11 No. 7 (2019) 1145-1164.
- [18] Gündüz G., Aydemir D., Onat S.M., Akgün K., The effects of tannin and thermal treatment on physical and mechanical properties of laminated chestnut wood composites. *BioResources*, 6 No. 2 (2011) 1543-1555.
- [19] TS 2470 (1976). Odunda Fiziksel Ve Mekaniksel Deneyleer İçin Numune Alma Metotları ve Genel Özellikler, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- [20] TS 53 (1981). Odunun Fiziksel Özelliklerini Tayin İçin Numune Alma, Muayene ve Deney Metotları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye .
- [21] TS EN 386 (2006). Tutkallanmış Lâmine Kereste- Performans Özellikleri ve Asgarî İmalât Şartları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- [22] TS 2474 (1976). Odunun Statik Eğilme Dayanımının Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- [23] TS 2478 (1976). Odunun Statik Eğilmede Elastikiyet Modülünün Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- [24] Keskin H., Dağlıoğlu N., Bazı odun türlerinde tanalit-e emprenye maddesinin eğilme direnci ve eğilmede elastiklik modülüne etkileri, *Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 17 No. 1 (2016) 62-69.
- [25] Aydemir D., Bürüç G., Bakır K., Doğu Kayını ve Saplı Meşe Odunlarının Bazı Özellikleri Üzerine Isıl İşlemin Etkisi, *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 21 No. 3 (2019) 713-721.
- [26] Bozkurt A.Y., Erdin N., (2011). Ağaç Teknolojisi, İstanbul Üniversitesi Basım ve Yayımevi, İstanbul, Türkiye.
- [27] Palka L., Predicting the effect of specific gravity, moisture content, temperature and strain rate on the elastic properties of softwoods, *Wood Science and Technology*, 7 No. 2 (1973) 127-141.
- [28] Hernández R.E., Passarini L., Koubaa A., Effects of temperature and moisture content on selected wood mechanical properties involved in the chipping process, *Wood Science and Technology*, 48 No. 6 (2014) 1281-1301.
- [29] Glass S., Zelinka S., Moisture relations and physical properties of wood, *General Technical Report FPL-GTR-282*, Chapter 4 (2021) 1-19.
- [30] Gerhards C.C., Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood: an analysis of immediate effects. *Wood and Fiber Science*, 14 No. 1 (1982) 4-36.



Analysis of the Efficiency of the Information Security Policies of Public Institutions in terms of Ensuring Corporate Information Security

Samime MERAL^{1,*} Halil İbrahim BÜLBÜL²

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgi Güvenliği Mühendisliği Anabilim Dalı, 06500, Yenimahalle/ANKARA

²Gazi Üniversitesi, Gazi Eğitim Fakültesi, Bilgisayar ve Öğretim Teknolojileri Bölümü, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Abstract

With this study, it is aimed to determine the current situation of the studies carried out by the institutions to ensure information security and the information security policies they have prepared in this direction in terms of ensuring corporate information security. By determining the variables of the criticality level of the data owned by the institutions and the intensity of using information systems in business processes, it has been focused on whether the effectiveness of the information security policies of the institutions will show a statistically significant difference according to these variables. In order to analyze the information security policies of public institutions, a survey was conducted with the participation of 121 employees from different branches in the field of information technologies / security in public institutions selected by sampling method according to their criticality. A 55-question questionnaire was prepared by the researcher as a data collection tool. The prepared questionnaire consists of three parts. In the first part of the questionnaire, there are questions to understand the demographic information of the participants, in the second part there are questions to understand the institutional structure of the institution where the participants work, and in the last part, there are 5-point Likert type questions consisting of 48 questions prepared to measure the effectiveness of information security policies. The obtained data were analyzed using the SPSS 28.0 statistical package program in the computer environment and comparisons were made. As a result of the validity and reliability analysis, the Cronbach Alpha (α) reliability coefficient was calculated as .96 for the entire questionnaire. As a result of the Kolmogorov-Smirnov and Shapiro-Wilk normality tests applied to the data, since the p significance value was above the 0.05 significance value, the hypothesis that the data were normally distributed was accepted and parametric tests applied for the normally distributed data were preferred. Descriptive statistical analyzes were used for data analysis and one-way analysis of variance technique was used for comparison of three or more groups. As a result of the research, when all the questions in the questionnaire were evaluated, it was seen that the information security policies of the institutions were effective at the rate of 77.80% and there was a statistically significant difference between the effectiveness of the information security policies of the institutions according to the criticality levels of the data owned by the institutions and the intensity of the use of information systems in business processes. In addition, it has been concluded that the effectiveness of information security policies increases as the criticality levels of the data owned by the institutions increase.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 27.09.2021
Düzeltilme: 09.10.2021
Kabul: 04.04.2022

Keywords

Information Security
Corporate Information
Security
Information Security
Policies
Information Security
Management System

Anahtar Kelimeler

Bilgi Güvenliği
Kurumsal Bilgi Güvenliği
Bilgi Güvenliği
Politikaları
Bilgi Güvenliği Yönetim
Sistemi

Kamu Kurumlarının Bilgi Güvenliği Politikalarının Kurumsal Bilgi Güvenliğinin Sağlanması Açısından Etkinliğinin Analiz Edilmesi

Öz

Bu çalışma ile kurumların bilgi güvenliğini sağlamaya yönelik yapmış olduğu çalışmaların ve bu doğrultuda hazırlanmış oldukları bilgi güvenliği politikalarının kurumsal bilgi güvenliğinin sağlanması açısından mevcut durumunun tespit edilmesi amaçlanmıştır. Kurumların sahip olduğu verilerin kritiklik düzeyleri ve iş süreçlerinde bilgi sistemleri kullanıma yoğunluğu değişkenleri belirlenerek, bu değişkenlere göre kurumların sahip olduğu bilgi güvenliği politikalarının etkinliğinin istatistiksel açıdan anlamlı düzeyde bir farklılık gösterip göstermeyeceği konusu üzerine odaklanılmıştır. Kamu kurumlarının bilgi güvenliği politikalarının analiz edilmesi amacıyla kritiklik durumlarına göre örneklem yöntemiyle seçilen kamu kurumlarında bilgi teknolojileri/güvenliği alanında farklı branşlarda 121 çalışanın katılımıyla anket çalışması gerçekleştirilmiştir. Veri toplama aracı olarak araştırmacı tarafından 55 soruluk bir anket

hazırlanmıştır. Hazırlanan anket üç bölümden oluşmaktadır. Anketin birinci bölümünde katılımcıların demografik bilgilerini anlamaya yönelik sorular, ikinci bölümünde katılımcıların görev aldığı kurumun kurumsal yapısını anlamaya yönelik sorular ve son bölümünde ise bilgi güvenliği politikalarının etkinliğini ölçmeye yönelik hazırlanan 48 sorudan oluşan 5'li likert tipi sorular yer almaktadır. Elde edilen veriler bilgisayar ortamında SPSS 28.0 istatistik paket programı aracılığıyla çözümlenerek karşılaştırmalar yapılmıştır. Geçerlik güvenilirlik analizi sonucu Cronbach Alpha (α) güvenilirlik katsayısı anketin tümü için ,96 olarak hesaplanmıştır. Verilere uygulanan Kolmogorov-Smirnov ve Shapiro-Wilk normallik testleri sonucunda p anlamlılık değeri 0,05 anlamlılık değerinin üzerinde olduğu için verilerin normal dağıldığı hipotezi kabul edilerek normal dağılan veriler için uygulanan parametrik testler tercih edilmiştir. Verilerin analizi için tanımlayıcı istatistiksel analizler ve üç ya da daha fazla grup karşılaştırması için tek yönlü varyans analizi tekniği kullanılmıştır. Araştırma sonucunda, anketteki tüm sorular değerlendirildiğinde kurumların bilgi güvenliği politikalarının %77,80 oranında etkin olduğu ve kurumların sahip olduğu verilerin kritiklik düzeyleri ve iş süreçlerinde bilgi sistemleri kullanılmaya yoğunluğuna göre kurumların bilgi güvenliği politikalarının etkinliği arasında istatistiksel açıdan anlamlı düzeyde farklılık olduğu görülmüştür. Ayrıca kurumların sahip olduğu verilerin kritiklik düzeyleri arttıkça bilgi güvenliği politikalarının etkinliğinin arttığı sonucuna varılmıştır.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bilgi güvenliği kavramı kişisel bilgisayarlardan kurumsal ve ulusal çaptaki tüm bilgi sistemlerine ve kritik altyapılara uzanan geniş bir çerçevede bilgi sistemlerini kapsayan bir güvenlik yönetimi anlayışıdır [1]. Kamu kurumlarının sahip olduğu kurumsal bilgilerin güvenliğini sağlamaları, ulusal bilgi güvenliğinin sağlanması noktasında temel teşkil etmektedir. Dolayısıyla kamu kurumlarının bilgi güvenliği kültürü yaklaşımları, yürütmüş oldukları çalışmalar ve bu doğrultuda almış oldukları önlemler ciddi önem arz etmektedir.

Kurumsal bilgiler kurumlar için hayati bir önem taşımaktadır. Kurumsal bilgi kaybı, kurumlar için ciddi maddi ve manevi kayıplara neden olabilmektedir. Bu nedenle kurumların kurumsal bilgilerini korumak için öncelikle sahip olduğu bilgilerin ve bu bilgilerin yer aldığı, oluştuğu, işletildiği ve iletildiği her bilgi varlığının farkında olması gerekmektedir. Kurumsal bilgi varlıklarının belirlenmesi, bu varlıklara ilişkin risk değerlendirme çalışmalarının yapılması, tespit edilen risklere ilişkin etkin bir risk yönetimi süreci işletilmesi kurumsal bilgi güvenliği yönetim sürecini oluşturan önemli adımlardır.

Kurumlar bilgi güvenliğini sağlamaya yönelik yürütecekleri çalışmalara başlarken ilk olarak her türlü bilgi güvenliği faaliyetine ilişkin kuralları ortaya koymalı ve dokümanete etmelidir. Bilgi güvenliğinin sağlanması amacıyla yapılması gereken çalışmaların planlama, uygulama ve sürekli iyileştirme aşamaları için ihtiyaç duyulan kuralların yazılı olarak hazırlanması gerekmektedir. Bu doğrultuda politika, prosedür, kılavuz, talimat gibi pek çok yol gösterici nitelikteki doküman hazırlanabilmektedir. Bu dokümanların temelini bilgi güvenliği politikası oluşturmaktadır. Güvenlik politikaları kurum veya kuruluşlarda kabul edilebilir güvenlik seviyesinin tanımlanmasına yardım eden, tüm çalışanların ve ortak çalışma içerisinde bulunan diğer kurum ve kuruluşların uyması gereken kurallar bütünüdür [2]. Bilgi güvenliği politikasında, bilgi güvenliğinin sağlanabilmesi ve belirlenen hedeflerin amacına ulaşabilmesi için yapılması gerekenler ifade edilmektedir. Kurum ve kuruluşların, bilgi ve teknoloji kullanıcılarının standartlarını, sınırlarını ve sorumluluklarını tanımlayan bir bilgi güvenliği politikası oluşturması; bilgi ihlallerine yönelik tehditleri ele almak için temel bir yaklaşımdır [3]. Bilgi güvenliğinin sağlanması kapsamında hazırlanan tüm dokümanların amacı; bilgi güvenliğinin üç temel unsuru olan gizlilik, bütünlük ve erişilebilirliğin sağlanarak kurumun sahip olduğu kurumsal bilgilerin güvenliğini sağlamaktır.

Dünyada ve buna paralel olarak ülkemizde bilgi güvenliği yönetim süreçlerine yönelik standart, yasal düzenleme ve diğer ilgili çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmaların başında Uluslararası Standardizasyon Örgütü (ISO) tarafından yayımlanan ve dünya genelinde kabul görmüş bir standart olan ISO 27001 Bilgi Güvenliği Yönetim Sistemi (BGYS) standardı (Standart) gelmektedir. Standart, bir BGYS kurulması, uygulanması, sürdürülmesi ve sürekli iyileştirilmesi için şartları ortaya koymak amacıyla hazırlanmıştır. Bilgi güvenliği politika dokümanının hazırlanması Standartın öncelikli güvenlik maddelerinin başında gelmektedir.

Ülkemizde Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı (UDHB) tarafından 2017 yılında KamuNet Ağına Bağlanma ve KamuNet Ağının Denetimine İlişkin Usul ve Esaslar Hakkında Tebliğ (Tebliğ) yayımlanmıştır. Tebliğ’de KamuNet’e dahil olmak için asgari gereksinimler belirtilmektedir. Bu gereksinimlerin başında KamuNet’e dahil olacak kamu kurumlarının ISO 27001 uyumlu bir BGYS kurarak tüm süreçler ile ilgili politika ve diğer ilgili dokümanlarını oluşturması ifade edilmektedir.

Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı (UAB) tarafından dönemsel olarak yayımlanan Ulusal Siber Güvenlik Stratejisi ve Eylem Planı’nda (Plan) da kamu kurumlarında BGYS süreçlerinin etkinleştirilmesi ve BGYS’nin yaygınlaştırılmasına yönelik ifadeler yer almaktadır. 2013-2014 Planı “Kamu Bilgi Güvenliği Programı maddesi” kapsamında “bilgi ve iletişim sistemlerinde bulunan güvenlik zafiyetleri, sistemlerin hizmet dışı kalması ve kötüye kullanılmasının engellenebilmesi amacıyla dönemin UDHB koordinasyonu ile Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) Bilişim ve Bilgi Güvenliği İleri Teknolojiler Araştırma Merkezi (BİLGEM) Siber Güvenlik Enstitüsü (SGE) tarafından ‘Kamu Kurumlarının Uyması Gereken Asgari Bilgi Güvenliği Kriterleri’” dokümanı hazırlanmıştır [8]. Bilgi güvenliği kriterlerinin yer aldığı dokümanda, tüm kurumlar tarafından bilgi güvenliği politika dokümanının yayımlanması gerektiği açıkça ifade edilmektedir.

Diğer önemli çalışma ise Cumhurbaşkanlığı Dijital Dönüşüm Ofisi (CB DDO) uhdesinde hazırlanan ve yayınlanan Bilgi ve İletişim Güvenliği Rehberi (Rehber)’dir. Söz konusu Rehber, 6 Temmuz 2019 tarihli Cumhurbaşkanlığı Bilgi ve İletişim Güvenliği Tedbirleri Genelgesi (Genelge) uyarınca hazırlanarak Temmuz 2020’de yayımlanmıştır [9]. Genelge’de tüm kurumların Rehber’e uygun hareket etmesi gerektiği vurgulanmıştır. Rehber’de [10] kurumların yürüttükleri BGYS çalışmalarına rehber uygulama sürecinin entegre edilmesi ve yürütülen risk değerlendirme faaliyetlerinde Rehber’de tanımlanan tedbirlerin uygulanması gerektiği ifade edilmektedir. Rehber’de yer alan tedbirlerde, bilgi güvenliği politikası ve bu kapsamda gerekli olan diğer ilgili dokümanların hazırlanması gerektiği ve dokümanlarda asgari olarak nelerin yer alması gerektiği belirtilmektedir.

Bilgi güvenliği yalnızca bilgi sistemlerinin güvenliğini içermemektedir. Kurumsal bilgi güvenliği insan faktörü, eğitim, teknoloji gibi birçok faktörün etki ettiği tek bir çatı altında yönetilmesi zorunlu olan karmaşık süreçlerden oluşmaktadır. Bu nedenle bilginin iyi bir şekilde güvence altına alınması ve etkin bir şekilde yönetilmesi önemlidir [11]. Bilgi güvenliğine yönelik güvenlik risk ve açıklıkları bilgi sistemlerini yöneten kimselerden kaynaklanabileceği gibi sistemdeki yazılım, donanım, vb. unsurlardan da kaynaklanabilmektedir [12]. Bilgi sistemlerinin güvenliğinde donanım, yazılım, insan faktörü, veriler ve dış ortamın etkileri gibi tüm parçalarının güvenliği göz önünde bulundurulmalıdır [13]. Genel olarak bilgi güvenliğinin sağlanması insan faktörlü etkiler ve bilgi sistemlerinin güvenliği olarak iki ana hususun birlikte değerlendirilmesi olarak ele alınabilmektedir.

Kurumlar tarafından bilgi güvenliği alanında yürütülen faaliyetlerin incelenmesi amacıyla hazırlanan çalışmalara bakıldığında, bilgi güvenliği kapsamına giren ve kurumların bilgi güvenliği politikalarında yer alan temel güvenlik konularından bilhassa eğitim ve farkındalık faaliyetleri vb. ekseninde insan faktörlü etkiler üzerine odaklanıldığı görülmektedir. Özdemir [12] çalışmasında, kamu çalışanlarının bilgi güvenliği farkındalıklarını ortaya koymayı amaçlamış olup bu doğrultuda yürüttüğü çalışmanın sonucunda kamu çalışanlarının orta seviyede bilgi güvenliği farkındalığına sahip olduğunu ifade etmiştir. Kapanoğlu [14] çalışmasında, öğretmenlerin interneti güvenli kullanım durumlarını ve bilgi güvenliği farkındalık düzeylerini belirlemeyi amaçlamış ve öğretmenlerin bilgi güvenliği farkındalık düzeylerinin orta düzeyde olduğu sonucuna varmıştır. Benzer şekilde Solmaz [15] çalışmasında, devlet üniversitelerinin eğitim fakültelerinde öğrenim gören öğretmen adaylarının siber güvenlik farkındalık düzeylerini incelemiştir. Araştırmada öğretmen adaylarının siber bilgi güvenliği farkındalıkları ve dijital vatandaşlık düzeylerinin ortalamasının üstünde bir seviyede olduğu sonucuna ulaşılmış ve bilgi ve iletişim teknolojilerinin her alanda kullanıldığı çağımızda gelecek nesilleri yetiştirecek öğretmen adaylarının dijital vatandaşlık düzeyleri ve siber bilgi güvenliği farkındalık seviyelerinin daha da artırılabilmesi için eğitim fakültelerinde öğretmen adaylarının bu açıdan desteklenmeleri gerektiğini vurgulamıştır. Tuygun [16] çalışmasında, BGYS sertifikasına sahip olan kamu kurumlarında kurum personelinin sistem hakkındaki düşüncelerini incelemeyi amaçlamıştır. Çalışmanın sonucunda BGYS ekip üyelerinin, ISO 27001 süreçlerinin etkin bir şekilde yönetilebilmesi için gereken teknik yeterlilik, eğitim ve sayısal çokluk noktasında takviye ihtiyaçları olduğu yönünde görüş bildirdiklerini ifade ederken, teknik ekip üyelerinin ise teknik yeterlilikler ve sayısal yeterlilik konusunda görüş birliğinde olmadıklarını ifade etmiştir. Henkoğlu [17] çalışmasında,

Ankara’da bulunan 5 devlet 10 vakıf üniversitesinde hassas bilgi varlıkları ve kişisel verilerin korunmasına ilişkin hususları değerlendirmiştir. Çalışma sonucunda, yasal düzenlemelerin yeterli ve önleyici nitelikte olmadığı, üniversitelerde kişisel verilerin korunmasına yönelik politikaların bulunmadığı, mevcut politika ve kurallar içinde kişisel verilerin korunmasına ilişkin maddelere yer verilmediği ve kişisel verileri işleyen personele veri korumaya ilişkin bilinçlendirme eğitimi verilmediği hususlarını ifade etmiştir. Çek [18] çalışmasında, iyi ve etkin bir bilgi güvenliği için kurumsal yönetişimin bir parçası olarak bilgi güvenliği yönetişimi kavramından bahsederek kurumlarda bilgi güvenliği yönetişiminin daha etkin hale getirilmesi için yöntem sunmuştur. Çalışma sonucunda, kurumların bilgi güvenliği yönetişimine tüm çalışanların katılım sağlaması ile iyi ve etkin bir bilgi güvenliği yönetişimi olabileceği ifade edilmiş olup bu doğrultuda önerilerde bulunulmuştur. Şişkin [19] çalışmasında, Ankara’daki üniversite kütüphanelerinin bilgi güvenliği uygulamalarına ve kişisel verilerin korunmasına ilişkin mevcut durumlarını tespit etmeyi amaçlamış olup çalışma sonucunda, “Üniversite kütüphanelerinde bilgi güvenliği ve kişisel verilerin yönetimine dönük karar verme ve uygulama düzeyindeki eksiklikler (politika, konuyla ilgili bilinç ve farkındalık, risk değerlendirmesi gibi konularda) bulunmaktadır.” hipotezini doğrulamıştır. Vural [20] çalışmasında, çoğu kurumda güvenlik eğitimleri ve bilinçlendirme programının olmadığını ve olan kurumlarda ise genellikle kullanıcıları bilgi güvenliğinin neden önemli olduğu konusunda eğitmeyi ve bilinçlendirmeyi başaramadığını belirtmiştir.

Literatüre bakıldığında, bilgi güvenliği politikalarında yer alan ağ ve sistem güvenliği, uygulama güvenliği, e-posta güvenliği, parola güvenliği, fiziksel güvenlik gibi temel güvenlik konularının kurumlar tarafından yerine getirilme durumu noktasında yürütülmüş olan çalışmaların ve bu doğrultuda kurumların hazırlamış oldukları bilgi güvenliği politikalarının bütüncül olarak ele alındığı bir çalışmanın bulunmadığı görülmektedir. Ayrıca literatürdeki bazı çalışmalarda da kamu kurumlarının bilgi güvenliği çalışmalarının etkinliği konusunda araştırma yapılması gerekliliğinden bahsedilmektedir.

Tuygun [16] çalışmasında, kurumsal bilgi güvenliği yönetimlerinin veya bu sistemlerin herhangi bir standardizasyona uyumlu hale getirilmiş olmasının, kurumsal süreçlerde bilgi güvenliğinin tam olarak sağlandığı anlamına gelmediğinin açık olduğu varsayımını yapmış ve kurumsal bilgi güvenliği yönetimlerinin etkinliğinin sorgulanması gerektiğini de vurgulamıştır. Özcan [21] çalışmasında, kurumsal bilgi güvenliğinin sağlanmasında uygulanan standartların kimi zaman yetersiz kalabileceğini, kurumsal bilgi güvenliği seviyesinin güncel durumunun belirlenmesi amacıyla iç ve dış ortamlardan bağımsız uzman kuruluşlar tarafından denetiminin yapılması gerektiğini, kurumsal bilgi güvenliğinin yönetilmesi zor bir süreç olduğu ve her zaman iyileştirmelere ihtiyaç duyulduğunu belirtmiştir. Çetinkaya [22] çalışmasında, bilgi güvenliğinin, donanım ve yazılım ile sağlanan çözümlerle sağlanmakta olduğunu fakat bunun etkinliğinin ölçülmediğini ifade etmektedir.

Literatür araştırması sonucundan da anlaşılacağı üzere, kamu kurumlarının bilgi güvenliği politikalarında yer alan temel bilgi güvenliği konularının etkinliğinin bütünsel olarak ele alınarak analiz edilmesi hususunda bir çalışma yapılması gerekliliği bulunmaktadır.

Söz konusu ihtiyaçtan yola çıkılarak bu çalışmada, kamu kurumlarının sahip oldukları bilgilerin güvenliğini sağlamak adına yürütmüş oldukları bilgi güvenliği çalışmalarının ve bu doğrultuda hazırladıkları bilgi güvenliği politikalarının, kurumsal bilgi güvenliğinin sağlanması açısından etkinliğinin ortaya konulması üzerine odaklanılmıştır. Etkinliğin tespit edilmesi için kamu kurumu çalışanları katılımı ile bir anket çalışması gerçekleştirilmiştir.

Anket çalışmasında etkinlik değerlendirilmesi yapılırken, kurumların sahip olduğu verilerin kritiklik düzeyleri ve iş süreçlerinde bilgi sistemleri kullanılma yoğunluğu değişkenleri belirlenmiş ve bu değişkenlere göre sonuçların istatistiksel açıdan anlamlı düzeyde farklılık gösterip göstermeyeceği tespit edilmeye çalışılmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde araştırma yöntemine, üçüncü bölümünde araştırma bulgularına ve son bölümünde araştırma sonuçlarına yer verilmiştir.

2. MATERYAL VE METOTLAR (MATERIALS AND METHODS)

Bu bölümde; araştırmanın amacı, önemi, modeli, evren ve örnekleme, kapsam ve sınırlılıkları, varsayımları, veri toplama aracı, çalışma grubu ve araştırma verilerinin analizine ilişkin yapılan istatistiksel testler ele alınmıştır.

2.1. Araştırmanın Amacı ve Önemi (Objective and Importance of the Research)

Bu çalışma ile kamu kurumlarının bilgi güvenliği alanında yürütmüş olduğu çalışmaların, almış olduğu kararların ve hazırlamış olduğu politikaların ulusal bilgi güvenliğinin önemli bir parçası olan kurumsal bilgi güvenliğinin sağlanması açısından etkinliğinin analiz edilmesi amaçlanmıştır.

Bu temel amaç doğrultusunda oluşturulan araştırma soruları aşağıda belirtilmiştir:

- Kamu kurumlarının bilgi güvenliği politikalarının etkinliği ile ilgili mevcut durum nedir?
- Kamu kurumlarının sahip olduğu verilerin kritiklik düzeyi ile bilgi güvenliği politikalarının etkinliği arasında istatistiksel açıdan anlamlı düzeyde bir farklılık bulunmakta mıdır?
- Kamu kurumlarının iş süreçlerinde bilgi sistemleri kullanılma yoğunluğu ile bilgi güvenliği politikalarının etkinliği arasında istatistiksel açıdan anlamlı düzeyde bir farklılık bulunmakta mıdır?

Araştırmanın amacından yola çıkılarak belirlenen yokluk ve varlık hipotezleri aşağıda verilmiştir:

Kurumların sahip olduğu verilerin kritiklik düzeyleri için;

- H_{0a}: Kamu kurumlarının sahip olduğu verilerin kritiklik düzeyi ile bilgi güvenliği politikalarının etkinliği arasında istatistiksel açıdan anlamlı düzeyde bir farklılık bulunmamaktadır.
- H_{1a}: Kamu kurumlarının sahip olduğu verilerin kritiklik düzeyi ile bilgi güvenliği politikalarının etkinliği arasında istatistiksel açıdan anlamlı düzeyde bir farklılık bulunmaktadır.

Kurumların iş süreçlerinde bilgi sistemleri kullanılma yoğunluğu için;

- H_{0b}: Kamu kurumlarının iş süreçlerinde bilgi sistemleri kullanılma yoğunluğu ile bilgi güvenliği politikalarının etkinliği arasında istatistiksel açıdan anlamlı düzeyde bir farklılık bulunmamaktadır.
- H_{1b}: Kamu kurumlarının iş süreçlerinde bilgi sistemleri kullanılma yoğunluğu ile bilgi güvenliği politikalarının etkinliği arasında istatistiksel açıdan anlamlı düzeyde bir farklılık bulunmaktadır.

Bu çalışma, yasa koyuculara ve bilgi güvenliği alanında düzenleme ve/veya denetleme yetkisine sahip olan ilgili otoritelere, yürütecekleri çalışmalarda ışık tutması ve ilgili otoritelerce yapılan mevcut düzenlemelerin, atılan adımların ve alınan kararların ne derece yerinde, yeterli ve etkin olduğunun değerlendirilmesinin yapılabilmesi açısından önemlidir.

2.2. Araştırmanın Modeli (Model of the Research)

Araştırmada yöntem olarak, olgu ve olayları nesnelleştirerek gözlemlenebilir, ölçülebilir ve sayısal olarak ifade edilebilir bir şekilde ortaya koymaya yarayan [23] nicel araştırma yöntemi kullanılmıştır. Araştırmada kamu kurumlarının bilgi güvenliği politikalarının kurumsal bilgi güvenliğinin sağlanması açısından etkinliğine ilişkin mevcut durumunun ortaya konulması amaçlandığından, hali hazırda var olan bir durumun var olduğu haliyle betimlenmesinde kullanılan [24] betimsel tarama modeli kullanılmıştır. Bu kapsamda mevcut durumun analiz edilebilmesi için anket çalışması yapılmıştır.

2.3. Araştırma Evreni ve Örnekleme (Research Population and Sample)

“Elektronik Kamu Bilgi Yönetim Sistemi”nde (KAYSİS)¹ yer alan bakanlıklar ve bu bakanlıklar ile bağlı/ilgili/ilişkili kurumlar olmak üzere 17 kamu kurumu araştırma evrenini oluşturmaktadır. Adalet Bakanlığı, Aile ve Sosyal Hizmetler Bakanlığı, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Dışişleri Bakanlığı, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Gençlik ve Spor Bakanlığı, Hazine ve Maliye Bakanlığı, İçişleri Bakanlığı, Kültür ve Turizm Bakanlığı, Milli Eğitim Bakanlığı, Milli Savunma Bakanlığı, Sağlık Bakanlığı, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Tarım ve Orman Bakanlığı, Ticaret Bakanlığı ve Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı ve bu bakanlıklar ile bağlı/ilgili/ilişkili kurumlar araştırma evrenini oluşturan kurumlardır. Araştırma evreninin geniş olması sebebiyle örneklem alma yoluna gidilmiştir.

Örnekleme, evrene genelleme yapmaya olanak verecek biçimde evrenden belli sayıda bireyin seçilmesiyle oluşan katılımcı grubudur [25]. Araştırmada olasılıklı örnekleme yöntemlerinden biri olan küme örnekleme yöntemi kullanılmıştır. Küme örnekleme yönteminde, öncelikle evreni oluşturan birimler değil bu birimlerin bağlı bulunduğu kümeler ele alınır [26]. Küme örnekleme tekniği, evrene giren bütün bireylerin listelenemediği ancak evrenin kendiliğinden alt gruplara ayrılmış olduğu ve bu alt gruplara giren bireylerin listelenemediği durumlarda son derece kullanışlıdır [27]. Küme örnekleme yöntemiyle seçilen kurumlar, kritik altyapı sektörlerini düzenleyen ve bu kapsamda olmayan kurumlar olacak şekilde gruplara ayrılmıştır. CB DDO Rehber’de [10] kritik altyapı “işlediği bilgi/verinin gizliliği, bütünlüğü veya erişilebilirliği bozulduğunda can kaybına, büyük ölçekli ekonomik zarara, ulusal güvenlik açıklarına veya kamu düzeninin bozulmasına yol açabilecek bilişim sistemlerini barındıran altyapılardır.” şeklinde tanımlanmıştır. Asgari BG Kriterleri’nde [7] kamu kurumlarını kritik bilgi sistemleri² barındıran kritik kamu kurumları ve barındırmayan kurumlar diğer kurumlar olmak üzere sınıflandırılmıştır. Sektörel SOME Kurulum ve Yönetim Rehberi (SOME Rehberi)’nde [28] kritik kamu hizmetleri³ ifade edilmektedir. Örnekleme belirlenirken kritik altyapı sektörlerini düzenleyen ve bu kapsamda olmayan kurumlara Rehber’de ve SOME Rehberi’nde yer alan tanımlardan ve Asgari BG Kriterleri’nde yapılan sınıflandırmadan yola çıkılarak karar verilmiştir. Söz konusu sınıflandırmaya göre araştırma evrenini oluşturan 17 kamu kurumundan 12’si kritik altyapı sektörlerini düzenleyen kamu kurumları, 5’i ise bu kapsamda olmayan kamu kurumları olacak şekilde gruplandırılmıştır. Bu doğrultuda, araştırma evrenini oluşturan kurumlardan kritik altyapı sektörlerini düzenleyen kamu kurumlarından 4 tane, bu kapsamda olmayan kamu kurumlarından 2 tane seçilerek oransal olarak eşit bir dağılım gösterecek şekilde örnekleme belirlenmiştir.

Örnekleme olarak seçilen toplam 6 kamu kurumunda, bilgi işlem/bilgi sistemleri birimi çalışanlarından oluşan veya bilgi teknolojileri/güvenliği projelerinde görev alan 121 katılımcı araştırmaya katılım sağlamıştır.

2.4. Araştırmadaki Varsayımlar (Assumptions in Research)

Araştırmada aşağıda belirtilen varsayımlar kabul edilmiştir:

- Araştırmaya katılan katılımcıların ankete verdikleri yanıtlar katılımcıların gerçek görüşlerini yansıtmaktadır.

¹ <https://www.kaysis.gov.tr/>

² Bir bilgi sisteminin bozulması veya yetkisiz erişimle karıştırılması halinde;

a. Enerji, su, acil yardım hizmetleri, gıda tedariki ve benzeri hayati hizmetlerin durması sonucunda can kaybı oluşması veya bazı bölgelerin boşaltılması,

b. Para piyasalarının durması, ulaştırma sistemlerinden birinin durması veya diğer nedenlerle ulusal ekonominin ciddi düzeyde zarara uğraması,

c. Ulusal güvenliğin sektöre uğraması söz konusu oluyorsa o bilgi sistemi kritiktir [7].

³ Kritik Kamu hizmetleri; vatandaşın gündelik hayatında sıklıkla etkileşimde bulunduğu nüfus, tapu, vergi, ticaret, sosyal güvenlik, sağlık (acil servis, tıbbi hizmetler, kan ve organ bankacılığı ve halk sağlığı), gıda, güvenlik (polis, jandarma, sahil güvenlik), yollar ve köprüler, barajlar, maaş ve adli işlemlerin yapıldığı ve kayıtlarının bulunduğu kritik sistemlerden sunulan servislerdir [28].

- Araştırmaya, örnekleme oluşturan kamu kurumlarının bilgi işlem/bilgi sistemleri birimi çalışanları ve/veya bilgi teknolojileri/güvenliği projelerinde görev alan çalışanlar katılmıştır.
- Örneklem alınan her bir kamu kurumu evreni yeterince temsil edebilecek durumdadır.

2.5. Araştırmanın Kapsamı ve Sınırlılıkları (Scope and Limitations of the Research)

Araştırma, araştırma evrenini oluşturan kamu kurumlarından uygun örneklem yöntemiyle seçilen 6 kamu kurumunu kapsamaktadır. Araştırma kapsamındaki kamu kurumlarında anket çalışması uygulanmıştır. 121 katılımcı ankete katılım sağlamıştır. Bu nedenle uygulanan anket çalışması, ankete katılım sağlayanların sayısı ile sınırlıdır.

2.6. Veri Toplama Aracı (Data Collection Tool)

Araştırma verilerinin toplanması için anket tekniğinden yararlanılmıştır. Anket, bireylerin demografik özelliklerini ve tercihlerini belirlemek için ya da bir konu, durum, olay hakkında bilgi toplamaya yönelik çeşitli soruların bir araya getirilmesiyle oluşturulan veri toplama aracıdır [29]. Kamu kurumlarının bilgi güvenliği politikalarının kurumsal bilgi güvenliğinin sağlanması açısından etkinliğinin analiz edilebilmesi için 55 sorudan oluşan bir anket geliştirilmiştir. Ankette yer alan maddeler, istatistik alanında uzman 2 ve bilgi güvenliği, sistem yönetimi ve yazılım geliştirme alanlarında uzman 3 teknik kişiyle incelenmiştir. Yazım yanlışı ve dilbilgisi hataları giderilmiştir. Alan uzmanlarının görüşleri alınarak geçerlik ve kullanılabilirlik için gerekli görülen düzeltmeler yapılmıştır. Anket soruları; hali hazırda bilgi güvenliği politikası bulunan kurumların politikaları, CB DDO Rehber, Rehber'e ilişkin 2019 yılında yayınlanmış olan Genelge, ISO 27001 BGYS Standardı EK-A kontrol maddeleri ve TÜBİTAK BİLGEM Yazılım Teknolojileri Araştırma Enstitüsü (YTE) tarafından Ocak 2021'de yayınlanan Bilgi Güvenliği Yönetimi Rehberi⁴ incelenerek hazırlanmıştır. Sorular belirlenirken, bilgi güvenliği politikalarında ortak olan ve kurumların yapısına göre değişmeyecek nitelikte olan hususlar baz alınmıştır. Anket üç bölüme ayrılmıştır. Anketin birinci bölümünde katılımcılardan demografik bilgiler istenmektedir. Demografik bilgiler; cinsiyet, yaş, eğitim düzeyi, görev yapılan kurumda çalışma süresi ve çalışma alanı bilgilerinden oluşmaktadır. Anketin ikinci bölümünde kişilerin görev yaptıkları kurumun yapısını anlamaya yönelik sorulardan oluşan kurumsal bilgiler yer almaktadır. Kurumsal bilgiler, kurumun sahip olduğu verilerin kritiklik düzeyi ve kurumun iş süreçlerinde bilgi sistemleri kullanıma yoğunluğu bilgilerinden oluşmaktadır. Anketin üçüncü bölümünde ise "Bilgi Güvenliği Politikalarının Etkinliği" başlıklı "Kesinlikle Katılıyorum", "Katılıyorum", "Ne Katılıyorum Ne Katılmıyorum", "Katılmıyorum" ve "Kesinlikle Katılmıyorum" dereceli 5'li likert ölçeği kullanılarak hazırlanan sorular yer almaktadır. "Bilgi Güvenliği Politikalarının Etkinliği" soruları, 17 alt ana başlıkta ele alınan 48 sorudan oluşmaktadır.

Anket Google Formlar web uygulaması aracılığıyla çevrimiçi olarak oluşturulmuştur.

2.7. Verilerin Analizi (Analysis of Data)

Verilerin analiz edilmesinden önce veri toplama aracı olarak kullanılan anketin güvenilir olup olmadığının tespit edilmesi için geçerlik güvenilirlik testleri yapılmıştır. Güvenirlik, ele alınan ölçüm aracının benzer şartlarda benzer girdilerle yapılan değişik ölçümlerde benzer sonuçları vermesidir [31]. Likert tipi ölçümlerde ölçeğin iç tutarlılığını belirlemede Cronbach Alpha yöntemi kullanılır [32]. Bu yöntemle göre aşağıdaki güvenilirlik düzeyi aşağıdaki şekilde belirlenir:

- $0,00 \leq \alpha \leq 0,40$ ise ölçek güvenilir değildir.
- $0,40 \leq \alpha \leq 0,60$ ise ölçek düşük güvenilirliktedir.
- $0,60 \leq \alpha \leq 0,80$ ise ölçek oldukça güvenilirdir.
- $0,80 \leq \alpha \leq 1,00$ ise ölçek yüksek derecede güvenilir bir ölçektir.

Araştırmada uygulanan anket için geçerlik güvenilirlik analizi sonucu Tablo 1'de verilmektedir.

⁴ Detaylı bilgi için bkz. "Bilgi Güvenliği Yönetimi Rehberi" [30].

Tablo 1. Anket güvenilirlik analizi

Güvenirlik Katsayısı	
Cronbach's Alpha	Madde Sayısı
,960	48

Tablo 1’de görüldüğü üzere Cronbach Alpha (α) güvenilirlik katsayısı anketin tümü için ,96 olarak hesaplanmıştır. Bu sebeple; anketin yüksek derecede güvenilir olduğu söylenebilir. Anketten elde edilen verilerin dağılım normalliğinin belirlenmesi amacıyla Kolmogorov-Smirnov ve Shapiro-Wilk normallik testleri uygulanmıştır. Anketten elde edilen verilere uygulanan basıklık (kurtosis) ve çarpıklık (skewness) katsayılarının -2, +2 arasında olduğu görülmüştür. Bu sebeple verilerin normal dağılım gösterdiği varsayılmıştır [33]. Verilere uygulanan Kolmogorov-Smirnov ve Shapiro-Wilk normallik testleri sonucunda ise p değeri 0,05 anlamlılık değerinin üzerinde olduğu için verilerin normal dağıldığı hipotezi kabul edilmiş olup araştırma verilerinin analiz edilmesinde normal dağılım gösteren veriler için uygulanan parametrik testler tercih edilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSION)

Bu bölümde, ankete katılım sağlayan katılımcılara ilişkin demografik özelliklere ve araştırma amacına yönelik belirlenen araştırma sorularına ait toplanan verilerle ilgili bulgulara ve değerlendirmelere yer verilmiştir.

3.1. Demografik Bilgiler (Demographic Information)

Ankete katılım sağlayan katılımcılara ait demografik özellikler Tablo 2’de verilmektedir.

Tablo 2. Katılımcıların demografik özellikleri

Bağımsız Değişken	Grup	N = 121	Yüzde (%)
Cinsiyet	Kadın	42	34,70
	Erkek	79	65,30
Yaş	21-30	31	25,60
	31-40	54	44,60
	41-50	27	22,30
	50 yaş üzeri	9	7,40
Eğitim Düzeyi	Lise ve altı	1	0,80
	Ön Lisans	3	2,50
	Lisans	63	52,10
	Yüksek Lisans	42	34,70
	Doktora	12	9,90
Görev Yapılan Kurumda Çalışma Süresi	1 yıl ve daha az	8	6,60
	2-5 yıl	26	21,50
	6-10 yıl	49	40,50
	11-14 yıl	21	17,40
	15 yıl ve üzeri	17	14,00
Görev Yapılan Kurumda Çalışma Alanı	Yazılım Geliştirme	28	23,10
	Yazılım Kalite ve Test	2	1,70
	Mobil Uygulama Geliştirme	4	3,30
	Ağ ve Sistem Yönetimi	14	11,60
	Bilgi Güvenliği/Siber Güvenlik	33	27,30
	Veri Tabanı Yönetimi	7	5,80
	Bilgi İşlem Teknik Destek	6	5,00

	Bilgi Teknolojileri Denetimi	3	2,50
	Bilgi Teknolojileri Proje Yönetimi	5	4,10
	Diğer	19	15,70

Tablo 2 incelendiğinde katılımcıların %34,70'i (N=42) kadın ve %65,30'u (N=79) erkektir. Araştırmaya katılan katılımcıların yaş gruplarına bakıldığında, %25,60'ı (N=31) 21-30 yaş grubunda, %44,60'ı (54) 31-40 yaş grubunda, %22,30'u (N=27) 41-50 yaş grubunda ve %7,40'ı (9) 50 yaş grubundadır. Tabloda görüleceği üzere, katılımcıların %0,80'i (N=1) lise ve altı öğrenim düzeyine sahip, %2,50'si (N=3) ön lisans, %52,10'ı (N=63) lisans, %34,70'i (N=42) yüksek lisans ve %9,90'ı (N=12) doktora öğrenim düzeyine sahiptir. Katılımcıların görev yaptıkları kurumdaki çalışma süresine bakıldığında, %6,60'ı (N=8) 1 yıl ve daha az, %21,50 (N=26) 2-5 yıl, %40,50'si (N=49) 6-10 yıl, %17,40'ı (N=21) 11-14 yıl ve %14'ü (N=17) 15 yıl ve üzeri çalışma süresine sahiptir. Katılımcıların %23,10'u (N=28) yazılım geliştirme, %1,70'i (N=2) yazılım kalite ve test, %3,30'u (N=4) mobil uygulama geliştirme, %11,60'ı (N=14) ağ ve sistem yönetimi, %27,30'u (N=33) bilgi güvenliği/siber güvenlik, %5,80'i (N=7) veri tabanı yönetimi, %5,00'ı (N=6) bilgi işlem teknik destek, %2,50'si (N=3) bilgi teknolojileri denetimi, %4,10'u (N=5) bilgi teknolojileri proje yönetimi alanlarında çalışmaktadır. %15,70'i ise (N=19) çalışma alanını diğer olarak işaretlemiştir.

3.2. Bilgi Güvenliği Politikalarının Etkinliğine İlişkin Bulgular (Findings Regarding the Effectiveness of Information Security Policies)

Anket sonuçları değerlendirilirken; “Kesinlikle Katılıyorum” seçeneği 5, “Katılıyorum” seçeneği 4, “Ne Katılıyorum Ne Katılmıyorum” seçeneği 3, “Katılmıyorum” seçeneği 2 ve “Kesinlikle Katılmıyorum” seçeneği 1 olacak şekilde tüm seçenekler için katsayılar belirlenmiştir. Katılımcıların bilgi güvenliği politikalarının etkinliği anketinden elde ettikleri katsayı ortalamaları Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Bilgi güvenliği politikalarının etkinliğine ilişkin bulgular

Alt Ana Başlıklar	Anket Soru Sayısı	Katsayı Ortalaması	Yüzde Oranı
1. Bilgi Güvenliği Politika Dokümanı	4	4,13	82,70
2. Bilgi Güvenliği Organizasyonu ve Sorumluluklar	6	3,63	72,60
3. Farkındalık ve Eğitim	2	3,30	66,00
4. Varlık Yönetimi	2	3,62	72,50
5. Risk Yönetimi	2	3,38	67,70
6. Parola Güvenliği	4	4,27	85,55
7. E-posta Güvenliği	1	4,31	86,20
8. Ağ, Sistem ve Erişim Güvenliği	9	4,01	80,36
9. Uygulama Güvenliği	3	3,96	79,27
10. İşletim Güvenliği	3	3,52	70,53
11. İş Sürekliliği Yönetimi	1	3,81	76,20
12. Tedarikçi İlişkilerinde Bilgi Güvenliği	2	4,11	82,20
13. Fiziksel Güvenlik	2	4,29	85,80
14. Temiz Masa Temiz Ekran	1	4,02	80,40
15. Taşınabilir Cihaz ve Ortam Güvenliği	4	3,82	76,40
16. İnsan Kaynakları Güvenliği	1	3,94	78,80
17. Bilgi Güvenliği İhlal Olay Yönetimi	1	3,89	77,80
Toplam	48	3,89	77,80

Tablo 3'te anketin alt ana başlıkları, her ana başlığa ait anketteki soru sayısı, her alt ana başlıktaki sorular için katılımcılar tarafından verilen cevapların katsayı ortalamaları ve bu ortalamaların yüzde oranları verilmiştir. Örnek olarak tablodan; ağ, sistem ve erişim güvenliğine ilişkin ankette 9 soru sorulduğu, bu sorulara ilişkin katılımcılar tarafından verilen cevapların katsayılarının ortalamasının 4,01 olduğu ve bu değerlerin %80,36'ya karşılık geldiği çıkarılabilmektedir.

Tablo 3 bütünüyle değerlendirildiğinde, anketteki tüm sorular için katsayı ortalamasının 3,89 olduğu görülmektedir. Buna bağlı olarak, seçilen örneklem kümesinde yer alan kamu kurumlarının bilgi güvenliği politikalarının %77,80 oranında etkin olduğu söylenebilir. Ayrıca, en etkin olan güvenlik konularının 4,31 katsayısı ve %86,20 oranı ile e-posta güvenliği ve 4,29 katsayısı ve %85,80 oranı ile fiziksel güvenlik olduğu ve en az etkin olan güvenlik konularının 3,30 katsayısı ve %66,00 oranı ile farkındalık ve eğitim ve 3,38 katsayısı ve %67,70 oranı ile risk yönetimi olduğu görülmektedir.

3.3. Bilgi Güvenliği Politikalarının Etkinliğinin Verilerin Kritiklik Düzeyine Göre Değişimine İlişkin Bulgular (Findings Regarding the Change in the Effectiveness of Information Security Policies According to the Criticality Level of the Data)

Katılımcılar tarafından ankette yer alan sorulara verilen cevapların katsayı ortalamalarının, kamu kurumlarının sahip olduğu verilerin kritiklik düzeylerine göre istatistiksel açıdan anlamlı düzeyde farklılık gösterip göstermediğinin belirlenmesi amacıyla tek yönlü varyans analizi (ANOVA) tekniğinden yararlanılmıştır. Verilere söz konusu tekniğin uygulanması sonucu elde bulgular Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Bilgi güvenliği politikalarının etkinliğinin verilerin kritiklik düzeyine göre değişimine ilişkin bulgular

Kurumun Sahip Olduğu Verilerin Kritiklik Düzeyi	Grup	Frekans (f)	Ortalama	Oran (%)	Standart Sapma
	Çok Düşük	10	3,6104	72,20	0,48473
	Düşük	17	3,6728	73,40	0,43829
	Orta	36	3,8137	76,20	0,53944
	Yüksek	33	3,9122	78,20	0,61387
	Çok Yüksek	25	4,2575	85,00	0,55309
	Total	121	3,8957	77,80	0,57703
	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F	p
Gruplar Arası	5,182	4	1,296	4,322	0,003
Grup İçi	34,774	116	0,3		
Toplam	39,956	120			

Tablo 4'te kurumun sahip olduğu verilerin kritiklik düzeyleri grupları, her grup için ankete kaç katılımcının yer aldığını gösteren frekans değeri, katılımcılar tarafından verilen cevapların katsayı ortalamaları, standart sapma değerleri, kareler toplamı, serbestlik derecesi, kareler ortalaması, test istatistiği (F değeri) ve anlamlılık değeri (p) verilmiştir.

Tablo 4'te frekans değerlerine bakılacak olursa, ankete kurumun sahip olduğu verilerin kritiklik düzeyi çok düşük olan 10 katılımcı, düşük olan 17 katılımcı, orta olan 36 katılımcı, yüksek olan 33 katılımcı ve çok yüksek olan 25 katılımcının katılım sağladığı görülmektedir. Katılımcılar tarafından verilen cevapların katsayı ortalamaları değerlendirildiğinde, çok düşük olan grubun 3,6104, düşük olan grubun 3,6728, orta olan grubun 3,8137, yüksek olan grubun 3,9122 ve çok yüksek olan grubun 4,2575 ortalama katsayı değerlerine sahip olduğu ve yüzde oranlarının sırasıyla %72,20, %73,40, %76,20, %78,20 ve %85,00 olduğu görülmektedir. Böylece kurumun sahip olduğu verilerin kritiklik düzeyi arttıkça katsayı ortalamaları değerlerinin de arttığı, dolayısıyla bilgi güvenliği politikalarının etkinliğinin arttığı söylenebilmektedir.

Tablo 4'te görüldüğü üzere p anlamlılık değeri 0,003 olarak hesaplanmıştır. Bu durumda $p < 0,05$ olduğu için gruplar arasında istatistiksel açıdan anlamlı farklılıklar bulunduğu belirlenmiştir. Hangi gruplar arasında anlamlı farklılıklar bulunduğuna ilişkin bilgiler Tablo 5'te verilmiştir.

Böylece "H1a: Kamu kurumlarının sahip olduğu verilerin kritiklik düzeyi ile bilgi güvenliği politikalarının etkinliği arasında istatistiksel açıdan anlamlı düzeyde bir farklılık bulunmaktadır." hipotezi kabul edilmiştir.

Tablo 5. Kurumun sahip olduğu verilerin kritiklik düzeyi bağımsız değişkeninin gruplarının karşılaştırılması

Kurumun Sahip Olduğu Verilerin Kritiklik Düzeyi		Ortalama Fark	p
Çok Düşük	Düşük	-0,06238	0,999
	Orta	-0,20324	0,837
	Yüksek	-0,30183	0,547
	Çok Yüksek	-,64708*	0,017
Düşük	Çok Düşük	0,06238	0,999
	Orta	-0,14086	0,906
	Yüksek	-0,23945	0,587
	Çok Yüksek	-,58471*	0,008
Orta	Çok Düşük	0,20324	0,837
	Düşük	0,14086	0,906
	Yüksek	-0,09859	0,945
	Çok Yüksek	-,44384*	0,019
Yüksek	Çok Düşük	0,30183	0,547
	Düşük	0,23945	0,587
	Orta	0,09859	0,945
	Çok Yüksek	-0,34525	0,129
Çok Yüksek	Çok Düşük	,64708*	0,017
	Düşük	,58471*	0,008
	Orta	,44384*	0,019
	Yüksek	0,34525	0,129

Tablo 5'e bakılacak olursa, çok düşük ile çok yüksek grubu için p değeri 0,017 olduğu görülmekte ve $p < 0,05$ olduğu için iki grup arasında anlamlı farklılık olduğu değerlendirilmektedir. Benzer şekilde, düşük ile çok yüksek grubu ($p = 0,008$) ve orta ile çok yüksek grubu ($p = 0,019$) arasında da $p < 0,05$ şartı sağlandığı için anlamlı farklılık olduğu değerlendirilmektedir. Diğer grup eşleştirmeleri için $p < 0,05$ şartı sağlanmadığı için anlamlı farklılık bulunmamaktadır. Örneğin yüksek ile çok yüksek grubu için p değeri 0,129 olduğu görülmekte, böylece iki grup arasında anlamlı farklılık olmadığı değerlendirilmektedir. Tabloda anlamlı farklılık olan gruplar * işareti ile ifade edilmiştir.

Tablo 5'te anlamlı olarak farklılık bulunan grup eşleştirmeleri için ortalama fark değerlerine bakılacak olursa, çok düşük ile çok yüksek arasında ortalama fark değeri 0,64708, düşük ile çok yüksek arasında 0,58471 ve orta ile çok yüksek arasında 0,44384 olacak şekilde büyükten küçüğe sıralanmaktadır. Böylece çok düşük ile çok yüksek grubu arasındaki ortalama fark değeri diğerlerinden daha yüksek olduğu için farklılık düzeyinin diğerlerinden daha anlamlı olduğu değerlendirilmektedir. Benzer şekilde düşük ile çok yüksek grupları arasındaki farklılık düzeyi de orta ile çok yüksek grupları arasındaki farklılık düzeyinden daha anlamlı olduğu değerlendirilmektedir.

3.4. Bilgi Güvenliği Politikalarının Etkinliğinin Bilgi Sistemleri Kullanılma Yoğunluğuna Göre Değişimine İlişkin Bulgular (Findings Regarding the Change in the Effectiveness of Information Security Policies According to the Intensity of Using Information Systems)

Katılımcılar tarafından ankette yer alan sorulara verilen cevapların katsayı ortalamalarının, kamu kurumlarının iş süreçlerinde bilgi sistemleri kullanılma yoğunluğuna göre istatistiksel açıdan anlamlı düzeyde farklılık gösterip göstermediğinin belirlenmesi amacıyla tek yönlü varyans analizi (ANOVA) tekniğinden yararlanılmıştır. Verilere söz konusu tekniğin uygulanması sonucu elde bulgular Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Bilgi güvenliği politikalarının etkinliğinin bilgi sistemleri kullanılma yoğunluğuna göre değişimine ilişkin bulgular

Kurumun İş Süreçlerinde Bilgi Sistemlerinin Kullanılma Yoğunluğu	Grup	Frekans (f)	Ortalama	Oran (%)	Standart Sapma
	Çok Düşük	8	3,7474	74,80	0,42716
	Düşük	15	3,5764	71,40	0,50553
	Orta	22	3,5644	71,20	0,61677
	Yüksek	44	3,9295	78,40	0,49548
	Çok Yüksek	32	4,2637	85,20	0,50967
	Total	121	3,8957	77,80	0,57703
	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F	p
Gruplar Arası	8,503	4	2,126	7,84	<0,001
Grup İçi	31,453	116	0,271		
Toplam	39,956	120			

Tablo 6’da kurumun iş süreçlerinde bilgi sistemlerinin kullanılma yoğunluğu grupları, her grup için ankete kaç katılımcının yer aldığını gösteren frekans değeri, katılımcılar tarafından verilen cevapların katsayı ortalamaları, standart sapma değerleri, kareler toplamı, serbestlik derecesi, kareler ortalaması, test istatistiği (F değeri) ve anlamlılık değeri (p) verilmiştir.

Tablo 6’da frekans değerlerine bakılacak olursa, ankete kurumun iş süreçlerinde bilgi sistemlerinin kullanılma yoğunluğu çok düşük olan 8 katılımcı, düşük olan 15 katılımcı, orta olan 22 katılımcı, yüksek olan 44 katılımcı ve çok yüksek olan 32 katılımcının katılım sağladığı görülmektedir. Katılımcılar tarafından verilen cevapların katsayı ortalamaları değerlendirildiğinde, çok düşük olan grubun 3,7474, düşük olan grubun 3,5764, orta olan grubun 3,5644, yüksek olan grubun 3,9295 ve çok yüksek olan grubun 4,2637 ortalama katsayı değerlerine sahip olduğu ve yüzde oranlarının sırasıyla %74,80, %71,40, %71,20, %78,40 ve %85,20 olduğu görülmektedir. Çok düşük, düşük ve orta gruplarında kurumun iş süreçlerinde bilgi sistemlerinin kullanılma yoğunluğu düzeyi arttıkça katsayı ortalamaları değerlerinin sırasıyla artmadığı görülmektedir. Böylece kurumun iş süreçlerinde bilgi sistemlerinin kullanılma yoğunluğu düzeyi arttıkça bilgi güvenliği politikalarının etkinliğinin her zaman arttığı söylenemez. Ancak orta düzeyden itibaren kurumun iş süreçlerinde bilgi sistemlerinin kullanılma yoğunluğu düzeyi arttıkça katsayı ortalamaları değerleri arttığı için bilgi güvenliği politikalarının etkinliğinin arttığı söylenebilir.

Tablo 6’da görüldüğü üzere p anlamlılık değeri <0,001 olarak hesaplanmıştır. Bu durumda p<0,05 olduğu için gruplar arasında istatistiki açıdan anlamlı farklılıklar bulunduğu belirlenmiştir. Hangi gruplar arasında anlamlı farklılıklar bulunduğu ilişkin bilgiler Tablo 7’de verilmiştir.

Böylece “H1b: Kamu kurumlarının iş süreçlerinde bilgi sistemleri kullanılma yoğunluğu ile bilgi güvenliği politikalarının etkinliği arasında istatistiksel açıdan anlamlı düzeyde bir farklılık bulunmaktadır.” hipotezi kabul edilmiştir.

Tablo 7. Kurumun iş süreçlerinde bilgi sistemleri kullanılma yoğunluğu bağımsız değişkeninin gruplarının karşılaştırılması

Kurumun İş Süreçlerinde Bilgi Sistemlerinin Kullanılma Yoğunluğu		Ortalama Fark	p
Çok Düşük	Düşük	0,17101	0,944
	Orta	0,18300	0,914
	Yüksek	-0,18205	0,893
	Çok Yüksek	-0,51628	0,096
Düşük	Çok Düşük	-0,17101	0,944
	Orta	0,01199	1,000

	Yüksek	-0,35306	0,163
	Çok Yüksek	-,68728*	0,000
Orta	Çok Düşük	-0,18300	0,914
	Düşük	-0,01199	1,000
	Yüksek	-0,36506	0,062
	Çok Yüksek	-,69928*	0,000
Yüksek	Çok Düşük	0,18205	0,893
	Düşük	0,35306	0,163
	Orta	0,36506	0,062
	Çok Yüksek	-0,33422	0,051
Çok Yüksek	Çok Düşük	0,51628	0,096
	Düşük	,68728*	0,000
	Orta	,69928*	0,000
	Yüksek	0,33422	0,051

Tablo 7'ye bakılacak olursa, düşük ile çok yüksek grubu ve orta ile çok yüksek grubu için p değeri 0,000 olduğu görülmekte ve $p < 0,05$ olduğu için ikişerli gruplar arasında anlamlı farklılık olduğu değerlendirilmektedir. Diğer grup eşleştirmeleri için $p < 0,05$ şartı sağlanmadığı için anlamlı farklılık bulunmamaktadır. Örneğin yüksek ile çok yüksek grubu için p değeri 0,051 olduğu görülmekte, böylece iki grup arasında anlamlı farklılık olmadığı değerlendirilmektedir. Tabloda anlamlı farklılık olan gruplar * işareti ile ifade edilmiştir.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Kamu kurumlarının bilgi güvenliği çalışmaları kapsamında oluşturduğu bilgi güvenliği politikalarının etkinliğinin incelenmesi amacıyla yapılmış olan bu çalışmada, farklı kurumlarda çalışan katılımcılara uygulanan anket ile katılımcıların kurumlarının bilgi güvenliği politikalarında ele alınan temel hususların uygulamadaki etkinlik durumlarının kurumların yapılarına göre değişiklik gösterip göstermediği öğrenilmeye çalışılmıştır. Bu kapsamda çalışmada, kurumların sahip olduğu verilerin kritiklik düzeyi ve kurumların iş süreçlerinde bilgi sistemleri kullanılma yoğunluğu bağımsız değişkenlerine göre bilgi güvenliği politikalarının etkinlik düzeyinin değişip değişmediği incelenmiştir.

Araştırma evrenini 17 kamu kurumu oluşturmaktadır. Bu kurumlardan uygun örneklem yöntemiyle seçilen 6 kamu kurumu araştırmanın örneklemini oluşturmaktadır. Seçilen örneklemin araştırma evrenini temsil edebilmesi açısından yaklaşık %35 gibi yüksek bir oranda örneklem üzerinde anket çalışması gerçekleştirilmiştir.

Katılımcıların anketteki tüm sorulara verdiği cevaplar değerlendirildiğinde, seçilen örneklem kümesinde yer alan kamu kurumlarının bilgi güvenliği politikalarının %77,80 oranında etkin olduğu söylenebilmektedir. Ayrıca, en etkin olan güvenlik konularının %86,20 oranı ile e-posta güvenliği ve %85,80 oranı ile fiziksel güvenlik olduğu; en az etkin olan güvenlik konularının %66,00 oranı ile farkındalık ve eğitim ve %67,70 oranı ile risk yönetimi olduğu değerlendirilmektedir.

Literatürdeki çalışmalarda [12, 14] da farkındalık ve eğitim konularının orta seviyede etkin olduğu sonucuna varıldığı ifade edilmektedir. Bu bağlamda çalışma sonuçları (%66 oranında etkin) ile ilgili araştırma sonuçlarının uyumlu olduğu değerlendirilmektedir.

Katılımcılar tarafından anketteki sorulara verilen cevaplar kurumun sahip olduğu verilerin kritiklik düzeyi bakımından değerlendirildiğinde; çok düşük, düşük, orta, yüksek ve çok yüksek grupları için bilgi güvenliği politikalarının etkinliğinin sırasıyla %72,20, %73,40, %76,20, %78,20 ve %85,00 olduğu belirlenmiştir. Böylece kurumun sahip olduğu verilerin kritiklik düzeyi arttıkça, bilgi güvenliği politikalarının etkinliğinin arttığı söylenebilmektedir.

Kurumun sahip olduğu verilerin kritiklik düzeyi açısından ele alındığında, çok düşük ile çok yüksek grubu ($p=0,017$), düşük ile çok yüksek grubu ($p=0,008$) ve orta ile çok yüksek grubu ($p=0,019$) arasında $p<0,05$ şartı sağlandığı için istatistiksel açıdan anlamlı farklılık olduğu belirlenmiştir. Söz konusu grup eşleştirmeleri için ortalama fark değerleri sırasıyla 0,64708, 0,58471 ve 0,44384 olarak hesaplanmıştır. Bu bağlamda çok düşük ile çok yüksek grubu arasındaki ortalama fark değerinin diğerlerinden daha yüksek olduğu için farklılık düzeyinin diğerlerinden daha anlamlı olduğu değerlendirilmektedir. Benzer şekilde düşük ile çok yüksek grupları arasındaki farklılık düzeyinin de orta ile çok yüksek grupları arasındaki farklılık düzeyinden daha anlamlı olduğu değerlendirilmektedir.

Katılımcılar tarafından anketteki sorulara verilen cevaplar kurumun iş süreçlerinde bilgi sistemlerinin kullanılma yoğunluğu bakımından değerlendirildiğinde; çok düşük, düşük, orta, yüksek ve çok yüksek grupları için bilgi güvenliği politikalarının etkinliğinin sırasıyla %74,80, %71,40, %71,20, %78,40 ve %85,20 olduğu belirlenmiştir. Böylece kurumun iş süreçlerinde bilgi sistemlerinin kullanılma yoğunluğu arttıkça, bilgi güvenliği politikalarının etkinliğinin her zaman arttığı söylenemez. Çünkü sonuçlardan görüldüğü üzere çok düşük, düşük ve orta grupları için etkinlik yüzdeleri bu kaideyi bozmaktadır. Ancak orta düzeyden itibaren, kurumun iş süreçlerinde bilgi sistemlerinin kullanılma yoğunluğu arttıkça, bilgi güvenliği politikalarının etkinliğinin arttığı söylenebilmektedir.

Kurumun iş süreçlerinde bilgi sistemlerinin kullanılma yoğunluğu açısından ele alındığında, düşük ile çok yüksek grubu ($p=0,000$) ve orta ile çok yüksek grubu ($p=0,000$) arasında $p<0,05$ şartı sağlandığı için istatistiksel açıdan anlamlı farklılık olduğu belirlenmiştir. Diğer grup eşleştirmeleri için $p<0,05$ şartı sağlanmadığı için anlamlı farklılık bulunmamaktadır.

Literatürde yer alan benzer çalışmalarda [12, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20] daha çok eğitim ve farkındalık faaliyetleri vb. ekseninde insan faktörlü etkiler üzerine odaklanıldığı görülmekteyken, bu çalışmada bilgi güvenliği politikalarında yer alan ağ ve sistem güvenliği, uygulama güvenliği, e-posta güvenliği, parola güvenliği, fiziksel güvenlik gibi temel güvenlik konularının kurumlar tarafından yerine getirilme durumu noktasında yürütülmüş olan çalışmalar ve bu doğrultuda kurumların hazırlamış oldukları bilgi güvenliği politikaları tüm yönleriyle ele alınmıştır.

Araştırmada uygulanan anketin, araştırma konusunda teknik ve mesleki bilgiye sahip katılımcılar üzerinde gerçekleştirilmesinin, daha anlamlı sonuçların elde edilmesine katkı sağladığı değerlendirilmektedir.

Kurumların bilgi güvenliği politikalarının etkinlik değerlendirmeleri sonuçlarına göre kamu kurumlarına, etkinlik konusunda yetersiz olduğu ortaya konulan bilgi güvenliği konularının etkinliğinin sağlanması için ilave çalışmalar yapmaları önerilmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Zaman ayırıp araştırma anketini doldurdıkları için değerli katılımcılara teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Unescap. (2008). Information Security for Economic and Social Development.
- [2] Kalman, S. (2003). Web Security Field Guide. Cisco Press, 36-37.
- [3] Bhaharin, S. H., Mokhtar, U. A., Sulaiman, R., & Yusof, M. M. (2019). Issues and Trends in Information Security Policy Compliance. 2019 6th International Conference on Research and Innovation in Information Systems (ICRIIS).
- [4] TSE. (2013). TS ISO/IEC 27001 Bilgi Güvenliği Yönetim Sistemi Standardı. Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.

- [5] T.C. Resmi Gazete. (2016, Aralık 3). Kamu Kurum ve Kuruluşlarının KamuNet'e Dahil Edilmesi ile İlgili 10016/28 Sayılı Başbakanlık Genelgesi. (29907).
- [6] UDHB. (2013). 2013-2014 Ulusal Siber Güvenlik Stratejisi ve Eylem Planı. Ankara: T.C. Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı.
- [7] TÜBİTAK BİLGEM SGE. (2013). Kamu Kurumlarının Uyması Gereken Asgari Bilgi Güvenliği Kriterleri. Ankara: UDHB.
- [8] Özbilen, T., & Çağlar, A. (2020). Türk Kamu Sektöründe Bilgi ve Bilişim Güvenliği. *Kamu Yönetimi ve Teknoloji Dergisi*(1), 72-93.
- [9] T.C. Resmi Gazete. (2019, Temmuz 6). Bilgi ve İletişim Güvenliği Tedbirleri Genelgesi. (30823).
- [10] Dijital Dönüşüm Ofisi. (2020, Temmuz). Bilgi ve İletişim Güvenliği Rehberi. Ankara, Türkiye: T.C. Cumhurbaşkanlığı.
- [11] Thakur, K., Ali, M., Gai, K., & Qiu, M. (2016). Information Security Policy for E-Commerce in Saudi Arabia. 2016 IEEE 2nd International Conference on Big Data Security on Cloud (BigDataSecurity), IEEE International Conference on High Performance and Smart Computing (HPSC), and IEEE International Conference on Intelligent Data and Security (IDS).
- [12] Özdemir, A. (2019, Aralık). Kamu Kurum ve Kuruluşlarında Bilgi Güvenliği Farkındalığı. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi Bilişim Enstitüsü.
- [13] Tvrdikova, M. (2008). Information System Integrated Security. 2008 7th Computer Information Systems and Industrial Management Applications.
- [14] Kapanoğlu, G. (2016, Eylül). Öğretmenlerin Bilgi Güvenliği Farkındalığının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi . Ankara: Gazi Üniversitesi Eğitim Bilimleri Enstitüsü.
- [15] Solmaz, M. (2020, Nisan). Öğretmen Adaylarının Siber Bilgi Güvenliği Farkındalıklarının Ve Dijital Vatandaşlık Düzeylerinin Farklı Değişkenler Açısından İncelenmesi. Mersin: Mersin Üniversitesi Eğitim Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Ve Öğretim Teknolojileri Eğitimi Anabilim Dalı.
- [16] Tuygun, M. (2019, Haziran). Iso27001 Bilgi Güvenliği Yönetim Sistemi Standardının Kamu Kurumlarına Uygulanabilirliğinin Araştırılması: Ankara İli Örneği. Yüksek Lisans Tezi. Ankara, Türkiye: Gazi Üniversitesi Bilişim Enstitüsü.
- [17] Henkoğlu, T. (2015). Hassas Bilgi Varlıklarının ve Kişisel Verilerin Hukuksal Düzenlemeler ile Korunması ve Bu Kapsamda Üniversiteler İçin Bilgi Güvenliği Politikasının Geliştirilmesi. Ankara: T.C. Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Bilgi ve Belge Yönetimi Anabilim Dalı.
- [18] Çek, E. (2017). Kurumsal Bilgi Güvenliği Yönetimi ve Bilgi Güvenliği için İnsan Faktörünün Önemi. İstanbul Bilgi Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Bilişim ve Teknoloji Hukuku Yüksek Lisans Programı.
- [19] Şişkin, D. Ş. (2020). Üniversite Kütüphanelerinde Bilgi Güvenliği ve Kişisel Verilerin Korunması: Ankara'daki Üniversite Kütüphanelerinin Değerlendirilmesi. Ankara: Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Bilgi ve Belge Yönetimi Anabilim Dalı.
- [20] Vural, Y. (2007, Mayıs). Kurumsal Bilgi Güvenliği Ve Sızma (Penetrasyon) Testleri. Ankara: Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [21] Özcan, B. (2009). Kurumsal Bilgi Güvenliği ve Cobit. T.C. Haliç Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Bilişim Sistemleri AnaBilim Dalı.
- [22] Çetinkaya, M. (2008, Eylül). Bilgi Güvenliği Yönetim Sistemi Alt Yapısının Değerlendirilmesi İçin Bir Test Aracı Geliştirilmesi. T.C. İstanbul Kültür Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalı.

- [23] Gurbetoğlu, A. (2018). Bilimsel Araştırma Yöntemleri. İstanbul: İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi Eğitim Fakültesi.
- [24] Karasar, N. (1999). Bilimsel Araştırma Yöntemi. Ankara: Nobel Yayın Dağıtım.
- [25] İftar, G. K. (1999). Bilim ve Araştırma. K. Özdamar, Y. Odabaşı, Y. Hoşcan, A. A. Bir, G. Kırcaali İftar, A. Özmen, & Y. Uzuner içinde, Sosyal Bilimlerde Araştırma Yöntemleri. Eskişehir: T.C. Anadolu Üniversitesi Açıköğretim Fakültesi.
- [26] T.C. Ankara Üniversitesi. (2012, Şubat 26). Evren, Örneklem, Örnekleme Türleri. Ağustos 30, 2021 tarihinde Ankara Üniversitesi Açık Ders Malzemeleri: <https://acikders.ankara.edu.tr> adresinden alındı
- [27] Earl, J. (2004). Controlling protest: New directions for research on the social control of protest. *Research in Social Movements, Conflicts and Change*, 55-83.
- [28] UDHB Haberleşme Genel Müdürlüğü. (2014, Kasım). Sektörel SOME Kurulum ve Yönetim Rehberi. Ankara: UDHB.
- [29] Metin, M. (2014). Kuramdan Uygulamaya Eğitimde Bilimsel Araştırma Yöntemleri. Ankara: Pegem Akademi.
- [30] TÜBİTAK BİLGEM YTE. (2021, Ocak). Bilgi Güvenliği ve Yönetimi Rehberi İşletim ve Bakım. Dijital Kabiliyet Rehberleri. Ankara.
- [31] İslamoğlu, A., & Alnaçık, Ü. (2016). Sosyal Bilimlerde Araştırma Yöntemleri. İstanbul: Beta Yayınları.
- [32] Kılıç, B. (2019, Aralık). ISO/IEC 27001 Bilgi Güvenliği Yönetim Sistemi Açısından Türkiye’de Hukuk Bürolarında Bilgi Güvenliği Yönetimi. Gazi Üniversitesi Bilişim Enstitüsü Adli Bilişim Ana Bilim Dalı.
- [33] Mallery, P., & George, D. (2010). 2010 SPSS for Windows Step by Step: A Simple Guide and Reference 17.0 update. Boston: Allyn & Bacon, c2010.



An Overview of Classification of Electrooculography (EOG) Signals by Machine Learning Methods

Alihan SUIÇMEZ^{1*} Cengiz TEPE² Mehmet Serhat ODABAŞ³

¹Kastamonu University Faculty of Engineering and Architecture, Department of Electrical and Electronics Engineering, 37150, Merkez/KASTAMONU

²Ondokuz Mayıs University Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, 55200, Atakum/SAMSUN

³Ondokuz Mayıs University Graduate Education Institute, Department of Intelligent Systems Engineering, 55200, Atakum/SAMSUN

Article Info

Review article
Received: 14/06/2022
Revision: 20/06/2022
Accepted: 27/06/2022

Keywords

EOG
Electrooculography
Machine Learning

Abstract

The distribution of the studies conducted between 2011-2021 in the fields of (Electrooculography) EOG and eye movements, EOG and wheelchair, EOG and eye angle, EOG and sleep state, EOG and emotion estimation and EOG and game application was determined according to years, and the most cited studies were examined and presented. The study areas are listed as Eye Movement Classification, Wheelchair, Sleep state, Eye Angle, Emotion State and Game Applications from the most to the least number of articles. When we examine in terms of the number of citations, they are listed as Sleeping state, Eye Movement Classification, Wheelchair, Eye Angle, Emotion State and Game Applications, from the most to the least. In these studies, it has been tried to make the lives of people who have become disabled in various ways better by using the brain-computer interface with machine learning.

1. INTRODUCTION

Electrooculography (EOG) measures voltage fluctuations caused by eye movement. EOG can be used to monitor the direction users are looking by taking advantage of signal changes. EOG also conveys highly recognizable information from the eyelid movement known as staring and blinking [1]. Small Electrooculography (EOG) instruments have very good temporal resolution. The amplifiers measure the electric field generated by the resting potential in the corneo-retinal region through two skin electrodes placed just next to the eyes [2].

Studies in this area include EOG and eye movements [1-4], EOG and wheelchair [5-8], EOG and eye angle [9-10], EOG and sleep state [11-14], EOG and emotion prediction [15-19] and EOG and game exercise [20-23]. A hybrid writing system [1] combining visual feedback technology on eye movements with usually EEG and EOG signals [1], a grading method used in a wireless EOG-based HCI device to detect eye movements in eight directions [4], five office-based activities EAR's feasibility (copying text, reading written paper, manually taking notes, watching videos and browsing the Web) and participants' rest periods (EMPTY classroom) were carried out [3].

In this study, studies on EOG and Machine learning, Eye movement classification, Wheelchair control, Eye angle, Sleep state, Emotion estimation and Game application were searched in IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) between 2011-2021. The most cited studies on the subjects mentioned in our study are presented.

2. METHODS

The literature review was carried out in two stages. In the first stage, a search was made in the IEEE database related to EOG and machine learning between 2011-2021. The articles obtained as a result of this search

are also classified under six main headings. These six main headings are respectively; Eye movement classification, Wheelchair control, Eye angle, Sleep state, Emotion estimation and Game application and 51 articles were reached.

In the second stage, these titles, EOG and six main titles were combined one by one and a second search was made in the IEEE database. The numerical distribution of these searches related to EOG and machine learning by years was obtained and the most cited articles were selected for each topic.

2.1. Classification of EOG And Eye Movements

As a result of the scanning, the eye movement studies in the last ten years are given in Figure 1.

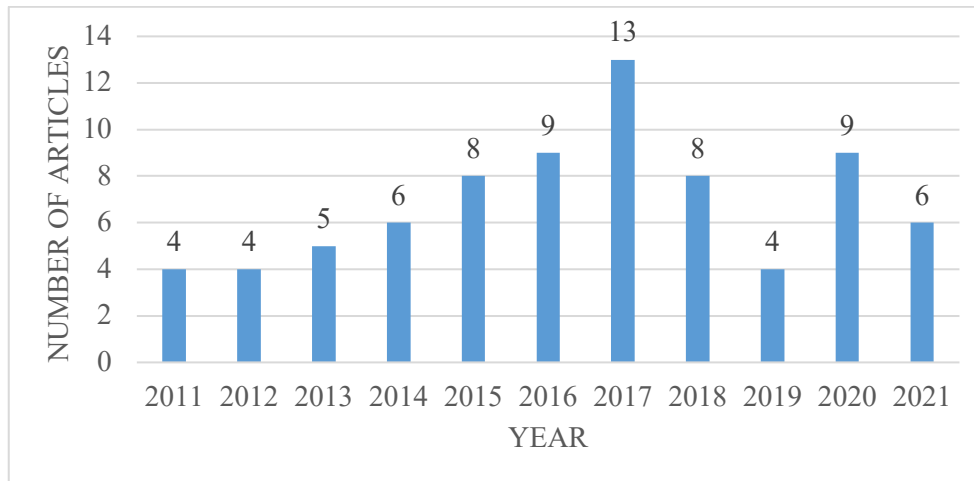


Figure 1. Distribution of studies in the field of EOG and eye movement classification by years

Twenty healthy subjects, twelve males and eight females, aged 24-32 years were recruited. None of these subjects had psychiatric, neurological, or other disease records. This research is the first to aim an EEG-EOG hybrid BCI writing system that uses the visually-informed classification result and actively selects the target letter. In the EEG-EOG hybrid BCI writing system, a brain-based sorting point is presented for the related feature to inform the subject about the prediction of the system. If the continued classification is correct, the subject has successfully selected the target letter with a simple gesture, a wink that is particularly appropriate for our situation. This paradigm is called row-column seen feedback (RC-VF). In this system, the average sorting accuracy and information transfer rate (ITR) of 20 individuals were 97.6% and 39.6% (± 13.2) [bit/min]. In this study, baseline fix and ERP feature extraction were applied. The sorting result is found based on the LDA classifier previously estimated from the training dataset. The model code was developed using the Psychophysics Toolbox (<http://psychtoolbox.com>) and OpenBMI and Matlab [1].

The experiment was carried out with eight healthy people aged between 22-25. This study consists of three parts. First, it is the pre-test section that calibrates the classification parameters of the measurement system used in the study to determine the eye movements of each user, according to the users. Secondly, the training section on the EOG system (Eight aspects were considered in this system, each of which was tested ten times) and third, ten times for each direction (look up, look down, look left, look right, look up-left, look down-left, look up-right, and look down-right). While the highest accuracy value was 86.25%, the average classification accuracy of eight users was found to be 88.59% [4].

Three eye movement features (saccades, fixations, and blinks) were determined to detect eye movement analysis using an electrooculography (EOG) system. This method defines algorithms to detect eye movement feature and evaluates repetitive eye movements. Using the support vector machine (SVM) classifier, an average of 76.1% accuracy and 70.5% recall was achieved between unrelated (let alone one person) classes and participants. MATLAB and C were used throughout the study [3].

Eye movements were recorded with three participants, two men and one woman, for the evaluation of saccade detection. Saccades are rapid eye movements made when the image rotates from one object to another. Electrooculography (EOG) was used to follow these movements. It was investigated whether saccadic suppression of image displacement (SSID) could be used in the virtual environment (VE) to

unconsciously rotate and flip the viewpoint. Matlab and Psychtoolbox were used for stimulus presentation [2].

2.2. EOG and Wheelchair Control

As a result of the scanning, the wheelchair control studies in the last ten years are given in Figure 2.

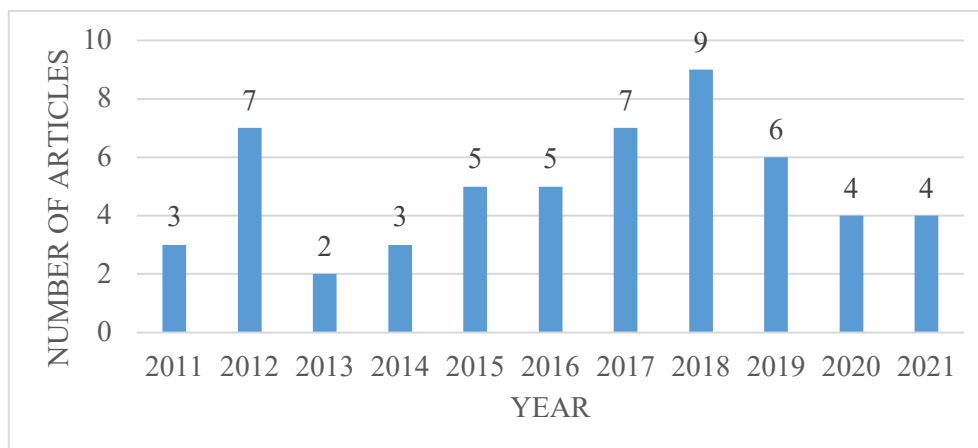


Figure 2. Distribution of studies in the field of EOG and wheelchair by years

A new electrooculogram (EOG) based HMI has been proposed for wheelchair control. One synchronous and two asynchronous experiments were performed on four (S1-S4) healthy men aged 24-26 years with normal eye movements. Three trials were performed for each individual on three different days. This experiment was created to compare the presented HMI with EOG-based human-machine interfaces (HMI) and thus to prove that the presented HMI can be used to effectively control the wheelchair in the outdoor environment [2].

Asynchronous electrooculography (EOG)-based HMI is presented to assist patients with advanced spinal cord injury. The presented HMI aims to enable patients to interact with blinking in a smart home environment (lots of electrical devices and smart wheelchairs) [8].

Developed an EOG signal acquisition system to improve the lives of people with disabilities. The EOG signals were then classified to generate control signals from these signals (depending on the amplitude and duration of the signals) for the movement of the wheelchair prototype. Amplifiers have been developed to capture left-right eye movements and up-down eye movements from the eye [5].

Electroencephalography (EEG)-based and Electrooculography (EOG)-based, using neural networks, and a wheelchair that can control eye movements have been presented to measure neural activity in the brain and eye for quadriplegia patients [7].

2.3. EOG and Eye Angle

As a result of the scanning, the eye angle studies in the last ten years are given in Figure 3.

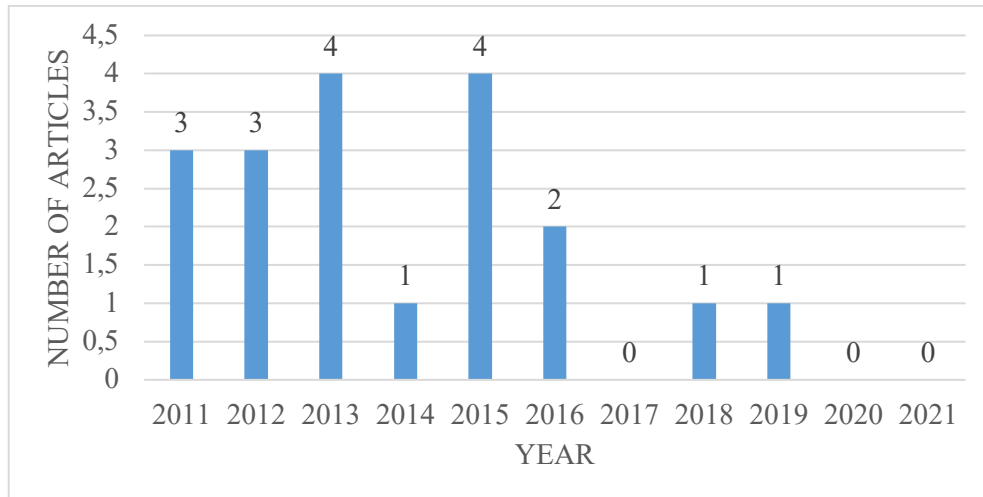


Figure 3. Distribution of studies in the field of EOG and eye angle by years

A prototype named PANTOJO was developed. This prototype functions as a situation machine that detects and classifies eye movements according to saccades. Transitions in eye positions at multiples of 5° from $+40^\circ$ to -40° were detected with a 75% success rate. With a transport delay of 100 ms, an update rate of 46 Hz and an accuracy of 2.5° , the PANTOJO has proven to be a versatile point of view tracker in many trials such as communication devices for the disabled (eg tetraparesis), gait research or driving analysis [9].

A system using eye movement recognition EOG-based methods and Learning Vector Quantization algorithm is proposed to provide a means of communication for people who have lost limb functions and speech abilities. In this study, eye-rolling movements such as up-down turn, left turn, right turn, blink and left turn, up-right turn, left-down turn, down turn (angle of the diagonal) are introduced. API (application programming interface) was used to control icon movements based on demo results. First, it is decided to measure the EOG signals at 1.8 second intervals, secondly to decide whether eye movement continues in the 1.8 second EOG data, and to subtract the data of each movement from the 1.8 second EOG data, if any. Third, the Fast Fourier Transform was used for the frequency properties of the extracted motions. Fourth, the Learning Vector Quantification network and the characteristics of the EOG features in each movement were used to recognize eye movements. The average recognition accuracy of eye movements was found to be around 95% [10].

2.4. EOG and Sleep Status

As a result of the scanning, the sleep status studies in the last ten years are given in Figure 4.

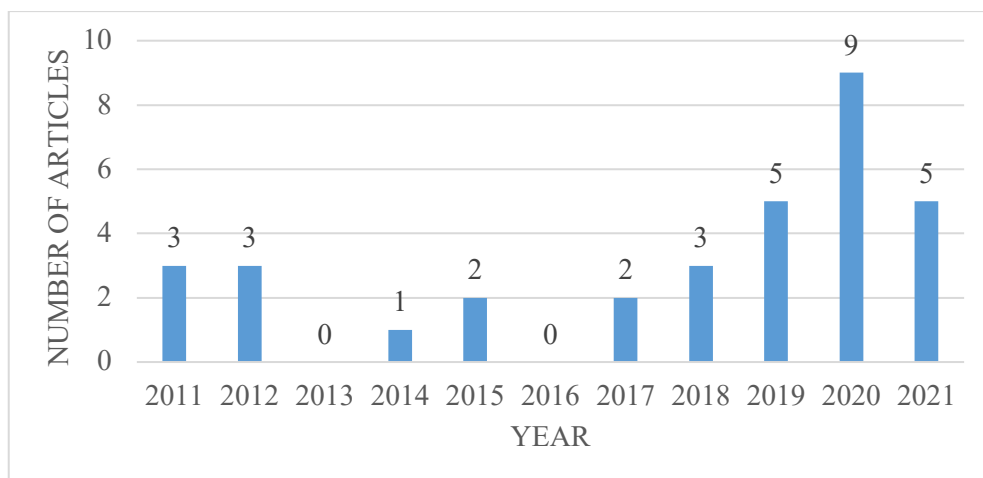


Figure 4. Distribution of studies in the field of EOG and sleep status by years

Grading of sleep stages is an examination used in the diagnosis of sleep disorders. Presented the first deep learning approach for sleep stages grading and temporal content of each 30 second data window, using all multivariate and multimodal polysomnography (PSG) signals (EEG, EMG, and EOG) without calculating spectrograms or excluding artifacts. The data used in the tests is the public MASS dataset session 3. In this model, it is compared with alternative automated approaches based on convolutional networks or decision trees [14].

A deep learning model called Deep Sleep Network has been proposed for automatic scoring of sleep stages based on single-channel raw EEG. In this model, evaluation was made using different single-channel EEGs (F4-EOG (left), Fpz-Cz and Pz-Oz) in two sleep datasets (AASM= American Academy of Sleep Medicine and R&K) with different characteristics and scoring standards. Looking at the results, MASS = Montreal Archives of Sleep Studies: 86.2-81.7%, Sleep-EDF: 82.0-76.9%, and using the latest methods MASS: 85.9-80.5%, Sleep-EDF: both data generally achieved accuracy in the set and a macro F1 score of 78.9-73.7% [13].

In order to prevent traffic accidents due to loss of attention and drowsiness in drivers, a study was designed to detect drowsiness and fatigue while driving and to warn the driver by monitoring physiological signals. In this study, the amount of information about drowsiness obtained from the signals obtained from the electroencephalogram (EEG), electrooculogram (EOG) and electrocardiogram (ECG) during the driving test was tried to be maximized with a simulation. The quality of the features was made with datasets collected from 31 drivers in the simulation test. Results Classification accuracy of 95-97% was achieved with an average of 31 drivers, demonstrating the importance of FMIWPT (Fuzzy MI-based Wavelet-Packet Algorithm) in identifying features that correlate well with different dormancy states [11].

A study was designed to assist physicians in the diagnosis and treatment of people with sleep disorders. This research is based on different EEG datasets from PhysioNet, which uses the Sleep-EDF database developed and presented by the researchers to distinguish sleep periods. This research was supported by an SVM (vector machine) to recognize the state of sleep stages and determine whether the received signal belongs to the sleep stage or the waking stage [12].

2.5. EOG and Emotion

As a result of the scanning, the emotion studies in the last ten years are given in Figure 5.

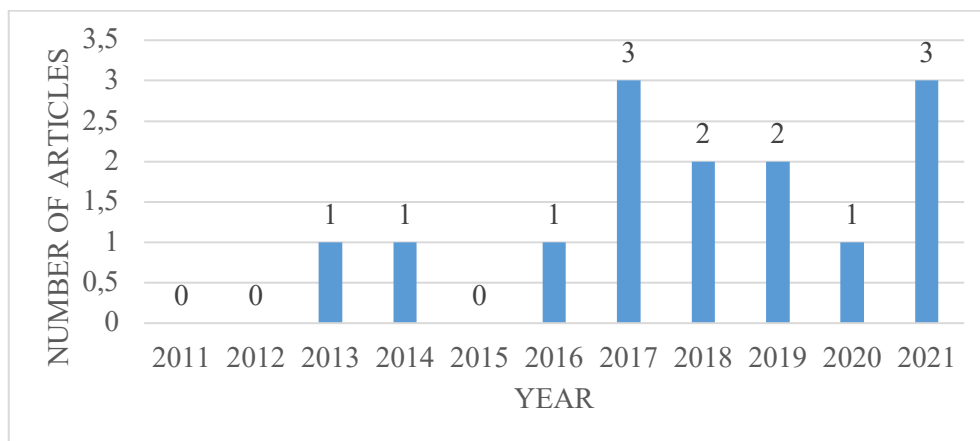


Figure 5. Distribution of studies in the field of EOG and emotion by years

A human-computer interactive application is designed using Electroencephalogram (EEG), Electromyogram (EMG), Electrooculography (EOG) and other physiological signals to study human emotional state based on Deep Belief Network (DBN). This study was carried out in DEAP database with valence, arousal and dominance classes and comparative evaluation. The accuracy of these data (Value,

arousal and dominance) was found to be 78.28%, 70.33% and 70.16%, respectively. The DEAP database was used to verify the effectiveness of the Deep Belief Networks classifier [17].

An emotion recognition system based on machine learning techniques is proposed, which is a physiological response to the analyzed multimodal signal sources (EEG, EOG, plethysmograph, EMG, GSR, Respiratory belt and Temperature). This study established a new method for emotion regression by mapping physiological signals to Fisher Score space based on HMMs [15].

A classification has been proposed that combines methods of using biological signal sources to detect emotional states, the strengths and emerging challenges of these methods, and detection of facial expressions by EMG, saccade detection using Electrooculography (EOG). Four basic expressions (neutral, sad, happy and angry) were used in the classification [18].

Physiological signals (DEAP) were used for emotion analysis. Emotion arousal experiments were conducted by showing 32 subjects to watch several videos activating sensory states such as valence, arousal, and dominance in the DEAP database [16].

A system that can detect human emotions with EOG signals has been created. This system aims to recognize emotion with human eye movements. In the classification, outcomes that emerged as happy, pleasant, fearful, sad and angry were used [19].

2.6. EOG and Game App

As a result of the scanning, the game app studies in the last ten years are given in Figure 6.

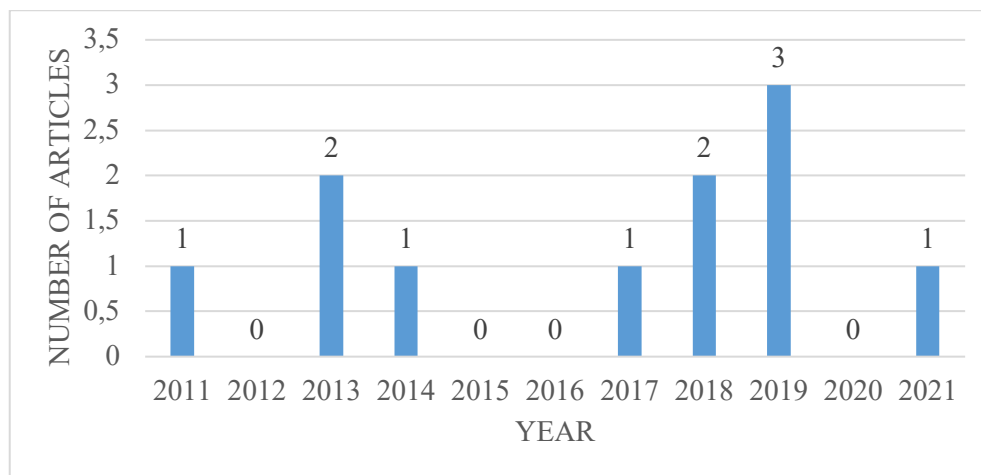


Figure 6. Distribution of studies in the field of EOG and game applications by years

Baseball game control with nine eye movements (still, up, down, left, right, up-left, down-left, up-right and down-right) and blink signal, EOG signal, eye movement detection and HCI depending on signal processing. A study was carried out to achieve this with the system. The characteristics of these nine eye movements were created and according to them, the accuracy rate of the EOG signals was passed to the stage, and this rate was 100% in the 3rd round and 92% in the 5th round [20].

A correction technique is designed to avoid the effects of misclassification in EOG signals with eight-way eye movement (look up, look down, look right, look left, look right-up, look right-down, look left, and look left-down). In this research, the correction technique to learn eye movements was applied to the HCI baseball game. A Matlab-based application was used for the analysis of EOG signals [23].

Thanks to a system that can detect both EEG and EOG signals, a signal processing system has been designed, which has 9 directional controls (still, up, down, left, right, up left, down-left, up-right and down-

right) that control eye movements via EOG and one direction control via EEG. This system can be used comfortably in daily life, as EEG-based BCIs can provide communication between the brain and other devices. The lowest accuracy rates were 94%, the highest 100% [21].

In the study, in which a 38-year-old healthy man was used as a subject, it was determined whether the EOG could be extracted from the EEG and whether the resulting signal was related to the eyes. They used ocular artifacts (EOG) in the EEG signal to control eye states. In the first experiment, the end positions of the eyes were analyzed in the horizontal (left, right), vertical (top, bottom) and neutral (center) directions. Horizontal eye movements were correctly classified in 87% (right) and 94% (left), vertical 92% (up) and 91% (down) [22].

3. RESULTS AND DISCUSSION

While the most work was done in the field of eye movement classification, the least work was done in the field of game applications. Recently, a significant increase has been observed in the number of studies in the field of eye movements. However, the studies in the field of sleep state, which ranked third in terms of the number of studies, were the most cited studies. Article rankings were made as Eye Movement Classification, Wheelchair, Sleep status, Eye Angle, Mood status and Game Applications. When we examine in terms of the number of citations, these are Sleep status, Eye Movement Classification, Wheelchair, Eye Angle, Mood State and Game Applications in order from largest to smallest.

Researches in these fields of study consist of studies to make life easier for people who cannot use their limbs as a result of accident or who have diseases such as paralysis. Many studies have been carried out so that people who are confined to a wheelchair can continue their vital activities without the help of another person. In addition, studies on sleep status constitute important studies in the prevention of accidents with sleep status classification, especially in cases where drivers are sleepless for a long time. Studies on sleep state are the most cited studies. With these efforts, people who become in need of care as a result of various accidents or diseases will be helped to continue their lives without the need for another person.

ACKNOWLEDGEMENTS

-

REFERENCES

- [1] Lee, Min-Ho, et al., A high performance spelling system based on EEG-EOG signals with visual feedback. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 26 No.7 (2018) 1443-1459.
- [2] Bolte, Benjamin, and Markus Lappe., Subliminal reorientation and repositioning in immersive virtual environments using saccadic suppression. *IEEE transactions on visualization and computer graphics* 21 No.4 (2015) 545-552.
- [3] Bulling, Andreas, et al., Eye movement analysis for activity recognition using electrooculography. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence* 33 No.4 (2010) 741-753.
- [4] Wu, Shang-Lin, et al., Controlling a human–computer interface system with a novel classification method that uses electrooculography signals. *IEEE transactions on Biomedical Engineering* 60 No.8 (2013) 2133-2141.
- [5] Champaty, Biswajeet, et al., Development of EOG based human machine interface control system for motorized wheelchair. *2014 Annual International Conference on Emerging Research Areas: Magnetics, Machines and Drives (AICERA/iCMMD)*. IEEE, (2014).
- [6] Huang, Qiyun, et al., An EOG-based human–machine interface for wheelchair control. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 65 No.9 (2017) 2023-2032.

- [7] Rajesh, Adarsh, and Megha Mantur., Eyeball gesture controlled automatic wheelchair using deep learning. 2017 IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference (R10-HTC). IEEE, (2017).
- [8] Zhang, Rui, et al., An EOG-based human-machine interface to control a smart home environment for patients with severe spinal cord injuries. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 66 No.1 (2018) 89-100.
- [9] Simini, Franco, et al., Gaze tracker by electrooculography (EOG) on a head-band. 2011 10th International Workshop on Biomedical Engineering. IEEE, (2011).
- [10] Zhang, Peng, et al., Implementation of EOG mouse using Learning Vector Quantization and EOG-feature based methods. 2013 IEEE Conference on Systems, Process & Control (ICSPC). IEEE, (2013).
- [11] Khushaba, Rami N., et al. "Driver drowsiness classification using fuzzy wavelet-packet-based feature-extraction algorithm." *IEEE transactions on biomedical engineering* 58 No.1 (2010) 121-131.
- [12] Aboalayon, Khalid AI, Helen T., Ocbagabir, and Miad Faezipour. "Efficient sleep stage classification based on EEG signals. IEEE Long Island Systems, Applications and Technology (LISAT) Conference 2014. IEEE, (2014).
- [13] Supratak, Akara, et al., DeepSleepNet: A model for automatic sleep stage scoring based on raw single-channel EEG. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 25 No.11 (2017) 1998-2008.
- [14] Chambon, Stanislas, et al., A deep learning architecture for temporal sleep stage classification using multivariate and multimodal time series. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 26 No.4 (2018) 758-769.
- [15] Garcia, Hernan F., Álvaro A. Orozco, and Mauricio A. Álvarez., Dynamic physiological signal analysis based on Fisher kernels for emotion recognition. 2013 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). IEEE, (2013).
- [16] Torres-Valencia, Cristian A., Mauricio A. Álvarez, and Álvaro A. Orozco-Gutiérrez., Multiple-output support vector machine regression with feature selection for arousal/valence space emotion assessment. 2014 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE, (2014).
- [17] Kawde, Piyush, and Gyanendra K. Verma., Deep belief network based affect recognition from physiological signals." 2017 4th IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on electrical, computer and electronics (UPCON). IEEE, (2017).
- [18] Perdiz, Joao, Gabriel Pires, and Urbano J. Nunes., Emotional state detection based on EMG and EOG biosignals: A short survey. 2017 IEEE 5th Portuguese Meeting on Bioengineering (ENBENG). IEEE, (2017).
- [19] Soundariya, R. S., and R. Renuga. Eye movement based emotion recognition using electrooculography. 2017 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT). IEEE, (2017).
- [20] Lin, Chin-Teng, et al., A wireless Electrooculography-based human-computer interface for baseball game. 2013 9th International Conference on Information, Communications & Signal Processing. IEEE, (2013).
- [21] Chen, Shi-An, et al., Gaming controlling via brain-computer interface using multiple physiological signals. 2014 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). IEEE, (2014).

- [22] Dietrich, Marc Philipp, Götz Winterfeldt, and Sebastian von Mammen. Towards EEG-based eye-tracking for interaction design in head-mounted devices. 2017 IEEE 7th International Conference on Consumer Electronics-Berlin (ICCE-Berlin). IEEE, (2017).
- [23] Lin, Chin-Teng, et al., EOG-based eye movement classification and application on HCI baseball game. IEEE Access, 7(2019) 96166-96176.



Design and Analysis of Novel Ring UWB Antenna

Kayhan ÇELİK^{1,*}

¹Gazi University, Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Technology, Ankara, TURKEY

Article Info

Research article
Received: 25/02/2022
Revision: 14/05/2022
Accepted: 25/06/2022

Keywords

Ring antenna
UWB antenna
Circular Monopole
Antenna

Abstract

In this communication, the design and analyses of the novel printed ultra wide band ring monopole antenna is presented. The recommended antenna has a pretty small size of 20 x 26 x 1.6 mm³ which is designed on the FR4 dielectric material which has the dielectric constant of 4.4 and loss tangent of 0.02. The general geometry of the radiating part of the antenna is composed of the circular ring. The antenna has a defected ground structure which has the circular corner points. The antenna feed is placed in asymmetrical position with respect to the y-axis as a microstrip line. The findings obtained by examining the general antenna performance criteria are presented in a systematic way. The findings of the research prove that the proposed antenna has some suitable performance parameters at the UWB frequency range.

1. INTRODUCTION

With the Federal communication commission (FCC)'s announcement that ultra-wide band (UWB) frequency range from 3.1 to 10.6 GHz can be used without a license for the commercial proposes, the studies to use this band continue to increase until today by the scholars [1]. Depending on the increase in applications in this frequency band, the need for broadband antenna designs that will cover the entire UWB band is also increasing [2-4]. When viewed from this perspective, the microstrip monopole structures are the suitable candidate for designing UWB antennas due to their prominent features such as small size, being cheap, being easy of manufacturing and Omni-directional radiation patterns [5-7]. When the literature is examined that, the many monopole antennas have been presented for the UWB or narrow band applications with the different shaped radiators [8-11]. In addition to this, circular ring radiator is an also popular structure for the UWB antenna designs which ones have the advantages of the improving the antennas performances. The following examples can be given to antennas with ring structure found in the literature in an historical order:

One of the early circular ring antenna was presented by Liang et al. [12]. The designed antenna has a volume of 42 x 50 x 1.5 mm³ with the bandwidth of the 2.75 - 9.84 GHz. The another circular ring antenna which one has the band-rejection at the WLAN band was presented by Hong et. al. [13]. The band rejection was accomplished by the inserting a U-shaped slot or an inverted Y-shaped stub. The more compact antenna from Ref. [12] was presented by Xiao et al. which one has the size of 33 x 28 x 1.4 mm³ [14]. In Ref. [15], the printed circular-ring monopole antenna with band notched specification at the 5 GHz has been presented with the help of the C-shaped short-circuited stub by Xiao et al. In Ref. [16], the circular-ring antenna with a size of 26 x 28 x 1.6 mm³ was presented by Liu et al. which has an impedance bandwidth of more than 132% (from 3.7 to more than 18 GHz). In Ref. [17], the novel UWB antenna with dual-frequency notched was presented by Azim et al. The notching of the WLAN and WiMAX bands were achieved with the dual-slot on the radiator. In Ref. [18], a printed ring shaped UWB antenna was presented by Yang et al. which one has the quarter wavelength stub for notching of the WLAN band. In Ref. [19], the novel UWB antenna which one has a dual frequency-notched property was presented by Shi et al. The notched bands were accomplished by an arc H-shaped slot on the radiating element and by etching narrow slots on the ground

plane. In Ref. [20], the ring UWB antenna with the triple band notched was presented by Srivastava et al. by using the elliptical slot and split ring slot in the antenna and a double rectangular single split ring resonators for the notching of frequency bands. In Ref. [21], UWB ring antenna with the triple band notched which were obtained by CSRR and S-shaped slot in feeding line and SSRRP near the microstrip feed line was presented by Yadav et al. In Ref. [22], the novel SWB ring antenna with dual band rejection was presented by Manohar et al. The notching bands of the system were utilized by a U-shaped piece and a T-shaped stub inside the radiation element structure and U-shaped slot. In Ref. [23], a miniaturized ring UWB antenna with tunable notched band was presented by Sharma et al. by the help of setting the coupling between T-shaped strips which were located inside radiation element. In Ref. [24], the rectangular monopole with circular ring antenna for UWB was reported by Lamultree et al. which one works in the frequency bandwidth of 2.56-13 GHz.

In this paper, the design and analyses of the original circular ring antenna is presented. In section 2, the construction of the antenna is presented. In section 2.1 the investigation of the antenna performance is presented. In section 2.2. the parametric analyses of the antenna are accomplished and the obtained results are given. Lastly in section 3, the paper is finished with the conclusion.

2. CONCEPT OF THE ANTENNA

In this part of the paper, the design concept of the antenna is performed. The general form of the intended antenna is given in Figure 1. As seen from the figure, it is easily understanding that the shape of the radiating part of the antenna is a mutated version of the classical circular monopole antenna which one has a circular slot inside it for the aim of decreasing the resonance frequency of the antenna. The outer (R1) and inner (R2) radius of the radiating rings are 8 mm and 5 mm, respectively. In the ground plane, the partial or defected ground is used at the bottom side of the dielectric substrate which one has a circular corners for increasing the antenna performance. The width and length of the ground plane are 16 mm and 6.5 mm respectively. In addition to this, the radius of the circles at the corners of the ground plane is 7 mm. The feeding of the antenna is made with the microstrip transmission line with the size of 2 mm width and 9 mm length. At the same time, the feeding line is shifted 3 mm to the right with respect to the y-axis. In terms of the substrate material, the FR4 is assigned for construction of the antenna which has a dielectric constant of 4.4 and loss tangent of 0.02 with the thickness of 1.6 mm.

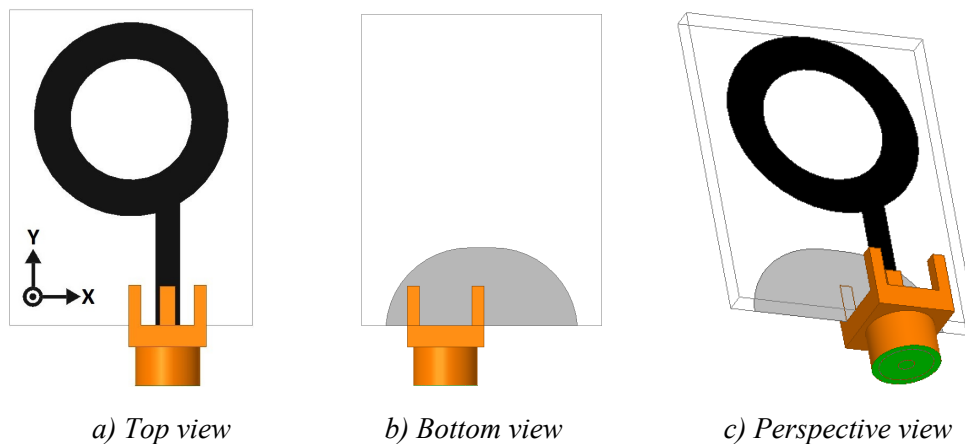


Figure 1. The general shape of the proposed antenna

The design stages of the recommended antenna are given in Figure 2 which one starts with the classical circular shaped monopole antenna. The formula, which is commonly found in the literature and provides the fundamental resonance frequency of the circular monopole antenna is given by Equation 1 [25-27]:

$$f_L = \frac{7.2}{(l+r+p)} = \frac{7.2}{(2.25R+p)} \text{ GHz} \quad (1)$$

In the given formula, R and p represent the radius of the radiating circular and gap between the radiating part and the ground part, respectively.

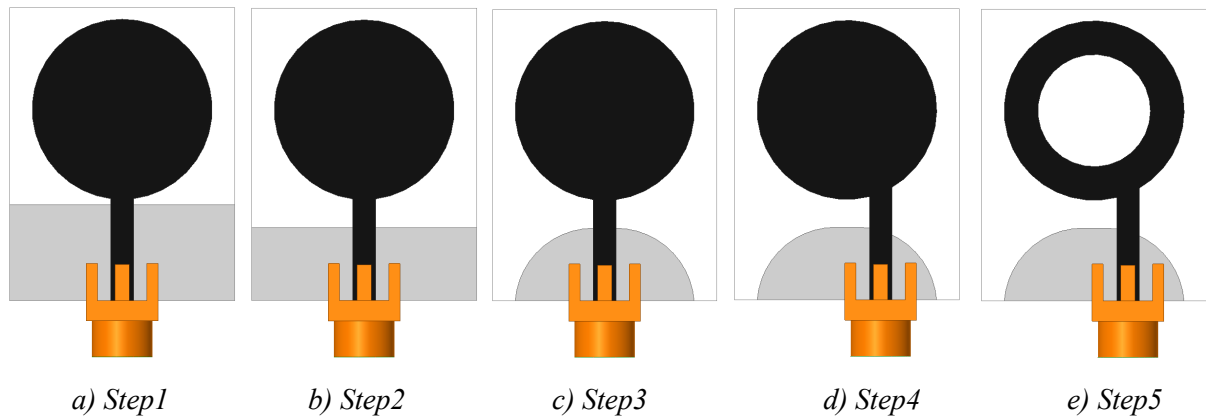


Figure 2. The design stages of the proposed antenna

Considering that the R -value is 8 mm and the p value is 0.3 mm in step1, the lower operating frequency of the step1 can be calculated as 3.93 GHz which one verifies the simulated value of the reflection coefficient of the step1 as seen from the Figure 3 (the red line). In the second step, the p value was increased from 0.3 mm to 2.5 mm as seen from Figure 2(b) in order to reduce the antenna lower operating frequency. As a result of this process, the lower operating point of the antenna decreases to 3.3 GHz as it is seen with the green line in Figure 3. For the 2.5 mm value of p , the operating frequency calculated with Equation 1 is approximately 3.5 GHz which one shows that there is a difference between values obtained from equation and the simulation. In the third step, ground structure of the antenna is altered which can be seen in Figure 2(c) in order to boost the antenna impedance range. According to the Figure 3, as a result of this process, there is a decrease of 100 MHz in the lower operating frequency of the antenna and it is seen that the impedance bandwidths improves, especially in the frequencies at the 8 GHz - 10 GHz band.

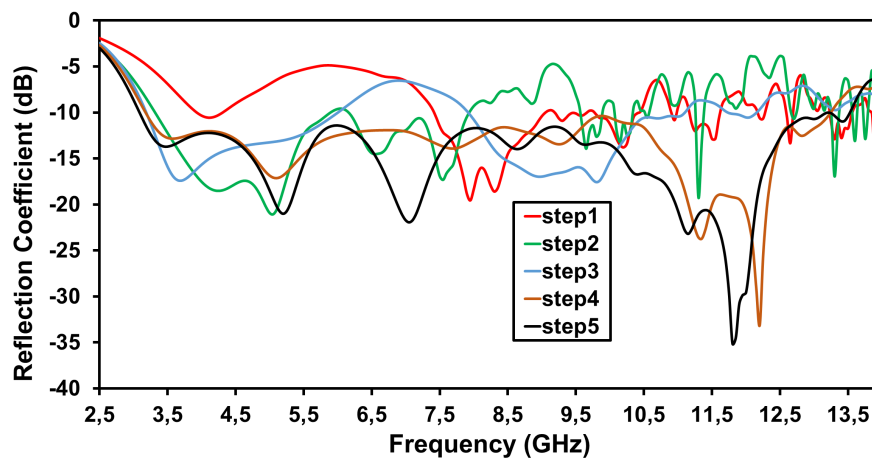


Figure 3. The reflection coefficient values of the design steps

In the fourth step, the feeding line, which is symmetrical with respect to the y -axis, is shifted to the right by 3 mm. This process improves the impedance range of the antenna in the 4.5 GHz - 8 GHz and 10.5 GHz - 13 GHz frequency range. Finally, by adding a circular slot inside the circular patch, the lower operating frequency is further reduced by 100 MHz. As a result, the proposed antenna has a suitable bandwidth from 3.07 GHz to 13.6 GHz with covers the UWB band.

2.1. The Investigation of the Antenna Performance

In this part of the paper, the performance parameters of the antenna such as S11, gain, radiation patterns are presented. The crosscheck of the reflection coefficient of the designed structure which are obtained from the different electromagnetic analyses programs are given in Figure 4. According to the figure, it is reality that the files obtained from CST and HFSS programs support each other and prove that the antenna runs on the whole UWB frequency range.

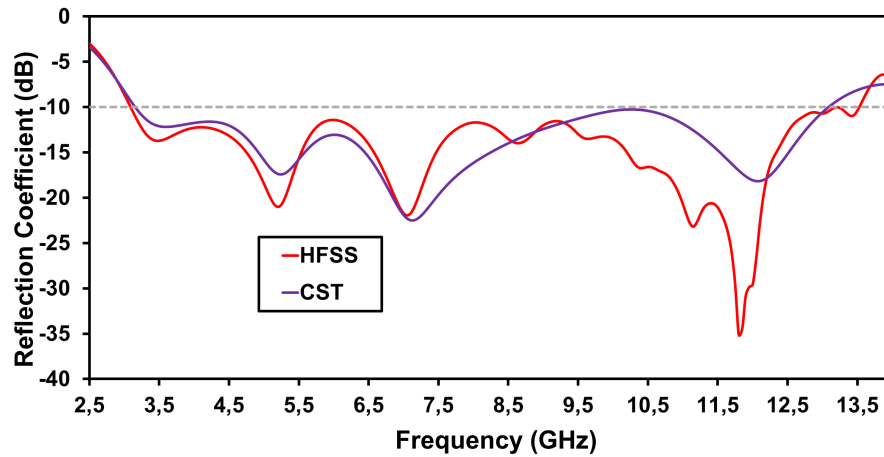


Figure 4. The simulated reflection coefficient values of the antenna

The radiation pattern graphs of the antenna at the various frequencies are illustrated in Figure 5. Since the designed antenna is a monopole, it has an Omni-directional radiation pattern as expected. While it has a more uniform radiation pattern in the low frequency region, however, it is seen that there is a deterioration in the radiation patterns with the increasing of the frequency according to the figures.

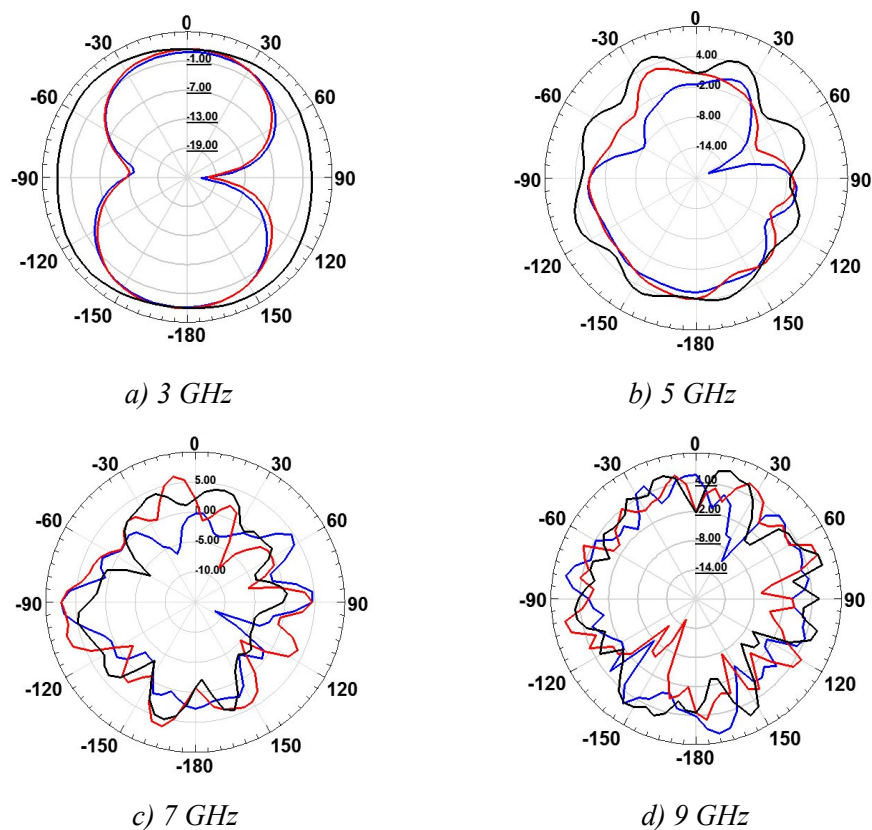


Figure 5. Radiation patterns of the designed antenna ($\phi=0$ (x-z), $\phi=90$ (y-z), $\theta=90$ (x-y))

The gain of the antenna versus the frequency is examined and given in Figure 6. The antenna has a nearly maximum gain of 3.7 dBi at the frequencies of 6 GHz, 10.5 GHz and 13.4 GHz and it has a minimum gain value of the 1.82 at the 3 GHz band.

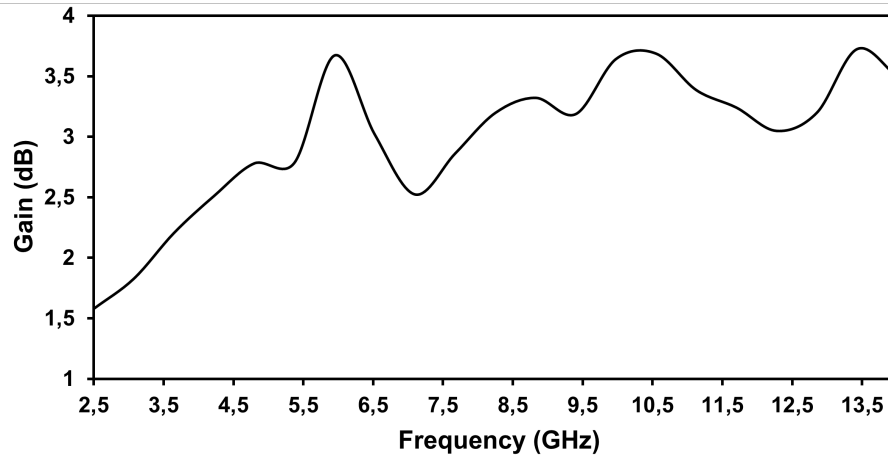


Figure 6. The gain of the antenna versus frequency

2.2. The Parametric Analyses of the Antenna

In this part of the paper, the parametric analyses of the antenna are investigated. Analyses are carried out over the antenna parameter variables given in section 2. By taking these values as a constant, only the analyzed parameter is changed.

Firstly, the length of the ground plane is examined in the range of 5 mm – 7 mm and the reflection coefficient results of the antenna are submitted in Figure 7. According to the figure that, the optimum value of the ground length is 6.5 mm. The value of the ground length for the 7 mm increases the lower operating frequency. In addition to this, for the values especially from 6.5 mm to 5 mm, the bandwidth of the antenna deteriorates.

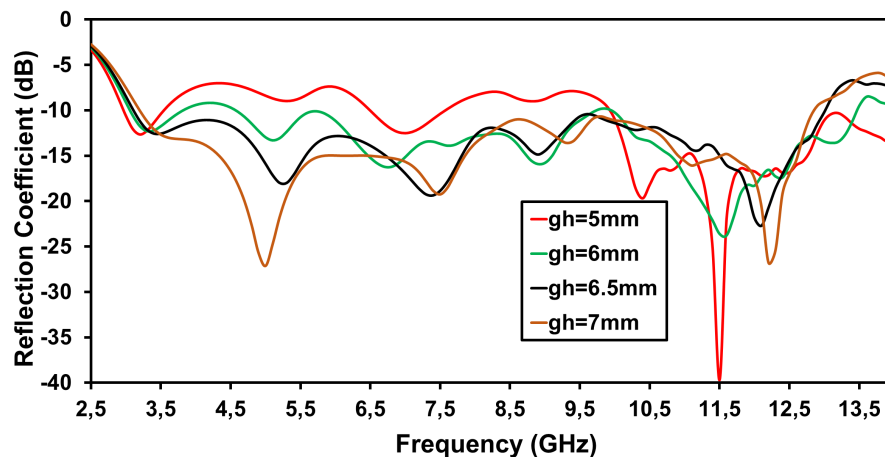


Figure 7. The reflection coefficient of the antenna depending on the ground length

The fluctuation of the reflection coefficient of the antenna versus the ground width is depicted in Figure 8. It can be said that increasing of the ground width from 12 mm to 16 mm, effects the reflection coefficient positively. After the 16 mm, it makes the reflection coefficient of the antenna worse.

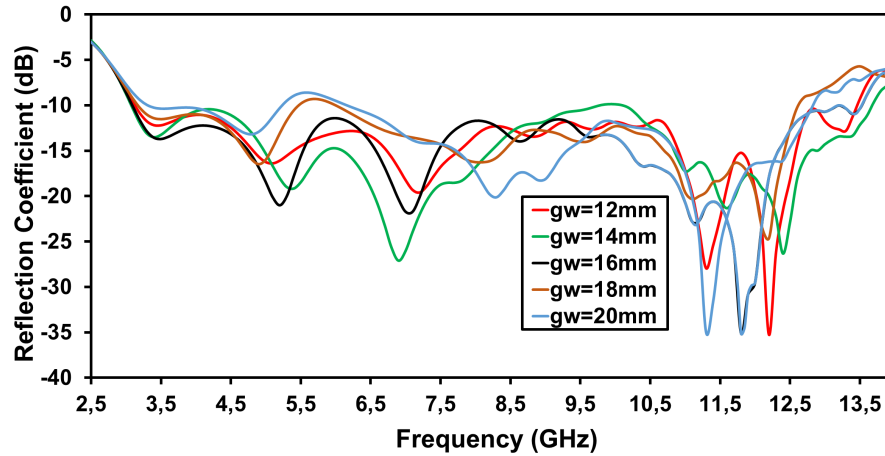


Figure 8. The reflection coefficient of the antenna depending on the ground width

The fluctuation of the reflection coefficient of the antenna versus the outer radius of the circular ring is depicted in Figure 9. The main result can be concluded from this figure is that; the changing of the outer radius mainly effects the lower operating frequency.

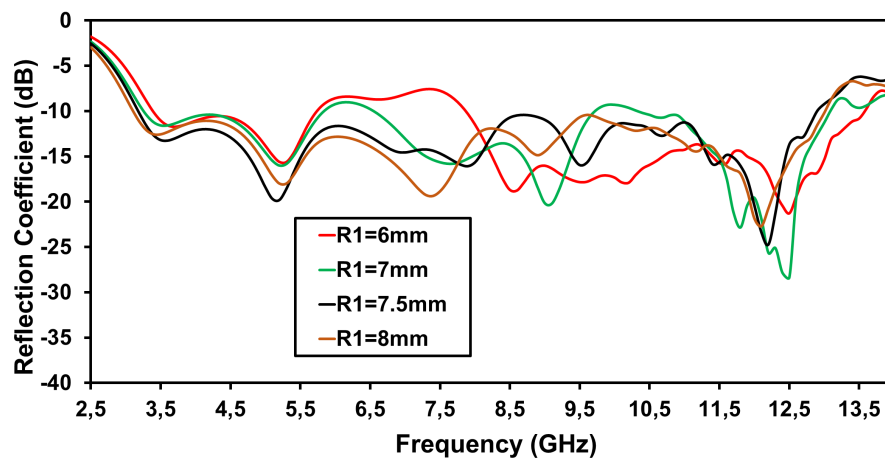


Figure 9. The reflection coefficient of the antenna depending on the outer radius of the ring

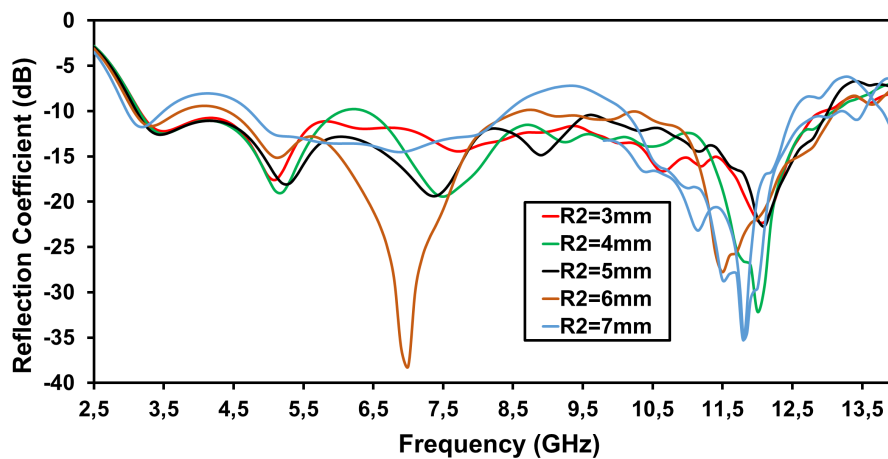


Figure 10. The reflection coefficient of the antenna depending on the inner radius of the ring

In Figure 10, the increasing of the inner radius of the ring monopole from 3 mm to 5 mm does not cause a significant change in the impedance bandwidth of the antenna at the frequencies above 3.5 GHz, however, it decreases the lower operating frequency. As the radius continues to increase, the lower operating frequency continues to decrease. The impedance matching appears to be distorted in some frequency domains for instance in the 3.5 GHz - 4.5 GHz and 7.5 GHz - 10 GHz bands.

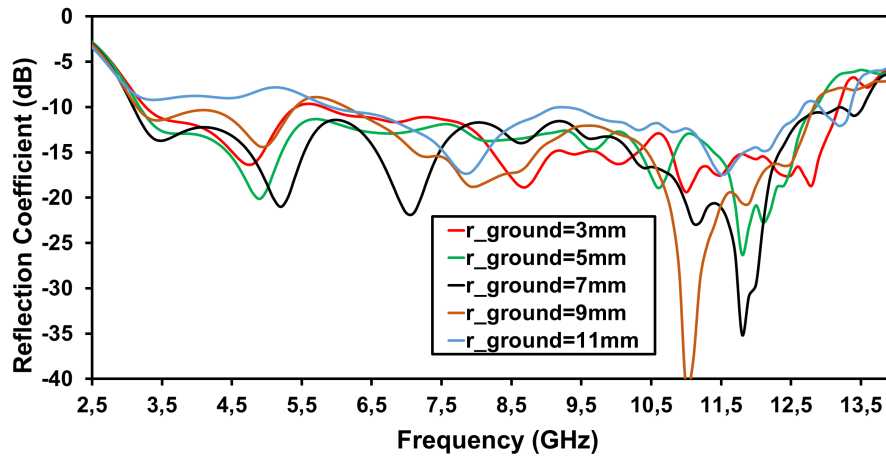


Figure 11. The reflection coefficient of the antenna depending on the radius of the ground’s corner

Lastly, the radius of the circles at the ground plane corners is examined and given in Figure 11. Increasing the radius from 3 mm to 7 mm influences the impedance bandwidth of the antenna positively, while increasing it from 7 mm to 11 mm affects it negatively.

The performance similarities of designed antenna with its counterparts in the literature is also tabulated and added in Table 1. It is clearly seen that Ref. [13, 23] are the most compact antennas. According to the table, the recommended antenna is nearly as compact as Ref. [16,17, 21] and the size of the proposed one is not so bad. In term of the bandwidth and gain, it has a satisfactory value.

Table 1. The comparison chart of the designed antenna

<i>Reference</i>	<i>Size (mm³)</i>	<i>Bandwidth (GHz)</i>	<i>Gain (dBi)</i>
[12]	42 x 50 x 1.5	2.75 - 9.84	N. A.
[13]	18 x 20 x 1.6	3.1 - 10.6	2 – 8
[14]	33 x 28 x 1.4	3 - 12	N. A.
[15]	33 x 28 x 1.4	3 - 12	2 – 7
[16]	26 x 28 x 1.6	3.7 - 18	2 – 7
[17]	26 x 24 x 1.6	2.79 to 11	average 2.9
[18]	20 x 30 x 0.8	3.06 -10.8	2.1- 4.2
[19]	35.5 x 30 x 1.6	2.9 - 10	N. A.
[20]	35 x 30 x 1.6	2.5 to 11.85	4 – 9
[21]	26 x 30 x 1.6	3.10 to 10.60	3 – 7
[22]	24 x 30 x 0.787	1.6–25	-6 – 5.8
[23]	12 x 18 x 1.6	3.5 to 10.6	-16 – 4
[24]	40 x 40 x 1.6	2.56 -13	maximum 2.8
<i>Proposed</i>	20 x 26 x 1.6	3.07 -13.6	1.8 – 3.7

3. CONCLUSION

In this study, the design and analyses of the novel printed ring monopole antenna was presented. The antenna performance parameters were investigated. In addition to this, the parametric analyses on the antenna variables were investigated. The analyzed antenna has a compact size of $20 \times 26 \times 1.6 \text{ mm}^3$, which has the impedance bandwidth of nearly 10.5 GHz from 3.07 GHz to 13.6 GHz covering the entire UWB range. In addition to this, the proposed antenna has an Omni-directional radiation patterns as expected. While it has a more uniform radiation patterns in the low frequency region, it is seen that there is a deterioration in the radiation patterns with the increasing of the frequency according to the figures. The antenna has a nearly maximum gain of 3.7 dBi at the frequencies of 6 GHz, 10.5 GHz and 13.4 GHz and it has a minimum gain value of the 1.82 dBi at the 3 GHz band. As a result, it can be concluded that the designed antenna has a satisfactory performance values for the UWB applications.

REFERENCES

- [1] Fcc, F. C. C. (2002). First report and order on ultra-wideband technology. FCC, Washington, DC, USA.
- [2] Biçer, M. B., & Akdağlı, A. (2017). Designing a compact monopole microstrip antenna operating at ultra-wide band for microwave imaging applications. *Turkish Journal of Engineering*, 1(2), 66-69.
- [3] Vummadisetty, P. N., & Kumar, R. (2016). Design of compact octagonal slotted hexagonal and rectangular shaped monopole antennas for dual/UWB applications. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 24(4), 2806-2824.
- [4] Biçer, M. B., & Akdağlı, A. (2016). Ultra Geniş Bant Uygulamaları için Yeni Bir Yığın Monopole Mikroşerit Anten. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(ÖS2), 21-26.
- [5] Belen, M. A. (2018). Ultra Geniş Band Uygulamaları için Düzlemsel Hat Beslemeli Mikroşerit Anten Tasarımı. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6(4), 938-946.
- [6] Alnahwi, F., Abdulhameed, A., Swadi, H., & Abdullah, A. (2019). A compact wide-slot UWB antenna with reconfigurable and sharp dual-band notches for underlay cognitive radio applications. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 27(1).
- [7] Üstün, D., & Akdağlı, A. (2016). Yeni Bir Melez Optimizasyon Algoritması Kullanarak UMTS, WLAN ve WiMAX Uygulamaları için Çift-Geniş Bantlı Monopole Anten Tasarımı. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(ÖS2), 211-220.
- [8] Çelik, K., & Kurt, E. (2019). A novel meander line integrated E-shaped rectenna for energy harvesting applications. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 29(1), e21627.
- [9] Hedayati, P. (2022). Ultra Wideband Elliptic Monopole Antenna. *Transactions On Electromagnetic Spectrum*, 1(1), 14–18. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6644967>.
- [10] Teksar, A.Y. (2022). Crescent-Shaped Monopole Antenna for WLAN Band. *Transactions On Electromagnetic Spectrum*, 1(1), 1–4. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6643727>.
- [11] Ak, H. H. (2022). On-Body Monopole Antenna Design and Analyses for the UWB Applications. *Transactions On Electromagnetic Spectrum*, 1(1), 19–23. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6646264>.
- [12] Liang, J., Chiau, C. C., Chen, X., & Parini, C. G. (2005). Printed circular ring monopole antennas. *Microwave and Optical Technology Letters*, 45(5), 372-375.

- [13] Hong, S., Shin, J., Park, H., & Choi, J. (2007). Analysis of the band-stop techniques for ultrawideband antenna. *Microwave and optical technology letters*, 49(5), 1058-1062.
- [14] Xiao, J. X., Wang, M. F., & Li, G. J. (2010). A ring monopole antenna for UWB application. *Microwave and optical technology letters*, 52(1), 179-182.
- [15] Xiao, J. X., Wang, M. F., & Li, G. J. (2010). A printed circular-ring monopole antenna with band-notched feature for UWB application. *Microwave and Optical Technology Letters*, 52(4), 827-830.
- [16] Liu, L., Cheung, S. W., Azim, R., & Islam, M. T. (2011). A compact circular-ring antenna for ultra-wideband applications. *Microwave and Optical Technology Letters*, 53(10), 2283-2288.
- [17] Azim, R., Islam, M. T., Mandeep, J. S., & Mobashsher, A. T. (2012). A planar circular ring ultra-wideband antenna with dual band-notched characteristics. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 26(14-15), 2022-2032.
- [18] Yang, M. K., Gao, G. P., Niu, S. F., & Zhang, J. S. (2012). Study of a compact ring monopole UWB antenna with band-notched characteristic. *Microwave and Optical Technology Letters*, 54(10), 2387-2392.
- [19] Shi, R., Xu, X., Dong, J., & Luo, Q. (2014). Design and analysis of a novel dual band-notched UWB antenna. *International Journal of Antennas and Propagation*.
- [20] Srivastava, G., Dwari, S., & Kanaujia, B. K. (2015). A compact triple band notch circular ring antenna for UWB applications. *Microwave and Optical Technology Letters*, 57(3), 668-672.
- [21] Yadav, A., Agrawal, S., & Yadav, R. P. (2017). SRR and S-shape slot loaded triple band notched UWB antenna. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 79, 192-198.
- [22] Manohar, M., Kshetrimayum, R. S., & Gogoi, A. K. (2017). A compact dual band-notched circular ring printed monopole antenna for super wideband applications. *Radioengineering*, 26(1), 64-70.
- [23] Sharma, P., Vyas, K., & Yadav, R. P. (2017). Design and analysis of miniaturized UWB antenna with tunable notched band. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 9(3), 691-696.
- [24] Lamultree, S., Thachanthek, U., Krasinhom, K., & Phongcharoenpanich, C. (2021). An ultra-wideband rectangular monopole with circular ring antenna for wireless communication applications. *Przełąd Elektrotechniczny*, 97(1), 8-11.
- [25] Kumar, G., & Ray, K. P. (2003). *Broadband microstrip antennas*. Artech house.
- [26] Chaudhary, P., & Kumar, A. (2019). Compact ultra-wideband circularly polarized CPW-fed monopole antenna. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 107, 137-145.
- [27] Yeboah-Akouwah, B., Tchao, E. T., Ur-Rehman, M., Khan, M. M., & Ahmad, S. (2021). Study of a printed split-ring monopole for dual-spectrum communications. *Heliyon*, 7(9), e07928.

Three Dimensional (3D) Printing Technology Applications in Polymeric Dressings

Ayşe DEMİRAL^{1,2*}  Faruk MERT^{1,2,3} 

¹Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Translasyonel Tıp Anabilim Dalı, Ankara/TÜRKİYE

²Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Merkez Araştırma Laboratuvarı., Ankara/TÜRKİYE

³Magnum Mühendislik Medikal Ar-Ge Eğt. Dan. San. ve Tic. Ltd. Şti., Ankara/TÜRKİYE

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article
Received: 30/04/2022
Revision: 22/05/2022
Accepted: 25/06/2022

Highlights

- Additive manufacturing
- Wound healing
- Multifunctional polymeric wound dressings

Keywords

Wound dressings
3D printers
Polymeric wound dressings

In this study, polymeric wound dressings produced with 3D printers using various biocompatible polymers were studied and focused on the effects of these dressings on wound healing.

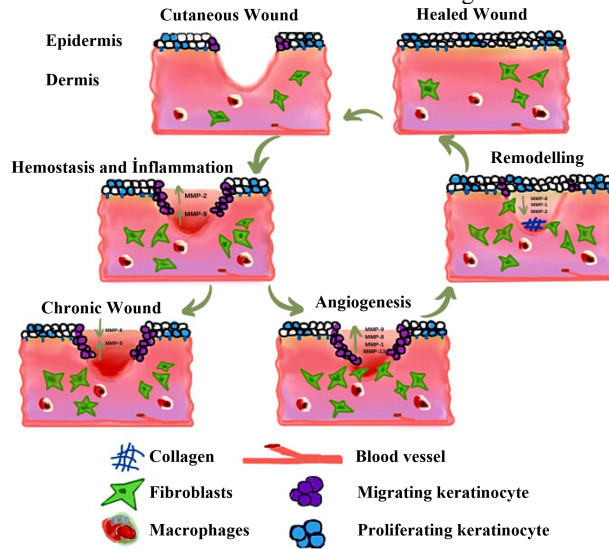


Figure 1. Steps in wound healing

Purpose: Wound dressings are biomaterials of synthetic or biological origin that are frequently used in current wound treatment. Wound dressings have become an indispensable part of the clinical treatment of wounds. The fact that 3D printers allow for personalized production and the production of dressings in dosages has made this technology more remarkable than ever before.

Theory and Methods: Wound dressings can be categorized under three headings: traditional, biological and synthetic dressings. Traditional gauze dressings, elastin and lipid containing collagen sheets biological and biocompatible polymeric materials containing materials such as alginate, fiber, foam, film, colloid and gel are included in synthetic wound dressings.

Results: The applications of 3D printers in the field of health include tissue engineering, tissue and organ models, drug delivery systems, and many other application areas such as implants. In the treatment of chronic wounds and wounds that cannot heal by their own natural mechanism, polymeric dressing materials have been successfully produced using 3D printers.

Conclusion: Polymeric dressings have a remarkable importance in the current wound treatment approach. The biggest advantage of 3D printers in wound treatment is that they allow the production of wound dressings in personalized shapes and drug dosages suitable for the needs of the wound. Polymeric wound dressings produced with 3D printing technology are candidates to be developed as a new generation wound dressing and have the potential to change the lives of many patients.



Three Dimensional (3D) Printing Technology Applications in Polymeric Dressings

Ayşe DEMİRAL^{1,2*} Faruk MERT^{1,2,3}

¹Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Translasyonel Tıp Anabilim Dalı, Ankara/TÜRKİYE

²Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Merkez Araştırma Laboratuvarı., Ankara/TÜRKİYE

³Magnum Mühendislik Medikal Ar-Ge Eğt. Dan. San. ve Tic. Ltd. Şti., Ankara/TÜRKİYE

Abstract

Polymeric wound dressings are frequently preferred in wound treatment because they can be used together with various polymers, are inexpensive, and support wound healing. Nevertheless, the inability to use these dressings on irregularly shaped wounds is a significant problem in wound treatment. Recently, personalized wound dressings using 3D printers have overcome this challenge and have become a very interesting subject for researchers. These personalized wound dressings have removed the limitations in this area by offering patient-specific treatment methods. In this study, literature studies on polymeric wound dressings produced with 3D printers using various biocompatible polymers were examined and focused on the effects of these dressings on wound healing.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 30/04/2022
Düzeltilme: 22/05/2022
Kabul: 25/06/2022

Keywords

Yara örtüleri
3 boyutlu yazıcılar
Polimerik yara örtüleri

Anahtar Kelimeler

Wound dressings
3D printers
Polymeric wound dressings

Polimerik Yara Örtülerinde Üç Boyutlu (3B) Baskı Teknolojisi Uygulamaları

Öz

Polimerik yara örtüleri çeşitli polimerlerin bir arada kullanılabilmesi, ucuz olmaları ve yara iyileşmesini desteklemesi sebebiyle yara tedavisinde sıklıkla tercih edilmektedir. Ancak bu yara örtülerinin düzensiz şekilli yaralarda kullanılmaması yara tedavisinde karşılaşılan önemli bir sorundur. Son zamanlarda 3B yazıcılar kullanılarak kişiye özel üretilen yara örtüleri bu sorunu ortadan kaldırmış ve araştırmacılar için oldukça ilgi çekici bir konu haline gelmiştir. Kişiselleştirilen bu yara örtüleri hastaya özel tedavi yöntemleri sunarak bu alandaki sınırlamaları ortadan kaldırmıştır. Bu çalışmada, çeşitli biyoyumlu polimerler kullanılarak 3B yazıcılar ile üretilen polimerik yara örtüleri ile ilgili literatür çalışmaları incelenmiş ve bu yara örtülerinin yara iyileşmesindeki etkilerine odaklanılmıştır.

1. GİRİŞ

Deri vücudun en büyük organıdır ve yetişkin vücut ağırlığının yaklaşık olarak %15'ini oluşturmaktadır [1]. Deri kendi içinde hipodermis, dermis ve epidermis olarak üç katmandan oluşmaktadır [2]. Deri vücudumuzun dışını tamamen kaplayarak fiziksel bir bariyer oluşturur ve deri üzerinde ağrı, dokunma, basınç, sıcak ve soğuk gibi dış etkileri ve duyuları algılayan almaçlar bulunmaktadır. Aynı zamanda deri vücudu çeşitli fiziksel, kimyasal ve biyolojik etkilerden koruma, ısısal dengenin düzenlenmesi, boşaltım ve D vitamini sentezi gibi yaşamsal faaliyetlerin yerine getirilmesinde hayati bir rol oynamaktadır [3]. Ameliyatlar, travmalar, kronik rahatsızlıklar, yara ve yanıklar gibi çeşitli sebeplerle derinin anatomik bütünlüğünün bozulması ise yara olarak adlandırılır [4]. Yaralar temel olarak akut ve kronik yaralar olmak üzere iki grupta sınıflandırılırlar. Akut yaralar kendi kendine iyileşebilirken kronik yaralar vücudun kendi mekanizması ile iyileşemez ve bu tür yaraların özel bakıma ihtiyacı vardır [5]. Vücudun kendi organizasyonu ile iyileşemeyen bu yaralarda derinin benzeri bir bariyer görevi görerek yarayı dış etkenlerden korumak, kontaminasyonu önlemek ve yara iyileşmesine katkı sağlamak amacıyla yara örtüleri

kullanılmaktadır [6].

Yara örtüleri güncel yara tedavisinde sıklıkla kullanılan sentetik veya biyolojik kaynaklı biyomalzemelerdir. Yara örtüleri yaraların klinik tedavisinin vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Yara örtüleri kendi içinde geleneksel, biyolojik ve sentetik yara örtüleri olmak üzere üç başlık altında sınıflandırılabilir. Yara örtüsü olarak kullanılan geleneksel örtü malzemelerin başında gazlı bezler gelmektedir. Geleneksel yara örtüleri (gazlı bezler, pamuk vb.) genellikle düşük hemostatik etkiye sahiptir ve antibakteriyel aktiviteleri yoktur. Bununla birlikte düzensiz şekilli yaralara tam olarak uyum sağlamaz ve pansuman değişikliğinde yarada travma oluşmasına sebep olur [7]. Biyolojik yara örtüleri ise (greftler) yara yüzeyinde biyolojik bir ortam sağlarlar ve bütün yaralanma tiplerinde kullanılabilirler. Buna karşın biyolojik yara örtüleri canlılardan elde edilmeleri sebebiyle doku uyumsuzluğu, çeşitli immün reaksiyonlara sebep olmaları, maliyetli ve kolay ulaşılabilir olmamaları gibi dezavantajlarından dolayı çok tercih edilmemektedir [8]. Günümüzde ise biyoyumlu polimerik malzemeler kullanılarak yaranın daha hızlı iyileşmesini sağlayan olağanüstü özelliklere sahip yara pansuman malzemeleri elde edilmektedir. Aynı zamanda polimerik yara örtülerinin yapısına eklenen çeşitli antimikrobiyal ajanlar sayesinde yara yüzeyinde çeşitli mikrobiyal oluşumlar engellenerek yara yüzeyinin enfekte olması engellenmekte ve bu şekilde yara iyileşme sürecine katkı sağlanmaktadır.

Günümüzde çok sayıda yara örtüsü geliştirilmiştir [9,10]. Ancak bazı yaraların tedavisinde tek tür yara örtüleri yeterli olmamaktadır [11]. 3B yazıcılar bu tür özel bakıma ihtiyacı olan yaralar için alternatif bir tedavi yöntemi sunmaktadır. 3B yazıcılar ile yara örtüleri üretildiğinde, yara örtüsünün boyutsal özelliklerinin (alan, kalınlık veya gözenek boyutu gibi) ayarlanabilmesi, farklı dozajlarda ilaç yükleme, çok çeşitli materyallerin kullanılması ve gözenek tasarımı gibi farklı parametrelerin ayarlanması mümkündür [12]. Aynı zamanda 3B yazıcıların kişiye özel üretim ve dozajlarda yara örtüsü üretimine imkân sağlaması bu teknolojiyi her zamankinden daha da dikkat çekici hale getirmiş ve bu konu ile ilgili araştırmacıları çalışma yapmaya teşvik etmiştir [13]. Hazırlanan bu çalışmada ise 3B yazıcılar ile basılan yara örtüleri üzerine odaklanılmıştır.

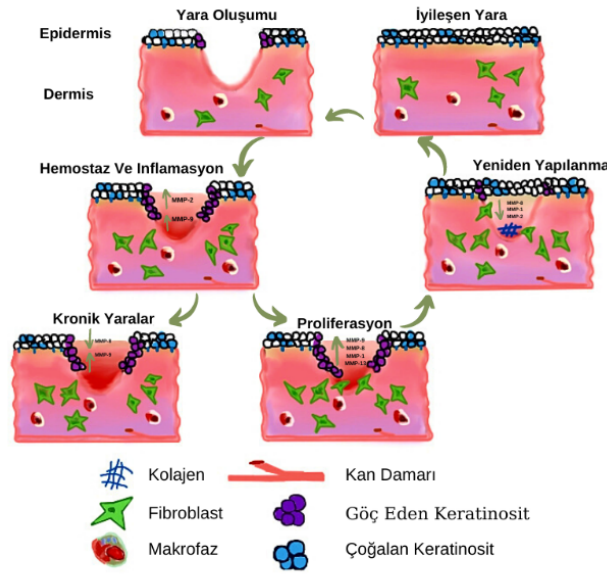
1.1. Yara ve Yaraların Sınıflandırılması

Yara, çeşitli mekanik, kimyasal, termal, ve elektriksel zedelenmeler ya da fizyolojik rahatsızlıklar sonucu vücut dokularının normal fonksiyonlarını yerine getiremediği, hücre veya dokuların yapılarının bozulduğu ya da kayb olduğu durumlar olarak tanımlanabilir [14,15]. Yaralar doku kaybının olup olmamasına, yaranın derinliğine, iyileşme süresine ve yaranın kapanma durumuna göre çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir [16].

Deri kronik hastalıklar veya akut yaralanmalar sonucunda kolaylıkla deforme olabilir [17]. Deride meydana gelen deformasyon epidermal dokuyu etkileyebilir ya da yaranın niteliğine ve derinliğine bağlı olarak dermal tabaka da hasar görebilir. Bu tür hasarlar yaranın altında yatan nedenlere ve sonuçlara bağlı olarak kronik ya da akut yaralar olarak sınıflandırılır. Akut yaralarda uygun bir tedavi süreciyle hasar gören kısmın anatomik ve fonksiyonel bütünlüğünün geri kazandırılması mümkündür. Ancak kronik yaralanmalarda dokunun fonksiyonel ve anatomik bütünlüğün bozulması ya da yaraya neden olan etkenin sürekli olarak kendini tekrarlaması sebebiyle tedavi sonucunda doku eski halini tamamıyla almaz [3].

1.2. Yara İyileşmesi

Yara iyileşmesi dinamik bir biyolojik süreçtir ve bu süreçte yaranın iyileşmesi için vücutta karmaşık ancak birbiri ile uyumlu bir dizi olay gerçekleşir. Bu karmaşık yapılanma süreci boyunca gerçekleşen olaylar göz önünde bulundurularak incelendiğinde yara iyileşmesini çeşitli evrelere ayırarak incelemek bu süreci daha iyi kavramamızı sağlamaktadır. Yara iyileşme sürecini Şekil 1.'de gösterildiği gibi kendi içinde hemostaz, inflamasyon, proliferasyon ve yeniden şekillenme evresi olarak dört evrede incelemek mümkündür [14].



Şekil 1. Yara iyileşmesinde meydana gelen basamaklar [18]

Hemostaz evresi doku kaybının hemen ardından kan kaybını durdurmak için meydana gelen evredir. Plazma faktörleri ile doku faktörlerinin birbiri ile teması sonucu hasarlı bölgedeki kanın pıhtılaşma kademesini tetikler. Trombositler kanın pıhtılaşmasını sağlayarak damarın hasar gören kısmını tıkaç gibi tıkar ve hemostazın sağlanması için gerekli şartları oluşturur. Aynı zamanda hücre dışı matris görevi görerek hücre göçü için uygun ortamı sağlar. Trombositlerden ortama salınan büyüme faktörleri fibroblastların ve makrofaqların bölgeye göç etmesini uyarır [19]. Hasarlı dokunun çevresindeki parankimal doku hücreleri ve trombositlerden büyüme faktörlerinin ve mediyatörlerin ortama salınması hemostaz evresinde gerçekleşir. Ortama salınan bu büyüme faktörleri ve mediyatörler sayesinde yaralı dokuya lökositlerin göçü başlar. Yara bölgesinde pıhtı oluşması başlangıçta kan kaybının önlenmesi ile ilgilidir ancak devam eden evrelerde bu durum yara iyileşmesi ve doku onarımının sonraki aşamalarında bağışıklık hücrelerinin hasarlı bölgeye göçü için bir matris görevi görmesini sağlamaktadır [14].

İnflamasyon evresi beyaz kan hücrelerinin yaralı bölgeye ulaştığı ve yaralı bölgede damarlanmanın olduğu evredir. Bu evre hemostaz evresinde pıhtılaşma süresinde aktive olur ve yaklaşık olarak 3-4 gün sürmektedir. İnflamasyon evresinde kan kaybı önlenir, yaralı bölgeye dışardan yabancı maddelerin girmesi engellenir ve yaralı bölgenin iyileşmesi için gerekli bir dizi biyokimyasal olaylar gerçekleşir. Bu evrenin erken safhalarında yaralı bölgeye ilk ulaşan ve baskın olan hücreler nötrofillerdir. Nötrofiller yaralı bölgedeki bakterileri temizler ve bölgede oluşan nekrotik dokuları parçalar. Yaralanmadan sonraki ilk 24-48 saat aralığında ise bölgede nötrofiller yerine monositler baskın hücre olur. Monositler yaralı bölgede bulunan hücrelerden salınan büyüme faktörlerinin etkisiyle makrofaqlara dönüşür. Bu aşamada makrofaqların görevi yaralı bölgede bulunan hücre kalıntılarını parçalamak ve patojen mikroorganizmaların fagositozunu sağlamaktır. Aynı zamanda makrofaqlar ortama büyüme faktörlerinin, kemokin ve sitokinlerin salgılanmasını sağlayarak yarayı iyileşme için bir sonraki aşamaya hazırlamaktadır [14].

Proliferasyon evresi yaralanmadan üç gün sonra başlar ve yaklaşık olarak üç hafta sürer. Bu evrede hemostaz sağlanmış, makrofaz ve nötrofiller tarafından yara temizlenmiş, makrofaz ve nötrofillerin sayısı azalmaya başlamış ve yaralı bölgede hasarlı dokuların onarımı başlamıştır. Bu evrede hasarlı dokular çok hassastır ve çevrelerinde bulunan dokularla aynı organizasyona sahip değildir [14]. Proliferasyon fazının başarılı bir şekilde gerçekleşmesi için inflamasyon aşamasında ortaya çıkan büyüme faktörlerinin ve sitokinlerin etkisi oldukça fazladır. Bu evrede gerçekleşen en önemli olaylar yeni hücre dışı matrisin, yeni kan damarlarının oluşturulması ve fibroblast hücrelerinin çoğalarak epitelizasyonu gerçekleştirmesidir.

Yaralanmayı takiben 24. gün itibariyle yeniden yapılanma evresi başlar ve bu evre haftalar hatta aylar sürebilir. Bu evrede dokuların yeniden sentezlenmesi, biriktirilmesi ve yeniden yapılanması arasında bir

denge sağlanır [14,20]. Yeniden yapılanma evresinde yüksek miktarda hücresel oluşum ve damar içeren granülasyon dokusu yerini hücresel oluşumlar içeren kabuk dokusuna bırakır ve daha az damar içerir. Bu evrede proliferasyon aşamasında sentezlenen Tip III kolajen üretimi dengeye ulaşır ve Tip III kolajenler Tip I kolajene dönüşür bu sayede kolajen matris daha organize bir hal alarak çapraz bağlarla bağlanır. Böylece dokunun sağlamlığı artar ve yara direnci güçlenir [14,21]. Hücre dışı matris olgunlaşır ve yaranın rengi soluklaşır [15].

1.3. Yara Örtüleri

Yara örtüleri yaralı bölgeyi enfeksiyon ve mikroptan koruyan, iyileşme sürecinde yaralı cilde sağlıklı bir şekilde yapısal ve fizyolojik özelliklerini yeniden kazandıran biyolojik ya da sentetik kaynaklı biyomedikal ürünlerdir [22]. Tarihin çok eski dönemlerinden beri yaranın iyileşmesi ve enfeksiyon kapmaması amacıyla yara tedavisinde uygun malzemeler kullanılmaya çalışılmış ve bu amaca yönelik malzemeler geliştirilmiştir. İlk çağlarda yara tedavisi amacıyla bitkisel lifler, bal ezemeleri ve hayvan esası yağlar yara tedavisinde örtü malzemesi olarak kullanılmıştır [23]. 1800'lü yılların başlarında keten sargılar kullanılmaya başlanmış, sonlarında ise pamuklu bezler yaraların tedavisi amacıyla kullanılmıştır. 1960'lı yıllara gelindiğinde ise Winter domuz yaraları üzerinde çalışmalar yapmış ve bu yaraların tedavisinde polietilen film sargılar kullanarak yara tedavisinde yeni bir yaklaşım geliştirmiştir [24,25]. Günümüzde ise yaraların tedavisinde film, jel, köpük ve sprey gibi birçok farklı formda yara örtü materyali kullanılmaktadır.

İyileşme süreçlerine göre sınıflandırıldığında yaralar akut ve kronik olmak üzere iki gruba ayrılır [5]. Akut yaralar vücudun kendi sahip olduğu mekanizmalarla iyileşebilirken kronik yaralarda böyle bir durum söz konusu değildir. Kronik yaralarda yaraya sebep olan etken sürekli olarak kendini tekrarladığından yara kendiliğinden iyileşemez ya da iyileşmesi çok uzun bir zaman periyodunda gerçekleşir. Kendiliğinden iyileşmesi mümkün olmayan ya da iyileşmesi çok zaman alan bu tür kronik yaralarda yara bakımı ve tedavisi için özel olarak geliştirilmiş örtü malzemelerinin kullanımı büyük önem taşımaktadır. Aşağıda Şekil 2.'de ideal bir yara örtüsünün sahip olması gereken özellikler özetlenmiştir [26,27].



Şekil 2. Yara örtülerinin sahip olması gereken özellikler

Yara örtüleri kendi içinde geleneksel, biyolojik ve sentetik yara örtüleri olmak üzere üç başlık altında kategorize edilebilir. Yara örtüsü olarak kullanılan geleneksel örtü malzemelerin başına gazlı bezler gelmektedir. Gazlı bezler hem ucuz olmaları, hem sterilizasyonlarının kolay olması hem de birçok yara için uygun olmaları sebebiyle tercih edilmiştir. Gazlı bezlere çinko oksit, çinko iyonları veya iyot gibi aktif bileşenler emdirilerek bu bezlerin performans özellikleri arttırılmaktadır. Ancak bu bezler çeşitli malzemeler kullanılarak değişime uğrasa bile yara yüzeyine yapışmaları sonucunda pansuman değişikliği sırasında yeniden oluşan dokuların tahrip olmasına ve yaralı bölgede travmaların oluşmasına sebep olmaktadır [26].

Biyolojik yara örtüleri elastin ve lipid içeren kolajen yapraklara sahip örtülerdir. Yara üzerinde biyolojik bir ortam sağlayan bu örtüler bütün yaralanma tiplerinde kullanılabilirler. Buna karşın biyolojik yara örtüleri canlılardan elde edilmeleri sebebiyle doku uyumsuzluğu, çeşitli immün reaksiyonlara sebep olmaları, maliyetli ve kolay ulaşılabilir olmamaları gibi dezavantajlarından dolayı çok tercih edilmemektedir [8].

Günümüzde ise biyoyumlu polimerik malzemeler kullanılarak yaranın daha hızlı iyileşmesini sağlayan üstün özelliklere sahip yara pansuman malzemeleri elde edilmektedir. Bir yara pansuman malzemesinin etkili bir tasarımı için; üretilen yara örtü malzemesinin mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri, yara tipinin özellikleri ve yara iyileşme sürecine etkileri dikkate alınmaktadır. Geleneksel yara örtülerinden biri olan gazlı bezler hala hastanelerde en sık kullanılan yara pansuman malzemesi olmasın rağmen yara tedavisi için kullanılan polimerik örtüler yapılan araştırma ve geliştirme çalışmalarıyla birçok araştırmacı için oldukça ilgi çekici bir konudur ve üstün özelliklere sahip modern yara örtüleri geliştirilmektedir [26]. Sentetik yara örtü materyalleri aljinat, fiber, köpük, film, kolloid ve jel gibi çeşitli formlarda üretilebilmekte ve sentezlenen malzemeler yaralı bölgenin nemli kalmasını sağlayarak hücre çoğalması için uygun bir ortam oluşturmaktadır. Aynı zamanda sentetik yara örtülerinin yapısına eklenen çeşitli antimikrobiyal ajanlar sayesinde yara yüzeyinde çeşitli mikrobiyal oluşumları engelleyerek yara yüzeyinin enfekte olmasını engellemekte ve yara iyileşme sürecine katkı sağlamaktadır.

1.4. 3B Yazıcılar

Eklemeli imalat olarak da adlandırılan 3B yazıcı teknolojisi bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımı veya bilgisayarlı tomografi (CT) tarafından verilen dijital model verilerini somut nesnelere dönüştürebilen hızlı prototipleme araçlarıdır [28,29]. Stereolithography (STL) dosya formatında dönüştürülen bu veriler katman katman dilimlendikten sonra dosyalar 3B yazıcıya aktarılır ve daha sonra 3B yazıcıda her bir alt tabaka üzerine baskı malzemesinin katman katman biriktirilmesiyle bilgisayar ortamında tasarlanan veriler somut nesnelere dönüştürülür [29]. 3B yazıcılarda katmansal üretim süreci; bilgisayar modelleme, katman katman dilimleme, yazdırma ve son işlem süreci olmak üzere dört temel süreçte incelenebilir [30].

Günümüzde 3B yazıcılar sağlıktan mühendisliğe, otomotiv sektöründen savunma sanayisine kadar oldukça geniş bir yelpazede kullanım alanına sahiptir [31]. 3B yazıcı teknolojisindeki son gelişmeler araştırmacıları bu teknolojinin özellikle tıbbi alanda kullanılabilirliğini denemeye yönlendirmiştir. 3B yazıcıların sağlık alanındaki uygulamaları arasında doku mühendisliği, doku ve organ modelleri, ilaç salım sistemleri, implantlar gibi daha birçok uygulama alanları bulunmaktadır [13]. 3B yazıcıların hastaya özel üretime imkân sağlaması ve ilaç dozlarının tedaviye uygun şekilde belirlenebilmesi gibi üstün özelliklere sahip olması bu alanı daha da ilgi çekici hale getirmiştir [32].

Literatüre bakıldığında ise kronik yaraların ve kendi doğal mekanizması ile iyileşmeyen yaraların tedavisinde 3B yazıcılar kullanılarak polimerik yara örtü malzemeleri başarılı bir şekilde üretilmiştir. Bu yara örtü malzemeleri sentezlenirken doğal ya da sentetik kaynaklı biyoyumlu polimerik malzemeler kullanılmıştır [33].

1.5. 3B Baskılı Yara Örtülerinde Kullanılan Polimerler

3B baskılı yara örtüsü üretiminde kullanılan polimerlerin özellikle biyouyumlu ve kolay yazdırılabilir malzemeler seçilerek sentezlenmesi gerekmektedir. Kullanılacak olan biyomalzeme, hücre dışı matris görevini üstlenerek hücrelere destek sağlamalı ve hücre yenilenmesini desteklemelidir. Doku mühendisliğinde kullanılan polimerik malzemeler elde edildiği kaynağa göre doğal ve sentetik olmak üzere iki grupta incelenebilir. Sıklıkla kullanılan biyobozunur doğal polimerlere örnek olarak kitosan, aljinat, kolajen verilebilir [34]. Bu grupta yer alan sentetik polimerlere ise poliakrilik asit (PAA) Polietilen glikol (PEG), polikaprolakton (PCL) örnek olarak verilebilir. Yara örtüsü olarak kullanılan bu polimerlerin özellikleri ve yara örtüsü olarak kullanılma nedenleri Tablo 1’de verilmiştir.

Kitosan, selülozdan sonra doğada en çok bulunan ikinci doğal polimer olan kitinin deasetilasyonu sonucu elde edilen katyonik bir polimerdir [29]. Kitosan biyouyumluluk, biyobozunurluk, toksik olmama, antimikrobiyal ve antifungal etkiye sahip olma gibi ayırt edici özelliklerinden dolayı biyomedikal alanda yaygın olarak kullanılan bir biyomalzemedir [35]. Aynı zamanda kitosan hemostazı desteklediği ve doku oluşumunu hızlandırdığı için yara iyileşmesini desteklemektedir [36].

Aljinat kahverengi deniz yosunlarından elde edilen, mannuranik asit ve guluronik asit olmak üzere iki fonksiyonel grup içeren anyonik bir polisakkarittir [37]. Aljinatın içerdiği bu fonksiyonel gruplar hidroksil ve karboksil (-OH ve -COOH) uçlara sahiptir ve diğer malzemeler bu uçlar üzerinden aljinata bağlanır. Aljinat bazlı hidrojel mükemmel basılabilirlik, biyouyumluluk, düşük toksisite, nispeten düşük maliyetleri ve Ca^{+2} çapraz bağlayıcı varlığında hızlı jelleşmeleri nedeniyle 3B baskı teknolojisi uygulamalarında sıklıkla tercih edilen bir polimerdir.

Kolajen bağ dokunun en önemli bileşenidir ve yara iyileşmesinde iyileşmenin başlamasından skar oluşumuna kadar geçen bütün evrelerde çok önemli bir işleve sahiptir. Kolajen bağ dokuda bolca bulunur ve biyouyumlu, biyobozunur özellikte bir proteindir [38]. Kolajenin medikal alandaki ilk kullanımı 1970’li yıllara dayanmaktadır. İlk olarak doku çevre kenar bozukluklarının tedavisinde kullanılmış daha sonraki yıllarda ise yara kenarlarının birleştirilmesi için kullanılmıştır. Hemostatik özelliği sayesinde ise yara örtülerinde hemostatik ajan olarak kullanılmaktadır.

Tablo 1. Yara örtüsü olarak kullanılan polimerler ve özellikleri

Polimer	Özelliği	Yara Örtüsü Olarak Kullanımı
Kitosan	Biyouyumlu Biyobozunur Antimikrobiyal Antifungal	Hemostazı destekler Doku oluşumunu hızlandırır
Aljinat	Biyouyumlu Hızlı jelleşme	Yara yüzeyini nemli tutar
Kolajen	Biyouyumlu Biyobozunur	Hemostatik ajan olarak görev yapar
Polikaprolakton (PCL)	Hidrofobik Biyobozunur	Doku yenilenmesini destekler
Polietilen Glikol (PEG)	Hidrofilik Biyouyumlu	Doku yenilenmesini destekler
Poliakrilik Asit (PAA)	Biyouyumlu	pH'ya duyarlı olması

Polikaprolakton (PCL), hidrofobik, biyobozunur özellikte sentetik bir polimerdir. Erime sıcaklığı 58°C, camsı geçiş sıcaklığı -72°C'dir. Düşük erime sıcaklığına sahiptir bu sayede işlenebilirliği kolaydır. Biyobozunma süresi yaklaşık olarak 24 haftadan azdır ve biyobozunur çalışmalarda matris olarak kullanılmaktadır. Doku yenileyici yapıda olduğu kanıtlanmıştır [39].

Polietilen glikol (PEG), hidrofilik, biyoyumlu, esnek özellikte yara örtüsü uygulamalarında sıklıkla tercih edilen sentetik bir polimerdir. PEG bazlı yara örtülerinin özellikle diyabetik yaralarda yara iyileşmesini hızlandırdığı, kolajen birikimi ile hücrelerin büyümesini ve çoğalmasını desteklediği böylece yara kapanmasının hızlandırdığı bildirilmiştir [40].

Poliakrilik asit (PAA), akrilik asit monomerinin serbest radikalik polimerizasyonu ile elde edilmektedir. pH'a duyarlı bir polimer olarak bilinir ve bu özelliğinden dolayı hidrojel yara örtülerinde ilaç salım sistemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır.

1.6. 3B Yazıcılar Kullanılarak Üretilen Polimerik Yara Örtüleri

Long ve ark. (2019), 3B yazıcıda basılmış kitosan-pektin hidrojellerinin yara örtü malzemesi olarak kullanılmalarının uygun olduğunu göstermiştir. Hidrojel, kitosan ve pektin polisakaritlerinin fiziksel çapraz bağlanması ile hazırlanmış ve bu biyopolimerik hidrojele lokal anestezi bir ilaç olan lidokain ilave edilmiştir. Hazırlanan hidrojel, ekstrüzyon tabanlı bir 3B yazıcı kullanılarak basılmış ardından basılan yara örtü malzemesi liyofilize edilmiştir. Çalışma sonunda elde edilen verilere göre 3B yazıcıda elde edilen kitosan-pektin yara örtüsü iyi basılabilirlik, deriye kendiliğinden yapışma, yüksek şişme oranı ve su emme özelliği göstermiştir. Yapılan bu çalışmanın sonuçlarına göre 3B baskılı hidrojinin uygun bir yara örtü malzemesi olabileceği ortaya konmuştur [12].

Bir başka çalışmada, Hafezi ve ark. (2019) 3B baskı kullanarak çapraz bağlayıcı olarak genipin (GE), plastikleştirici olarak gliserol (GLY) ve polietilen glikol (PEG), yara iyileşmesi için model ilaç olarak floresein sodyum içeren çapraz bağlı kitosan (CH) bazlı film matrislerin yara iyileştirici özelliklerini incelemiştir. Elde edilen yara örtü materyalinin esnekliğini arttırmak amacıyla yapıya plastikleştiriciler dâhil edilmiştir. 3B baskılı filmlerin çekme, ilaç salımı, morfolojik özellikleri ve hücre canlılığı gibi özellikleri yapılan testlerle karakterize edilmiş ve elde edilen bulgulara göre pürüzsüz yapıda, yüksek şişme oranına sahip, düşük toksisitede bir yara örtü materyali sentezlenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda sentezlenen bu yara örtü materyalinin kronik yaraların tedavisinde umut verici bir yaklaşım olduğu bildirilmiştir [41].

Teoh ve ark. (2022) yaptıkları çalışmada kişiye özel şekillerde ve hastanın gereksinimine göre farklı dozajlarda kişiselleştirilmiş yara örtüleri sentezlemiştir. İlaç yüklü 3B yazıcı ile basılmış hidrojel yara örtüleri sentezlemek için kitosan metakrilat, ilaç olarak ise lidokain hidroklorür ve levofloksasin kullanılmıştır. Yapılan bu çalışma ile 3B yazıcı kullanılarak özelleştirilebilir şekillerde ve yaranın iyileşmesi için gerekli olan farklı dozajlarda ilaç içeren yara örtülerinin üretilebileceği gösterilmiştir [42].

İlhan ve ark. (2020) diyabetik yaraların tedavisinde kullanılmak üzere 3B yazıcı kullanarak anti-diyabetik ve antibakteriyel kompozit iskeleler geliştirmiştir. Bu kompozit yapı iskeleleri hazırlamak için sodyum aljinat ve poli(etilen glikol) kullanılmış ve yapıya antibakteriyel aktiviteye sahip *Satureja cuneifolia* (SC) bitki ekstresi yüklenmiştir. Elde edilen yara örtüsünün morfolojik, termal, mekanik ve antibakteriyel aktivitesinin yanında MTT testi kullanılarak sitotoksitesi incelenmiştir. Yapılan antibakteriyel test sonucundan 3B yazıcı ile basılan yara örtüsünün yapısında bulunan *Satureja cuneifolia* nedeniyle *E.coli* ve *S.aureus*'a karşı olağanüstü antibakteriyel etki gösterdiği bildirilmiştir. MTT testi sonucunda sentezlenen yara örtü materyalinin fibroblast hücreleri üzerinde sitotoksik etkiye sahip olmadığı görülmüştür. Elde edilen bu 3B baskılı SA/PEG/SC yara örtüsü diyabetik yaraların tedavisinde ve bakteriyel enfeksiyonlara karşı umut vadeden potansiyel bir adaydır [43].

Muwaffak ve ark. (2017), 3B baskılı PCL bazlı ve farklı metallerle (bakır, gümüş ve çinko) yüklü hastaya özgü yara örtüleri üretmiş ve bu yara örtülerini fiziksel ve antimikrobiyal özellikleri açısından karakterize etmişlerdir. Bu yara örtülerinin şeklini hastaya göre özelleştirmek amacıyla burun ve kulağın 3B taranmış

modeli 3B yazıcıda bastırılarak zor şekilli yaralarda kullanımı incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda 3B taranmış ve 3B baskılı kişiselleştirilmiş yara örtülerinin özel şekilli yaralarda kullanım potansiyeline sahip olduğu ve yara iyileşmesini desteklediği sonucuna varılmıştır [44].

Literatürde yapılan diğer çalışmalar için genel bir değerlendirme yapıldığında, araştırmaların daha çok yeni malzeme ve yeni ajanlar geliştirme, multi fonksiyona sahip yara örtüleri ve 3B baskı tekniklerinin optimize edilmesi üzerine yoğunlaştığı görülmektedir.

2. SONUÇ

Polimerik yara örtüleri güncel yara tedavisi yaklaşımında dikkat çeken bir öneme sahiptir. Polimerik yara örtüleri yara bakım şekli ve yara sıvısı değişiklik gösteren özel yaralarda farklı polimerlerin üstün özelliklerinin bir arada kullanılmasına imkân sağlayarak yara iyileşmesini desteklemektedir. Ancak bu yara örtülerinin hastaya uyumu ve hastaya uygun ilaç dozajlarında üretilerek hastanın yaşam kalitesinin artırılması için geliştirilmeye ihtiyacı bulunmaktadır. Gelişen teknoloji ile kendine özgü ve zor yara tiplerinde 3B yazıcılar kullanılmaya başlanmış ve bu alanda yeni bir tedavi yaklaşımı geliştirilmiştir. 3B baskı ile üretilen polimerik yara örtüleri geleneksel yöntemde kullanılan yara örtüleri ile kıyaslandığında hem çeşitli polimerlerin bir arada kullanılmasına imkân sağlaması hem de yara örtüsünün şekil, kalınlık, gözeneklilik gibi özelliklerinin ayarlanması hem de antimikrobiyal aktivite gibi yara iyileşmesini arttıracak ajanların yapıya dâhil edilmesi gibi avantajlar sayesinde yara tedavisinde etkili bir tedavi süreci sunmaktadır. 3B yazıcıların yara tedavisinde sağladığı en büyük avantaj ise yara örtülerinin kişiye özel şekillerde ve yaranın ihtiyacına uygun ilaç dozajlarında üretilmesine olanak sağlamasıdır. Ancak bu yeni teknolojinin geliştirilmesi amacıyla daha çok klinik çalışmaya ihtiyaç duyulmakta ve yüksek maliyet gibi sorunların üstesinden gelinmelidir. Şu ana kadar yapılan çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda 3B baskı teknoloji ile üretilen polimerik yara örtüleri yeni nesil yara örtüsü olarak geliştirilmeye adaydır ve birçok hastanın hayatını değiştirme potansiyeline sahiptir.

KAYNAKLAR

- [1] R. Portela, C. R. Leal, P. L. Almeida, and R. G. Sobral, "Bacterial cellulose: a versatile biopolymer for wound dressing applications," *Microb. Biotechnol.*, vol. 12, no. 4, pp. 586–610, Jul. 2019, doi: <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13392>.
- [2] A. Subramanian, U. M. Krishnan, and S. Sethuraman, "14 - Skin tissue regeneration," in *Woodhead Publishing Series in Biomaterials*, L. A. Bosworth and S. B. T.-E. for T. R. Downes, Eds. Woodhead Publishing, 2011, pp. 298–316.
- [3] E. M. Tottoli, R. Dorati, I. Genta, E. Chiesa, S. Pisani, and B. Conti, "Skin Wound Healing Process and New Emerging Technologies for Skin Wound Care and Regeneration," *Pharmaceutics*, vol. 12, no. 8. 2020, doi: 10.3390/pharmaceutics12080735.
- [4] S. Eming, P. Martin, and M. Tomic-Canic, "Wound repair and regeneration: Mechanisms, signaling, and translation," *Sci. Transl. Med.*, vol. 6, pp. 265sr6-265sr6, Dec. 2014, doi: 10.1126/scitranslmed.3009337.
- [5] M. E. Okur, I. D. Karantas, Z. Şenyiğit, N. Üstündağ Okur, and P. I. Sifaka, "Recent trends on wound management: New therapeutic choices based on polymeric carriers," *Asian Journal of Pharmaceutical Sciences*, vol. 15, no. 6. Shenyang Pharmaceutical University, pp. 661–684, Nov. 01, 2020, doi: 10.1016/j.ajps.2019.11.008.
- [6] V. Jones, J. E. Grey, and K. G. Harding, "Wound dressings," *BMJ*, vol. 332, no. 7544, pp. 777 LP – 780, Mar. 2006, doi: 10.1136/bmj.332.7544.777.

- [7] Z. Feng *et al.*, “Bioinspired Nanofibrous Glycopeptide Hydrogel Dressing for Accelerating Wound Healing: A Cytokine-Free, M2-Type Macrophage Polarization Approach,” *Adv. Funct. Mater.*, vol. 30, no. 52, p. 2006454, Dec. 2020, doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.202006454>.
- [8] K. A. Rieger, N. P. Birch, and J. D. Schiffman, “Designing electrospun nanofiber mats to promote wound healing – a review,” *J. Mater. Chem. B*, vol. 1, no. 36, pp. 4531–4541, 2013, doi: [10.1039/C3TB20795A](https://doi.org/10.1039/C3TB20795A).
- [9] H. F. Oldenkamp, J. E. Vela Ramirez, and N. A. Peppas, “Re-evaluating the importance of carbohydrates as regenerative biomaterials,” *Regen. Biomater.*, vol. 6, no. 1, pp. 1–12, Feb. 2019, doi: [10.1093/rb/rby023](https://doi.org/10.1093/rb/rby023).
- [10] J. R. Clegg, A. M. Wagner, S. R. Shin, S. Hassan, A. Khademhosseini, and N. A. Peppas, “Modular fabrication of intelligent material-tissue interfaces for bioinspired and biomimetic devices,” *Prog. Mater. Sci.*, vol. 106, p. 100589, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.100589>.
- [11] M. Alizadehgiashi *et al.*, “Multifunctional 3D-Printed Wound Dressings,” *ACS Nano*, vol. 15, no. 7, pp. 12375–12387, 2021, doi: [10.1021/acsnano.1c04499](https://doi.org/10.1021/acsnano.1c04499).
- [12] J. Long, A. E. Etcheberria, A. V. Nand, C. R. Bunt, S. Ray, and A. Seyfoddin, “A 3D printed chitosan-pectin hydrogel wound dressing for lidocaine hydrochloride delivery,” *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 104, no. June, p. 109873, 2019, doi: [10.1016/j.msec.2019.109873](https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.109873).
- [13] Z. Al-Dulimi, M. Wallis, D. K. Tan, M. Maniruzzaman, and A. Nokhodchi, “3D printing technology as innovative solutions for biomedical applications,” *Drug Discovery Today*, vol. 26, no. 2. Elsevier Ltd, pp. 360–383, Feb. 01, 2021, doi: [10.1016/j.drudis.2020.11.013](https://doi.org/10.1016/j.drudis.2020.11.013).
- [14] M. Gizaw, J. Thompson, A. Faglie, S.-Y. Lee, P. Neuenschwander, and S.-F. Chou, “Electrospun Fibers as a Dressing Material for Drug and Biological Agent Delivery in Wound Healing Applications,” *Bioengineering*, vol. 5, no. 1. 2018, doi: [10.3390/bioengineering5010009](https://doi.org/10.3390/bioengineering5010009).
- [15] G. Altay, P. ve Başal, “Yara örtüleri,” *Tekst. Teknol. Elektron. Derg.*, vol. 4, pp. 109–121, 2010.
- [16] E. Merlin-Manton, “Wound care: Selecting the right dressings,” *Pract. Nurse*, vol. 47, Aug. 2017.
- [17] A. Gupta, M. Kowalczyk, W. Heaselgrave, S. T. Britland, C. Martin, and I. Radecka, “The production and application of hydrogels for wound management: A review,” *Eur. Polym. J.*, vol. 111, pp. 134–151, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2018.12.019>.
- [18] T. Nguyen, S. Mobashery, and M. Chang, “Roles of Matrix Metalloproteinases in Cutaneous Wound Healing,” 2016.
- [19] A. J. Singer and R. A. F. Clark, “Cutaneous Wound Healing,” *N. Engl. J. Med.*, vol. 341, no. 10, pp. 738–746, Sep. 1999, doi: [10.1056/NEJM199909023411006](https://doi.org/10.1056/NEJM199909023411006).
- [20] G. Castellanos, Á. Bernabé-García, J. M. Moraleda, and F. J. Nicolás, “Amniotic membrane application for the healing of chronic wounds and ulcers,” *Placenta*, vol. 59, pp. 146–153, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.placenta.2017.04.005>.
- [21] F. Strodtbeck, “Physiology of wound healing,” *Newborn Infant Nurs. Rev.*, vol. 1, no. 1, pp. 43–52, 2001, doi: <https://doi.org/10.1053/nbin.2001.23176>.
- [22] O. Akturk, A. Tezcaner, H. Bilgili, M. S. Deveci, M. R. Gecit, and D. Keskin, “Evaluation of sericin/collagen membranes as prospective wound dressing biomaterial,” *J. Biosci. Bioeng.*, vol. 112, no. 3, pp. 279–288, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2011.05.014>.

- [23] P. Zahedi, I. Rezaeian, S.-O. Ranaei-Siadat, S.-H. Jafari, and P. Supaphol, "A review on wound dressings with an emphasis on electrospun nanofibrous polymeric bandages," *Polym. Adv. Technol.*, vol. 21, no. 2, pp. 77–95, Feb. 2010, doi: <https://doi.org/10.1002/pat.1625>.
- [24] G. D. WINTER, "Formation of the Scab and the Rate of Epithelization of Superficial Wounds in the Skin of the Young Domestic Pig," *Nature*, vol. 193, no. 4812, pp. 293–294, 1962, doi: [10.1038/193293a0](https://doi.org/10.1038/193293a0).
- [25] J. P. E. Junker, R. A. Kamel, E. J. Catterson, and E. Eriksson, "Clinical Impact Upon Wound Healing and Inflammation in Moist, Wet, and Dry Environments," *Adv. wound care*, vol. 2, no. 7, pp. 348–356, Sep. 2013, doi: [10.1089/wound.2012.0412](https://doi.org/10.1089/wound.2012.0412).
- [26] E. Caló and V. V. Khutoryanskiy, "Biomedical applications of hydrogels: A review of patents and commercial products," *Eur. Polym. J.*, vol. 65, pp. 252–267, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.11.024>.
- [27] K. Vowden and P. Vowden, "Wound dressings: principles and practice," *Surg.*, vol. 35, no. 9, pp. 489–494, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mpsur.2017.06.005>.
- [28] W. Yeong, C. Chua, K. Leong, M. Chandrasekaran, and M. Lee, "Indirect fabrication of collagen scaffold based on inkjet printing technique," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 12, no. 4, pp. 229–237, Jan. 2006, doi: [10.1108/13552540610682741](https://doi.org/10.1108/13552540610682741).
- [29] M. Rajabi, M. McConnell, J. Cabral, and M. A. Ali, "Chitosan hydrogels in 3D printing for biomedical applications," *Carbohydrate Polymers*, vol. 260. Elsevier Ltd, May 15, 2021, doi: [10.1016/j.carbpol.2021.117768](https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.117768).
- [30] L. Aydın and S. Küçük, "Design and Construction of Ankle Foot Orthosis By Means Of Three Dimensional Printers," vol. 20, no. 1, pp. 1–8, 2017.
- [31] H. Q. *et al.*, "Three-dimensional printing in surgery: A review of current surgical applications," *J. Surg. Res.*, vol. 199, Jul. 2015, doi: [10.1016/j.jss.2015.06.051](https://doi.org/10.1016/j.jss.2015.06.051).
- [32] N. A. Elkasabgy, A. A. Mahmoud, and A. Maged, "3D printing: An appealing route for customized drug delivery systems," *International Journal of Pharmaceutics*, vol. 588. Elsevier B.V., Oct. 15, 2020, doi: [10.1016/j.ijpharm.2020.119732](https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2020.119732).
- [33] G. Janarthanan, H. N. Tran, E. Cha, C. Lee, D. Das, and I. Noh, "3D printable and injectable lactoferrin-loaded carboxymethyl cellulose-glycol chitosan hydrogels for tissue engineering applications," *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 113, Aug. 2020, doi: [10.1016/j.msec.2020.111008](https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.111008).
- [34] Z. Gün Gök, K. Günay, M. Arslan, M. Yiğitoğlu, and İ. Vargel, "Coating of modified poly(ethylene terephthalate) fibers with sericin-capped silver nanoparticles for antimicrobial application," *Polym. Bull.*, 2019, doi: [10.1007/s00289-019-02820-0](https://doi.org/10.1007/s00289-019-02820-0).
- [35] S. Ahmed and S. Ikram, "Chitosan Based Scaffolds and Their Applications in Wound Healing," *Achiev. Life Sci.*, vol. 10, no. 1, pp. 27–37, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.als.2016.04.001>.
- [36] A. M. Cardoso *et al.*, "Chitosan hydrogels containing nanoencapsulated phenytoin for cutaneous use: Skin permeation/penetration and efficacy in wound healing," *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 96, pp. 205–217, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.11.013>.
- [37] J. Wróblewska-Krepsztul, T. Rydzkowski, I. Michalska-Požoga, and V. K. Thakur, "Biopolymers for Biomedical and Pharmaceutical Applications: Recent Advances and Overview of Alginate Electrospinning," *Nanomaterials*, vol. 9, p. 404, Mar. 2019, doi: [10.3390/nano9030404](https://doi.org/10.3390/nano9030404).

- [38] A. D. Sezer, “Biopolymers as Wound Healing Materials: Challenges and New Strategies,” E. C. E.-R. Pignatello, Ed. Rijeka: IntechOpen, 2011, p. Ch. 19.
- [39] A. Eskandarinia *et al.*, “A Novel Bilayer Wound Dressing Composed of a Dense Polyurethane/Propolis Membrane and a Biodegradable Polycaprolactone/Gelatin Nanofibrous Scaffold,” *Sci. Rep.*, vol. 10, no. 1, p. 3063, 2020, doi: 10.1038/s41598-020-59931-2.
- [40] J. Sharifi-Rad, M. Sharifi-Rad, S. M. Hoseini-Alfatemi, M. Iriti, M. Sharifi-Rad, and M. Sharifi-Rad, “Composition, Cytotoxic and Antimicrobial Activities of Satureja intermedia C.A.Mey Essential Oil,” *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 16, no. 8. 2015, doi: 10.3390/ijms160817812.
- [41] F. Hafezi, N. Scoutaris, D. Douroumis, and J. Boateng, “3D printed chitosan dressing crosslinked with genipin for potential healing of chronic wounds,” *Int. J. Pharm.*, vol. 560, no. January, pp. 406–415, 2019, doi: 10.1016/j.ijpharm.2019.02.020.
- [42] J. H. Teoh, S. M. Tay, J. Fuh, and C. H. Wang, “Fabricating scalable, personalized wound dressings with customizable drug loadings via 3D printing,” *J. Control. Release*, vol. 341, no. September 2021, pp. 80–94, 2022, doi: 10.1016/j.jconrel.2021.11.017.
- [43] E. Ilhan *et al.*, “Development of Satureja cuneifolia-loaded sodium alginate/polyethylene glycol scaffolds produced by 3D-printing technology as a diabetic wound dressing material,” *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 161, pp. 1040–1054, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2020.06.086.
- [44] Z. Muwaffak, A. Goyanes, V. Clark, A. W. Basit, S. T. Hilton, and S. Gaisford, “Patient-specific 3D scanned and 3D printed antimicrobial polycaprolactone wound dressings,” *Int. J. Pharm.*, vol. 527, no. 1–2, pp. 161–170, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.ijpharm.2017.04.077.



Irrigation in Agriculture and Automation Based Irrigation Systems (Mini-Review)

Mustafa ARIK^{1,*} İhsan KORKUT¹

¹Gazi University, Faculty of Technology, Department of Manufacturing Engineering, ANKARA/ TURKEY

Article Info

Research article
Received: 25/04/2022
Revision: 14/05/2022
Accepted: 26/06/2022

Keywords

Irrigation,
Agriculture,
Smart system,
Automation,
Modern applications

Abstract

With the technological developments, modern agricultural applications and the effects of these applications in daily life are increasing day by day. Automation-based smart systems, which have replaced old-style fixed irrigation systems created for only a specific purpose, have brought along remote-controllable agricultural productions in line with agricultural product needs. Automation-based smart irrigation systems have brought significant gains to the agricultural sector. The most important of these gains are time, cost, and labor savings. This study tried to summarize the research on smart (automatic) irrigation systems in the last seven years and emphasize the necessity and advantages of automatic irrigation systems.

1. INTRODUCTION

It is predicted that the world population will increase rapidly, reaching 8 billion in 2025 and 9.15 billion in 2050. Parallel to this increase, it is estimated that the current population's food requirement will increase by 60% by 2025. To maintain vitality, agricultural production should be increased to meet the food demand that will increase in parallel with the population increase [1]. Researches and predictions show that in addition to the increasing food requirement, the population increase will increase the water requirement in the world and the clean water resources will gradually decrease. It is predicted that after 2030, there will be water scarcity across the world and this situation will cause significant water crises [2]. Existing clean water resources and arable land are of great importance in the production of agricultural products that are needed/will be needed. For this reason, it was understood that agricultural lands and water should be used efficiently to slow down the speed of the crisis scenario foreseen in the coming years.

Agricultural irrigation is the sector where freshwater resources are used the most, not only in Turkey but also in the world. Agricultural irrigation is carried out on 280 million hectares of land, which corresponds to 19% of the world's agricultural lands [1] Approximately 70% of freshwater resources are used for agricultural irrigation [3,4]. However, it is reported that the share of clean water resources allocated for agricultural production is gradually decreasing with the increasing need for drinking water worldwide [5]. Considering the increasing population, increasing food needs, and climate change, it is seen that the most important natural resource necessary for human life is water [6]. As a result, more effective and efficient use of water allocated for agriculture is becoming increasingly important [7].

The socio-economic development of Turkey and the decrease in migration from rural areas to cities significantly depend on the increase in productivity in agricultural production. The increase in productivity in agricultural production is directly related to developments in the agricultural sector and agricultural irrigation efficiency. Turkey has in total 28×10^6 hectares of agricultural land. 25.8×10^6 hectares of this land is an irrigable specialty. It is known that Turkey has a water potential of 112×10^9 m³/year. These potential existing water resources are used to meet drinking, irrigation, and industrial needs [8]. Unless the current

irrigation technologies are improved, it is predicted that only 8.6×10^6 ha area of water resources that can be used for irrigation in agriculture can be irrigated [9]. Therefore, in our country, it is necessary to develop new strategies for the management of usable water in the agricultural sector, the design of new irrigation systems, and irrigation planning [10,11].

The irrigation system refers to how water is delivered to the soil i.e. the plant's root zone. There are two types of irrigation systems: surface irrigation (wild) and pressure irrigation. Drip irrigation and sprinkler irrigation systems are examples of pressure irrigation systems. It is well understood that pressure irrigation techniques allow for more efficient water use in agricultural irrigation. Approximately 85% of the irrigated agricultural areas in the world are irrigated by wild irrigation and 15% (44 million ha) are irrigated using pressurized irrigation methods [12,13]. In addition, sprinkler irrigation is used in 35 million hectares of irrigated agricultural areas worldwide, while drip irrigation is used in 9 million hectares [13].

Sprinkler irrigation system, in its most basic form, is an irrigation technique in which water from any water source, such as a river, canal, or well, is conveyed to sprinkler heads under pressure via closed pipes and then sprayed to the plants as uniformly [14]. The following are the primary reasons for the widespread use of sprinkler irrigation systems in agricultural irrigation:

- (i). Since irrigation water is transmitted through closed pipes, water transmission losses are eliminated.
- (ii). System performance is high in all soils except heavy soils with excessive clay content.
- (iii). The water application efficiency is high with good management.
- (iv). It provides an increase in plant product efficiency as water can be applied homogeneously to the plants.
- (v). Even if there are suspension particles in the irrigation water, the probability of clogging in the irrigation system's nozzles is low.

However, it is also known that the performance of the sprinkler irrigation system depends on the selection of the right pump and power source, pipelines, and sprinkler heads [14]. Studies on the examination/development of the system parameters expressed to increase the sprinkler irrigation performance are continuing [4,15].

2. AUTOMATION BASED IRRIGATION SYSTEMS

Advances in technology have led to rapid progress in the agricultural sector, as in many areas today. Studies have started to be carried out to meet the increasing food needs in parallel with the increasing population and to ensure the efficient use of natural freshwater resources. In this context, the development and use of automation-based irrigation systems in agricultural production have gained importance.

Arif and Abbas (2015)[16] developed an Arduino-based greenhouse control system. It was reported that soil moisture, relative humidity, temperature, CO₂, and light measurements can be made successfully. By using a wireless sensor network, they automatically controlled the irrigation system required for the greenhouse. They reported that with the developed system, the workforce was reduced and remote control and monitoring were provided. In another study, the researchers who took temperature and humidity measurements from every point of the garden and evaluated the measurement data with the fuzzy logic method designed a Zigbee-based garden irrigation system [17]. An irrigation system was developed as a solar-powered plant [18]. System control was done with Arduino Uno. It was aimed to determine the optimum amount of water needed by the plant and to meet the water need of the plant efficiently. Thanks to the buttons on the LCD Shield, the plant type was reported to Arduino and the humidity rate was determined. Humidity was checked with Arduino Uno, when the humidity decreased, the photo was taken with Raptery-pi before watering the plant and sent to the e-mail of the grower. The plant was irrigated until the humidity reached the determined level. In case of the end of irrigation, the watered photo of the plant was taken with Raptery-pi again and sent to the e-mail of the grower. In the cited study, it was reported that the energy used was entirely provided by the solar panel.

Kopdra and Martin (2016)[19] carried out the design and application of a smart irrigation system with the help of an Arduino microcontroller. In the design, Arduino Yun, real-time clock DS1302, two humidity

sensors, relay, and solenoid valve were used. A mobile application interface was developed for the control of the irrigation system. Java programming language was used for mobile application technology for remote control of irrigation. In this way, it was able to control from both phones and tablets. Mritunjay et al. (2016) [20], the main purpose of their work was to prevent negative situations that may arise from forgetfulness and to contribute to the pleasure of growing plants. In this study, it was conducted studies on the irrigation of potted plants. Designing the sprinkler irrigation system was used Arduino board. The Arduino board was programmed to sense the humidity level of the plants and supply water when needed. The system was coded to irrigate twice a day. The software, which reminds the user to refill in case the water tank was empty, was designed to help the user. Kavianand et al (2016)[21] designed a fully automatic irrigation system. The designed system consisted of GSM, ARM processors, soil moisture sensor, soil pH sensor, and drip irrigation system. A solenoid valve was used for irrigation system control. When soil fertilizer was added to the irrigation system, not only soil moisture but also soil pH were taken into account in controlling the irrigation system. In addition, a comparison of the sprinkler irrigation system and the system in terms of water consumption was made in the study. It was emphasized that the designed system consumes less water. It was reported that there was no need for manpower in the designed system. Patil et al. (2016)[22] designed an irrigation system using Arduino Uno. In this designed system, Arduino, Arduino compatible Ethernet shield, and Arduino compatible motor shield were used. In general, soil moisture in the system was measured with a soil moisture sensor. The measured humidity value was evaluated by Arduino. If it was below a predetermined threshold value, the servo motor was started and irrigation was started. When the moisture value of the soil was exceeded the threshold value, the servo motor was turned off and irrigation was finished. All these operations and instant humidity value information were present to the user via the Ethernet shield.

Karaca et al. (2017)[23] investigated moisture sensors, which were widely used in agricultural irrigation and were used to determine the amount of moisture in the soil. The importance of these sensors in terms of sustainable agriculture was determined. As a result of their research and examination, the researchers were seen that FDR-type soil moisture sensors were more widely used because of their low cost, but they have some disadvantages. They emphasized that farmers should be informed about the disadvantages of these sensors. Suman et al. (2017)[24] stated that the soil moisture level was critical for crop growth. For this purpose, the researchers conducted the necessary research to keep the soil moisture level under control. The researchers, created a development-ready automatic irrigation system, supported the system with rainwater collection technology, and smart wireless humidity sensors. Solar panels were used to improve the system's efficiency. In this paper, it was also mentioned that a smoke sensor can be added to prevent fires. Rehman et al. (2017)[25] stated that the deficiencies that occur with the manual irrigation method can be eliminated with the automatic irrigation method. In this study, it was stated that humidity sensors, temperature sensors, and soil moisture sensors were the most important elements for automatic irrigation systems. In the examined design, the GSM feature was used. The needed power was provided with solar panels. The motors were designed to start and stop automatically when the soil moisture was reached the lower or upper limit values determined by the user. When the motor started or stopped, the information was sent to the user via SMS. Thus, it was determined that the wasted water had decreased. Less margin of error was provided due to less labor. Due to solar energy, and uninterrupted electricity supply was provided. In another study, Kumar et al. (2017)[26] designed an automatic irrigation system using a microcontroller, temperature, and humidity sensor. A system was created that allows the temperature and humidity changes of the environment to be detected with the help of sensors and the pump to operate by sending a signal by the microcontroller. It was stated that the designed system was less costly than other systems. By using the developed system, it was stated that the farmers could irrigate overnight and there was no need for them to be physically present while irrigating. To more efficiently use water, Taneja and Bhatia (2017) [27] developed a new automatic irrigation system, using sensor technology together with Arduino. There were two humidity sensors in the designed system. These were the soil moisture sensor placed in the soil and the water level sensor placed in the water tank where water was pumped in irrigation. As a result, it was emphasized that automatic irrigation systems should be used to optimize the use of water resources.

Kizil et al. (2018) [28] experimentally investigated the calibration and data generation capabilities of resistive soil moisture sensors, which were easy to find and have low cost. While doing this study, they measured the decrease in the moisture content in the sand with the help of a sensor and compared these data

with the weight reduction with the help of a specially designed device. As a result of these controlled experiments, the average regression coefficient was determined as 0.91, and it was emphasized that this value was statistically significant. García et al. (2018)[29] developed a model called the Intelligent Photovoltaic Irrigation Manager (SPIM), which powers irrigation systems with photovoltaics. SPIM was used to simulate the management of photovoltaic irrigation of an olive grove in southern Spain during the irrigation season of 2013. To operate the irrigation system efficiently; was used common climate, crop, hydraulic, and soil data. This irrigation system met the water needs of the crop during the irrigation season. When the irrigation was not sufficient, the system detected it and increased the irrigation time for the next days. In addition, it was reported that it prevents 1.2 tons of CO₂ emissions since only solar-generated electricity from the panels was used. Wazed et al. (2018) [30] conducted research on PV and solar thermal technologies to pump water for irrigation of remote rural farms. Studies were shown that the best way to optimize the cost and design of the PV-powered system was to conduct extensive field research to understand the crop requirements and analyze the operating conditions of the system. It was determined that the cost of the PV system was lower than other motorized systems, it was effective on environmental problems and reduced its carbon footprint. This study was shown that solar technology has great potential to meet the requirements of the small-scale rural farm. It was presented that the research on these systems was minimal and there was little data on feasibility. Yang et al. (2018) [31] proposed an IoT-based greenhouse system that uses cloud services for data storage and Hadoop for data analysis. In this greenhouse system, environmental data were collected from sensors such as humidity, temperature, amount of light, CO₂, O₂, O₃, NO₂. ESP8266 Wifi module, which uses TCP protocol, was used for sending data. Data stored in MySQL periodically were transferred to the cloud platform and analyzed with Hadoop HDFS. The analyzed data was presented to the end-user via the web and android interface. Aliev et al. (2018) [32] proposed an IoT-based system that detects temperature, humidity, and soil moisture as environmental parameters and also predicts the weather with neural network technique. STM32L476RG microcontroller was used to control the sensors and ESP-12 Wifi module was used for communication. The collected data was stored on the ThingSpeak cloud platform. The user accessed the sensor values using the Android mobile application. In this study, high accuracy was obtained with the help of the neural network. Subashini et al. (2018) [33] developed an IoT-based smart agriculture system that monitors light intensity, air humidity, soil moisture, and temperature and provides automatic irrigation to the plant. The data received from the field was transmitted to the ThingSpeak web server by HTTP GET request by the ESP8266 Wifi module. The irrigation pump was connected to the microcontroller and operated automatically according to the sensor values. Goap et al. (2018a) [34] designed an open-source, technology-based smart system to predict the irrigation requirements of a field by sensing weather forecast data from the internet, as well as soil parameters such as soil moisture, soil temperature, and environmental conditions. The intelligence of the proposed system was based on an algorithm that considers the detected data along with forecast parameters such as precipitation, air temperature, humidity, and UV in the near future. A pilot-scale system was developed in which sensor node data was collected wirelessly over the cloud using web services. The system was a web-based information visualization and decision support system that provides analytics-based real-time information insights. In another study, a Raspberry Pi and Arduino-based system was developed to collect environmental data such as soil moisture, air temperature, humidity, ultraviolet (UV) in a rose garden. For the estimation of soil moisture value, MLR, ridge regression, weighted linear regression, and SVR models were created and evaluated with the data taken from the sensor. SVR was found to be the best model with an R² value of 0.9383 [35].

Sudharshan et al. (2019) [36] worked on automatic irrigation systems. They have used three important sensors in the system. These sensors; soil moisture sensor, humidity sensor, and temperature sensor. In the system was met the power needed from solar panels. Thanks to the fuzzy logic-based automatic smart irrigation system, was determined how often the land would be irrigated with the data, was received from various sensors such as humidity and DHT sensors. With the new irrigation system, significant resource savings were achieved and the need for manpower was reduced. Kang et al. (2019) [37] investigated the relationship between root growth and correct volumetric water content. Lettuce seedlings were used in the study. The seedlings were placed in 10 cm round pots filled with soilless substrate. Four EC-5 soil moisture sensors were used to determine the effect on root size over eight weeks. According to the results, it was found that there was an 8.7% difference between the actual volumetric water content and the measured volumetric water content. As a result of research on growing plants, it was reported that there were

difficulties in providing the correct volumetric water content with FDR-type soil moisture sensors. Yılmaz (2019) [38] developed a 5 kWh photovoltaic drip irrigation system in a hazelnut orchard. In the study, the installation and effectiveness of the system were evaluated. The hazelnut orchard was irrigated according to the soil moisture sensor data for July and August. The study showed that there was an 89% yield increase in hazelnut. It was reported that leaf water potential, fruit weight, and fruit core weight, which affect hazelnut yield, develop positively. Mekala and Viswanathan (2019) [39] measured the crop temperature and humidity and then transferred these data to the cloud. With these data, the cloud-enabled clay-mist measurement index was proposed to assess the comfort levels of a crop. In this study, Arduino Uno was used as a gateway and CloudMQTT protocol was used for inter-device communication. The observed data was stored in ThingSpeak. Keswani et al. (2019) [40] designed an IoT-based irrigation system using soil moisture and temperature sensors, ambient temperature sensor, humidity sensor, CO₂ sensors, and sunlight sensors. The data collected from the sensors powered by solar energy was sent to the Raspberry Pi board with the ZigBee communication system. The stored data were evaluated using MATLAB and the fuzzy logic system was applied for weather forecasting. Using the structural similarity technique, the place where the water was missing was determined and the irrigation unit was triggered only in dry areas.

Domnguez-Nio et al. (2020)[41] investigated how to incorporate sensors into the programming approach using the drip irrigation system as an example. They studied the system for two years with the help of a web application called IRRIX. Precision irrigation doses was determined throughout the season by adjusting the algorithm based on sensor feedback. The investigations was demonstrated the viability of sensor-based irrigation planning. Demirbaş (2021) [42] has designed an irrigation system that will use water in a controlled manner in agricultural irrigation and, at the same time, determine the amount of water needed by the plant and perform automation-based irrigation. The electricity needed by the system was met by solar energy, which is one of the renewable energy sources. The test of the designed system was carried out in the agricultural land where tomato and pepper plants were cultivated. Automated and non-automated irrigation systems were compared. According to the findings, it was determined that there was a decrease in the amount of water consumption in the automated irrigated system and it contributed positively to the plant productivity. It was reported that the system was both environmentally friendly and also offers the possibility of use in areas where there was no electricity since the energy it needs was met with solar panels.

3.CONCLUSIONS

In the light of the research papers examined in the study, the following conclusions were reached.

- The design of pressurized irrigation systems with high initial investment costs is also a very complex and time-consuming process. It was determined that computer-aided software models should be used to minimize the errors that may occur during the design and operation of these systems.
- It was concluded that automation-based and remote control of irrigation systems was able to prevent human errors and save labor/time. Studies have also proven that automation-based irrigation systems increase product yield and quality.
- Soil moisture is a critical parameter used to develop smart irrigation systems, measure soil fertility, monitor droughts, increase crop yields, improve weather forecasts, and predict floods. For this reason, it was determined that the most used and developed sensors in the development of automation-based irrigation systems are sensors that measure soil moisture.
- In addition to the data obtained from soil moisture sensors in the stage of real-time data supply to irrigation systems, temperature, pressure, rain, etc. It was understood that the data obtained from the sensors can be added. It was concluded that irrigation efficiency and plant productivity increased depending on each added sensor data.
- It was determined that the energy needed in the irrigation process can be met from solar energy. It was observed that successful results were obtained in the solar energy-based irrigation systems. It was concluded that the use of solar energy, which is a clean and renewable energy source, in the agricultural sector, especially in irrigation, contributes to the economy of the producers. It was understood that it should be promoted due to its positive environmental effects.

REFERENCES

- [1]. Aküzüm, T., Çakmak, B. ve Benli, B. (1999). Yirmibirinci Yüzyılda Dünyada Su Sorunu. 7. Kültürteknik Kongresi, s.8-16, Nevşehir.
- [2]. Özgürel M., (2019). Adıyaman Bölgesi Modern Seracılık İşletmelerinin Isı Tüketimlerinin Hesaplanması Ve Isı Koruma Önlemlerinin Isı Tüketimine Etilerinin Araştırılması, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- [3]. De Pascale, S., Costa, L., Vallone, S., Barbieri, G. ve Maggio, A., (2011). Increasing water use efficiency in vegetable crop production: From plant to irrigation systems efficiency, Hortechology, 21(3): 301-308.
- [4]. Yavuz, D., Topak, R. ve Yavuz, N., (2014). Determining energy consumption of sprinkler irrigation for different crops in Konya Plain, Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi 1(3): 312-321.
- [5]. Cai, X. and Rosegrant, M. W. (2003). World Water Productivity: Current Situation and Future Options. Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvement, 1: 163.
- [6]. Kim, D. and Kaluarachchi, J. (2015). Validating FAO AquaCrop using Landsat images and regional crop information. Agricultural Water Management, 149: 143-155.
- [7]. Debaeke, P. and Aboudrare, A. (2004). Adaptation of crop management to water-limited environments. European Journal of Agronomy, 21(4): 433-446.
- [8]. Anonymous, 2015. <http://www.dsi.gov.tr/toprak-ve-su-kaynaklari>
- [9]. Sönmez, N., Benli, E. (1976). Lineer programming as a means in project Evaluation and Application to the Alpu irrigation project. A.Ü. Ziraat Fakültesi yıllığı Cilt:25, Fasikül 4'ten ayrı basım. S. 942-950.
- [10]. Smith, M. (2000). The application of climatic data for planning and management of sustainable rainfed and irrigated crop production. Agricultural and Forest Meteorology, 103(1-2): 99-108.
- [11]. Malik, A. Shakir, A. S. Ajmal, M. Khan, M.J. and Khan, T. A. (2017). Assessment of AquaCrop Model in Simulating Sugar Beet Canopy Cover, Biomass and Root Yield under Different Irrigation and Field Management Practices in Semi-Arid Regions of Pakistan Water Resources Management, 31(13): 4275-4292.
- [12]. Emeksiz, F., Albayrak, M., Günes, E., Özçelik, A., Özer, O.O., Tasdan, K., (2005). Türkiye'de Tarımsal Üretimin Pazarlama Kanalları ve Araçlarının Değerlendirilmesi, Türkiye Ziraat Mühendisliği VI. Teknik Kongresi, 3-7 Ocak 2005, Ankara, 2.Cilt, 1155-1171.
- [13]. Kulkarni, S., (2011). Innovative technologies for water saving in irrigated agriculture, International Journal of Water Resources and Arid Environments, 1 (3): 226-231.
- [14]. Kay, M., (1988). Sprinkler Irrigation Equipment and Practice.
- [15]. Yavuz, D., (2006). Yağmurlama Sulamanın Enerji Gereksinimi. Master Tezi. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarımsal Yapılar ve Sulama Anabilim Dalı, 49 s.
- [16]. Arif I. ve Abbas, H. F., (2015). Design and Implementation a Smart Greenhouse, ISSN: 2320- 088X, <https://ijcsmc.com/docs/papers/August2015/V4I8201560.pdf>
- [17]. Al-Ali, A.R., Qasaimh, M., Al-Mardinia, M., Radder, S., Zualkernan, IA. (2015). ZigBee-Based Irrigation System for Home Gardens, Communications, Signal Processing, and their Applications (ICCSPA), 2015 International Conference on, American University of Sharjah, 1-5.
- [18]. Ersin, C., (2016) Arduino mikrodenetleyici ve güneş enerjisiyle çalışan otomatik bitki sulama sistemi, <http://tez.sdu.edu.tr/Tezler/TF02790.pdf>
- [19]. Kopdra, S. ve Martin, M., (2016). Implementation of Microcontroller Arduino in Irrigation System, ICIC 2016: Intelligent Computing Theories and Application pp 133-144 DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-42291-6_13.
- [20]. Mritunjay, O., Sheetal, M., Shraddha, K. ve Diksha, T., (2016). Microcontroller Based Automatic Plant Watering System, ISSN: 12278-9960, Vol. 5, Issue 3, Apr - May 2016; 25-36. <https://www.semanticscholar.org/paper/MICROCONTROLLER-BASED-AUTOMATIC-PLANT-WATERING-Ojha-Mohite/ac12bb74aad84864c31522be894d84a19e2e31f8>
- [21]. Kavianand G., Nivas V. M., Kiruthika R., Lalitha S. (2016). Smart drip irrigation system for sustainable agriculture. In 2016 IEEE Technological Innovations in ICT for Agriculture and Rural Development (TIAR), 19-22.

- [22]. Patil A., Beldar M., Naik A., Deshpande S. (2016). Smart farming using arduino and data mining. In 2016 3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom), 1913–1917
- [23]. Karaca, C., Tekelioğlu, B., Büyüktaş, D., (2017). Sürdürülebilir Tarımsal Üretim için Toprak Nem Sensörlerinin Etkin Kullanımı, *Acedemia Journal of Engineering and Applied Science*, 2 (3), 33-41.
- [24]. Suman, S., Kumar, S., Sarkar, R., Ghosh, G., (2017). Solar Powered Automatic Irrigation System on Sensing Moisture Content Using Arduino and GSM, *International Journal of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering (IJARECE)*, 6, 549-555.
- [25]. Rehman, A.U., Asif, R. M., Tariq, R., Javed, A., (2017). Gsm Based Solar Automatic Irrigation System Using Moisture, Temperature And Humidity Sensors, *International Conference on Engineering Technology and Technopreneurship (ICE2T)*, Pakistan, 1-4.
- [26]. Kumar, B. D., Srivastava, P., Agrawal, R., Tiwari, V., (2017). Microcontroller based automatic plant irrigation system, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 4 (5), 1436-1439.
- [27]. Taneja, K., Bhatia, S., (2017). Automatic Irrigation System using Arduino UNO” *International Conference on Intelligent Computing and Control Systems ICICCS 2017*, Madurai-India.
- [28]. Kızıllı, Ü., Aksu, S., Çamoğlu, G., (2018). Kontrollü Ortamda Bitkisel Yetiştiricilik için Arduino Uyumlu Bir Toprak Nemi İzleme Sistemi Tasarımı, *ÇOMÜ Zir. Fak. Derg.*, 6 (2), 131-139.
- [29]. García, A. M., García, I. F., Poyato, E. C., Barrios, P. M., Díaz, J. A. R., (2018). Coupling irrigation scheduling with solar energy production in a smart irrigation management system, *Cleaner Production*, 175, 670-682.
- [30]. Wazed, S. M., Hughes, B.R., O’Connor, D., Calautit, J.K., (2018). A review of sustainable solar irrigation systems for Sub-Saharan Africa”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1206-1225.
- [31]. Yang, J., Liu, M., Lu, J., Miao, Y., Hossain, M. A., Alhamid, M. F., (2018). Botanical internet of things: toward smart indoor farming by connecting people, plant, data and clouds, *Mobile Networks and Applications*, 23(2), 188–202.
- [32]. Aliev, K., Jawaid, M. M., Narejo, S., Pasero, E., Pulatov, A., (2018). Internet of plants application for smart agriculture. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 9(4), 421–429.
- [33]. Subashini, M. M., Das, S., Heble, S., Raj, U., Karthik, R., (2018). Internet of things based wireless plant sensor for smart farming. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 10(2), 456–468.
- [34]. Goap, A., Sharma, D., Shukla, A. K., Rama Krishna, C., (2018). An IoT based smart irrigation management system using machine learning and open source technologies. *Computers and Electronics in Agriculture*, 155(October), 41–49.
- [35]. Goap, A., Sharma, D., Shukla, A. K., Rama Krishna, C., (2018). Comparative study of regression models towards performance estimation in soil moisture prediction, 309-316, *International Conference on Advances in Computing and Data Sciences*, 20-21 April, Dehradun, India.
- [36]. Sudharshan N., AVS Kasturi Karthik., JS Sandeep Kiran., S. Geetha., (2019). Renewable Energy Based Smart Irrigation System, *Procedia Computer Science*, 165, 615–623.
- [37]. Kang, S., Van Iersel, M. W., Kim, J., (2019). Plant root growth affects FDR soil moisture sensor calibration”, *Scientia Horticulturae*, 252, 208-211.
- [38]. Yılmaz, A., (2019). Fotovoltaik Sistem ve Damla Sulama Yöntemiyle Sulanan Fındıkta Sulama Uygulamalarının Verim ve Verim Bileşenlerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Ordu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yenilenebilir Enerji Anabilim Dalı, Ordu.
- [39]. Mekala, M. S., Viswanathan, P., (2019). CLAY-MIST: IoT-cloud enabled CMM index for smart agriculture monitoring system. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 134, 236–244.
- [40]. Keswani, B., Mohapatra, A. G., Mohanty, A., Khanna, A., Rodrigues, J. J. P. C., Gupta, D., de Albuquerque, V. H. C., (2019). Adapting weather conditions based on IoT enabled smart irrigation techniques in precision agriculture mechanisms. *Neural Computing and Applications*, 31, 277–292.
- [41]. Domínguez-Niño, J. M., Oliver-Manera, J., Girona, J., Casadesús, J., (2020). Differential irrigation scheduling by an automated algorithm of water balance tuned by capacitance-type soil moisture sensors”, *Agricultural Water Management*, 228, 59-66.

- [42]. H. Demirbaş, (2021). Güneş Enerjili Otomatik Bitki Sulama Sistemi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Muđla.

Defects, Mechanical Properties and Surface Roughness of AlSi10Mg Alloy Parts Produced by Selective Laser Melting (SLM) Method-A Review

Yusuf SİYAMBAŞ^{1,*}  Yakup TURGUT² 

¹Erzincan Binali Yıldırım University Vocational High School, Department of Machinery and Metal Technologies, 24100, Merkez/ERZİNCAN

²Gazi University Faculty of Technology, Department of Manufacturing Engineering, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article
Received: 13/06/2022
Revision: 26/06/2022
Accepted: 29/06/2022

Highlights

- Product quality in additive manufacturing of AlSi10Mg Alloy
- Effect of manufacturing parameters on defects
- Effect of energy density on mechanical properties

Keywords

Additive manufacturing
Manufacturing parameters
Porosity
Mechanical properties
Surface roughness

In this study, a comprehensive review was made on the usability of the products produced from AlSi10Mg alloy as the final product.

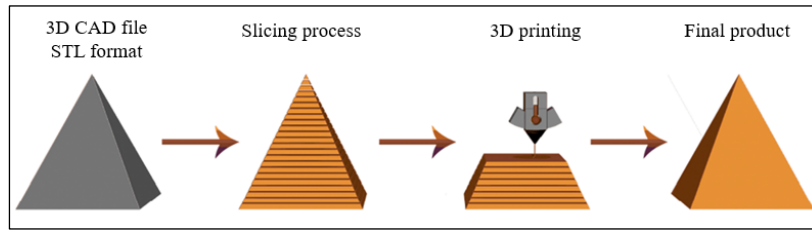


Figure A. Additive manufacturing process

Purpose: In this study, it is aimed to investigate the effect of manufacturing parameters on product quality in additive manufacturing of AlSi10Mg alloy by Selective laser melting (SLM) method.

Theory and Methods: In this study, studies on additive manufacturing of AlSi10Mg alloy by SLM method were investigated in terms of manufacturing parameters, the effects of manufacturing parameters on the finished product and the positive and negative aspects of the method were revealed.

Results: It has been determined that AlSi10Mg alloy parts produced by additive manufacturing show better strength properties compared to those produced by casting method, and the desired density can be obtained by using the appropriate parameters for manufacturing.

Conclusion: It has been determined that energy density is effective on product quality in the production of AlSi10Mg alloy parts by SLM method. It has been observed that the ideal energy density for minimum porosity in the produced parts is in the range of 50-75 J/mm³. It was determined that the level of porosity increased with increasing and decreasing energy densities.



Defects, Mechanical Properties and Surface Roughness of AlSi10Mg Alloy Parts Produced by Selective Laser Melting (SLM) Method-A Review

Yusuf SİYAMBAŞ^{1,*} Yakup TURGUT²

¹Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 24100, Merkez/ERZİNCAN

²Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Abstract

Metal-based additive manufacturing is a modern manufacturing process in which three-dimensional (3D) objects are fabricated by layer-by-layer melting of metallic powder or wire with an energy source. Selective laser melting (SLM) method is used in both scientific and industrial fields as it allows the production of complex and light structures. AlSi10Mg alloy is widely used in aerospace, automotive, marine and medical industries, as well as in various applications that require special designs and is one of the prominent materials in SLM research. The quality of a product produced by the SLM method requires optimization of manufacturing parameters (laser power, scanning speed, scanning distance, layer thickness) that affect the energy density required for melting. With the use of inappropriate manufacturing parameters, internal stresses arising from deformation mechanisms occur due to the process and distortion, cracking and dimensional changes occur on the part. Variables such as powder material properties, uneven distribution of powder layer, deformation during manufacturing, changes in laser beam can cause metallurgical pores. Any defects that occur in the manufacturing process have a negative effect on the mechanical properties and surface quality of the final part. In this study, the results obtained by researching the studies in the literature to produce parts with high density, high strength properties and high surface quality from AlSi10Mg alloy by selective laser melting method are presented. As a result of the research, it has been determined that energy density is more decisive on product quality. It has been determined that the ideal energy density for the least porosity in the products is in the range of 50-75 J/mm³, and the AlSi10Mg alloy parts produced by additive manufacturing show better strength properties compared to those produced by the casting method.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 13/06/2022
Düzeltilme: 26/06/2022
Kabul: 29/06/2022

Keywords

Additive manufacturing
Manufacturing parameters
Porosity
Mechanical properties
Surface roughness

Anahtar Kelimeler

Ekllemeli imalat
İmalat parametreleri
Gözeneklilik
Mekanik özellikler
Yüzey pürüzlülüğü

Seçici Lazer Ergitme (SLM) Yöntemi ile Üretilen AlSi10Mg Alaşımli Parçalarda Kusurlar, Mekanik Özellikler ve Yüzey Pürüzlülüğü-Bir Araştırma

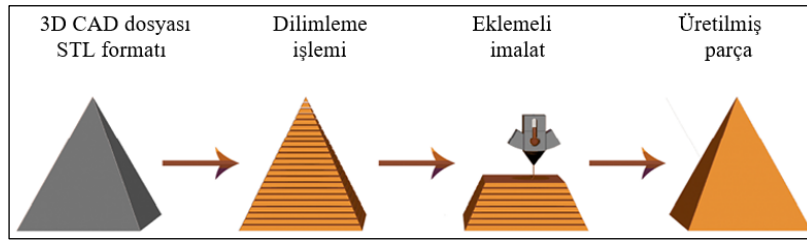
Öz

Metal esaslı ekllemeli imalat, bir enerji kaynağı ile metalik tozun veya telin katman katman eritilmesi yoluyla üç boyutlu (3B) nesnelere imal edildiği modern bir üretim sürecidir. Seçici lazer eritme (SLM) yöntemi, karmaşık ve hafif yapıların üretimine olanak sağladığından hem bilimsel hem de endüstriyel alanlarda kullanılmaktadır. AlSi10Mg alaşımını havacılık, otomotiv, denizcilik ve medikal endüstrilerin yanı sıra, özel tasarımlara ihtiyaç duyulan çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmakta ve SLM araştırmalarında öne çıkan malzemelerden biri durumundadır. SLM yöntemi ile üretilen bir ürünün kalitesi, ergitme için gerekli olan enerji yoğunluğunu etkileyen imalat parametrelerinin (lazer gücü, tarama hızı, tarama mesafesi, katman kalınlığı) optimizasyonunu gerektirmektedir. Uygun olmayan imalat parametrelerinin kullanılması ile süreç gereği deformasyon mekanizmalarından kaynaklanan iç gerilmeler oluşmakta ve parça üzerinde çarpılma, çatlama ve boyutsal değişim meydana gelmektedir. Toz malzeme özellikleri, toz tabakasının düzgün olmayan dağıtımı, imalat sırasında deformasyon, lazer ışınındaki değişiklikler gibi değişkenler metalurjik gözeneklere neden olabilmektedir. İmalat sürecinde oluşan her türlü kusur nihai parçanın mekanik özellikleri ve yüzey kalitesi üzerinde olumsuz etkiye sahiptir. Bu çalışmada seçici lazer ergitme yöntemi ile AlSi10Mg alaşımından yüksek yoğunlukta, yüksek mukavemet özelliklerinde ve yüksek yüzey kalitesinde parçalar üretmek için literatürde yapılan çalışmalar araştırılarak elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Araştırma sonucunda, enerji yoğunluğunun ürün kalitesi üzerinde daha belirleyici olduğu tespit edilmiştir. Ürünlerde en az gözeneklilik için ideal enerji yoğunluğunun 50-75 J/mm³ aralığında

olduğu, eklemeli imalat ile üretilen AlSi10Mg alaşımlı parçaların döküm yöntemi ile üretilenlere kıyasla daha iyi mukavemet özelliği gösterdiği belirlenmiştir.

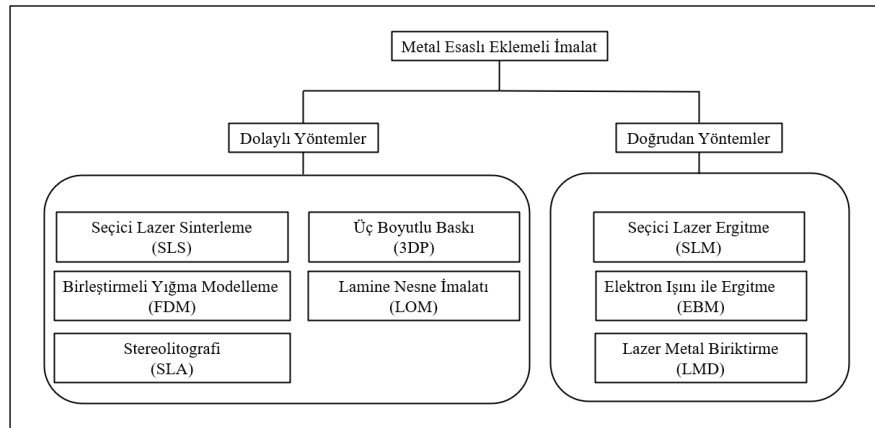
1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Üç boyutlu (3B) baskı veya hızlı prototipleme olarak bilinen eklemeli imalat hem endüstriyel hemde akademik çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. ASTM (American society for testing materials) uluslararası F42 komitesine göre eklemeli imalat teknolojisi; gelişmiş CAD yazılımları ile oluşturulmuş üç boyutlu tasarımlardan yararlanarak farklı nesnelere üretmek amacıyla malzemeleri katman katman biriktirme işlemidir [1-2]. Eklemeli imalat yöntemi otomotiv, havacılık ve tıbbi uygulamalar için yüksek performans gerektiren parçaların imalatında yeni bir üretim tekniği olarak kullanılmaktadır [3]. Eklemeli imalat yöntemleri geleneksel imalat yöntemleri ile karşılaştırıldığında kafes yapıları gibi oldukça karmaşık parçaların üretimi, talaş kaldırma operasyonlarına göre düşük malzeme sarfiyatı, perçinleme ve yapıştırma gibi birleştirme işlemlerinin azaltılması ve daha temiz üretim ortamı gibi avantajlara sahiptir [4]. Bu nedenle eklemeli imalat, polimerlerden kompozitlere, saf metallerden alaşımlara kadar çeşitli türdeki parçaların imal edilmesinde geniş bir alanda kullanılmaktadır. Bu avantajların yanı sıra, üretilen parça boyutunun ve malzeme çeşitliliğinin sınırlı olması, kusurlar, imalat sonrası ilave işlemler (ısıl işlem, talaşlı imalat vb.) gibi dezavantajlarla da karşılaşmaktadır [5-6].



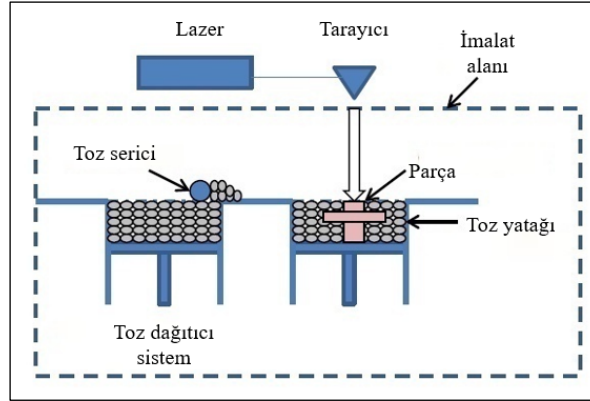
Şekil 1. Eklemeli imalat süreci [7]

Metal esaslı eklemeli imalat, bir enerji kaynağı ile metalik tozun veya telin katman katman eritilmesi yoluyla üç boyutlu (3B) nesnelere imal edildiği modern bir üretim sürecidir. Metal esaslı eklemeli imalat ile üretilen parçalar sürünme, oksidasyon, korozyon direnci ve yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerini koruma yeteneği gibi önemli özelliklere sahiptir [8]. Metal esaslı eklemeli imalat (MAM) doğrudan ve dolaylı yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır [9]. Dolaylı yöntemlerde %90'dan fazla yoğunluğa sahip parçalar üretmek için sıcak izostatik presleme (HIP) gibi son işlemler gerekmektedir [9]. Diğer yandan yoğunluğu %90'ın üzerinde olan parçalar optimize edilmiş proses parametreleri aracılığıyla doğrudan yöntemlerle üretilmektedir.



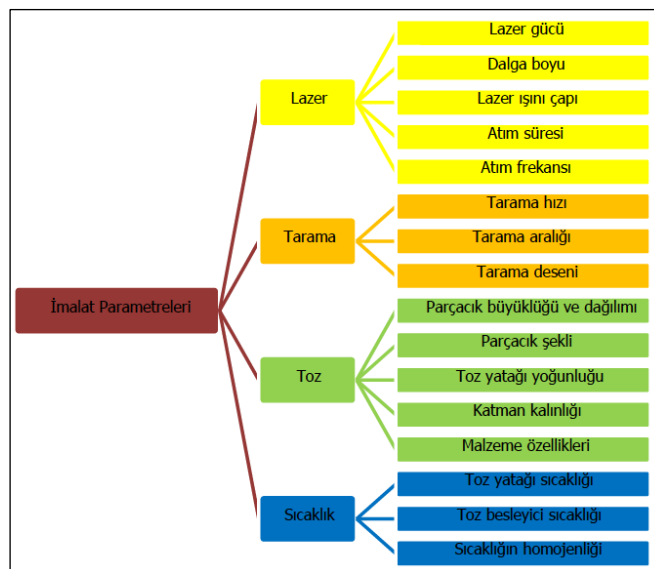
Şekil 2. Metal esaslı eklemeli imalatın sınıflandırılması [10]

Seçici lazer ergitme (SLM) yöntemi karmaşık iç yapıya sahip bileşenleri üretmek için kullanılan eklemeli imalat yöntemidir [11]. Bu yöntemde CAD verisine göre bir enerji kaynağı ile toz yatağına serilen tozları belirlenmiş bir tarama yönünde eriterek yüksek yoğunluğa sahip parçalar elde edilmektedir [12]. SLM yönteminde hızlı soğuma oranından dolayı üretilen parçalar ince mikro yapıya sahiptir. Bu nedenle SLM tarafından üretilen parçalar, yöntemin getirmiş olduğu gelişmiş mikro yapı ile üstün mekanik özellikler sergilemektedir [13]. Ayrıca SLM yöntemi ile üretilen parçalar geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla yüksek yoğunluğa ve daha iyi performansa sahiptirler [14].



Şekil 3. Seçici lazer ergitme (SLM) prosesi [15]

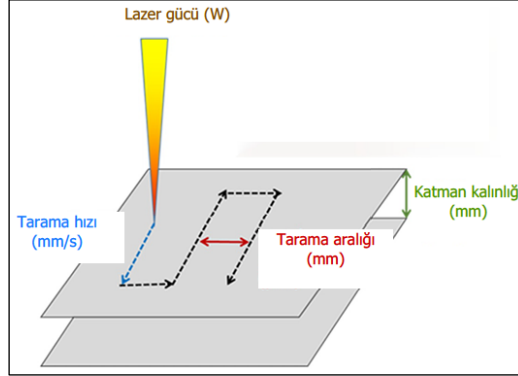
Alüminyum alaşımları havacılık, otomotiv, denizcilik ve medikal endüstrilerin yanı sıra, spesifik tasarımlara ihtiyaç duyulan çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Al-Si alaşımları arasında AlSi10Mg alaşımı yüksek mekanik özellikleri ve korozyon dayanımı ile ön plana çıkmakta ve eklemeli imalat yöntemiyle de oldukça iyi bir yüzey kalitesinde üretilebilmektedir [16]. Ayrıca AlSi10Mg alaşımı düşük boyutlu büzülme, kaynaklanabilirlik, düşük ağırlık oranı ve işlenebilirlik gibi mühendislik özelliklerinin bir arada olduğu bir alüminyum alaşımıdır [17]. Bu alaşımların üretilmesinde ise seçici lazer ergitme yönteminin (SLM) yeri oldukça önemlidir. SLM yöntemi yüksek yoğunlukta parçaların üretilmesine imkân tanıdığından AlSi10Mg alaşımının eklemeli imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır [18]. SLM ile metal parçaların istenilen kalitede üretilmesinde, toz yatağındaki metal tozu eritmek ve istenen şekilde katılaştırmak için kullanılan imalat parametreleri oldukça önemlidir. Yapılan çalışmalarda parametreler lazer, tarama, toz ve sıcaklık ile ilgili olmak üzere dört ana başlık altında toplanmıştır (Şekil 4) [19].



Şekil 4. SLM yönteminde imalat parametrelerinin sınıflandırılması [19-20].

SLM yöntemi ile metal parça üretiminde giriş parametreleri nihai ürünün kalitesini etkilemektedir. Giriş parametreleri; lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı, katman kalınlığı, tarama deseni, inşa yönü, toz

karakteristiği gibi değişkenler olarak kullanılırken çıkış parametreleri; bağıl yoğunluk, mekanik özellikler, yüzey pürüzlülüğü, geometrik doğruluk ve metalürjik yapı olarak ifade edilmektedir [21]. Yapılan çalışmalar incelendiğinde, eklemeli imalat prosesini etkileyen birincil faktörün enerji yoğunluğu (E) olduğu görülmüştür (Şekil 5). Enerji yoğunluğu; tarama gücünün tarama hızı, tarama aralığı ve katman kalınlığına oranı ile ifade edilmekte ve eşitlik 1 ile hesaplanmaktadır.



Şekil 5. Lazer toz yatağı füzyon proseslerinde yaygın kullanılan imalat parametreleri [22]

$$E = \frac{P}{v \cdot h \cdot t} \quad (1)$$

Eşitlik 1’de E enerji yoğunluğunu (J/mm^3), P lazer gücünü (W), v tarama hızını (mm/s), h tarama aralığını (mm) ve t katman kalınlığını (mm) ifade etmektedir. Eşitliğe göre lazer gücü artarsa veya tarama hızı, tarama aralığı ve katman kalınlığı azalır işlemin enerji yoğunluğu artar. SLM sürecinde optimum bir enerji yoğunluğu değeri bulunmakta ve bu değer kullanılan toz alaşımına ve imalat tezgahına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir [23].

Eklemeli imalat ile üretilen parçaların mukavemet özellikleri, yüzey kalitesi ve boyutsal doğruluk gibi ürün kalitesini belirleyen özellikleri, imalat parametrelerinin uygun seçimi ile önemli ölçüde iyileştirilmektedir. Eklemeli imalat sürecinde çok sayıda parametre olmasına rağmen lazer, tarama ve toz parametreleri yaygın olarak araştırılmaktadır. Lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı ve katman kalınlığı SLM yönteminde kullanılan önemli imalat parametreleridir. Eklemeli imalat teknikleri ile üretilen Al alaşımlarının mukavemetlerinin iyi olmasına rağmen mekanik özellikleri prosesle ilgili kusurlardan ciddi şekilde etkilenmektedir. Eklemeli imalat ile ilgili kusurların başında gözeneklilik ön plana çıkmakta ve bu durumda optimize edilmemiş bir süreçten kaynaklanmaktadır [3, 24-26]. SLM yönteminde toz alaşımlarının yüksek sıcaklıklara maruz kalması tozdaki belirli elementlerin buharlaşmasına neden olmaktadır. Bu durumda eriyik havuzunda buhar basıncının birikmesi ile malzeme birikimini olumsuz etkilemekte ve beraberinde erimiş malzemenin sıçramasına neden olarak düşük yoğunluklu ve gözenekli parçalara neden olmaktadır [27]. Gözenekliliği enerji yoğunluğu ile ilişkilendirerek kararlı bir eriyik havuzu elde etmek için birçok çalışma yapılmıştır. Optimum enerji yoğunluğunda tama yakın yoğun ürünler elde edilirken çok düşük veya çok yüksek enerji yoğunluğunda sırasıyla füzyon eksikliğine ve anahtar deliği gözenekliliğine yol açmaktadır [28-30].

Yüzey kalitesi, üretilen parçaların kullanım ömrü üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Pürüzlü yüzeylerin metalik malzemelerin yorulma performansını olumsuz etkilediği bilinmektedir. Bu nedenle, dinamik yükler altında çalışacak parçalarda yüksek yüzey kalitesi aranmaktadır. SLM yönteminde tasarım esnekliği ve parça kalitesi gibi önemli avantajlar elde edilirken yüzey kalitesi açısından hala önemli eksiklikler bulunmaktadır. Eklemeli imalat ile üretilen parçalarda oluşan yüzey pürüzlülüğü kısmen erimiş toz parçacıklarının yüzeye bağlanması ve katman katman üretim süreci ile ilişkilidir [31-32]. Bu nedenle eklemeli imalat ile üretilen ürünlerin yüzey kalitesinin ve kullanım ömrünün artırılması için imalat parametreleriyle ilişkisinin doğru bir şekilde seçilmesi önemlidir. Eklemeli imalat ile imal edilen parçaların yüzey dokuları, kullanılan enerji yoğunluğu (lazer gücü, katman kalınlığı, tarama hızı, tarama aralığı), toz boyutu ve dağılımı, yüzeyin inşa yüzeyine olan açısı ve ikincil işlemler gibi birçok parametreden etkilenmektedir [33,34]. Yapılan çalışmalarda yüzey pürüzlülüğünü azaltmak ve üretilen parçaların

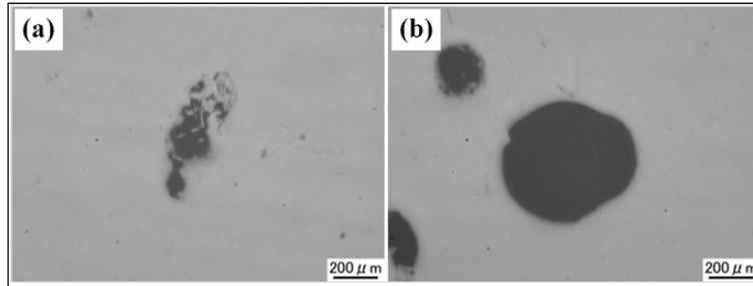
kullanım ömrünü arttırmak için imalat sonrası işlemler önerilmiştir [35-40]. İmalat sonrası ilave işlemlerle oluşacak maliyet ve zamanın yanı sıra bu işlemlerin gözenekli yapılar, kafes bileşenleri ve karmaşık geometriler üzerinde gerçekleştirilmesi oldukça zordur. Bu nedenle kapsamlı yüzey iyileştirmesine ihtiyaç duymadan eklemeli imalat ile üretilen parçaları nihai ürün olarak kullanılması oldukça önemlidir.

Bu çalışmada, AlSi10Mg alaşımının eklemeli imalatta kullanılmasında imalat parametrelerinin ürün kalitesi üzerindeki etkilerine odaklanılmıştır. Literatür araştırmasında, eklemeli imalatı etkileyen birçok parametre olmasına rağmen nihai ürüne ulaşma noktasında en etkili faktörün enerji yoğunluğu olduğu görülmüştür. Bu nedenle araştırılan parametreler enerji yoğunluğunun hesaplanmasında kullanılan parametreler üzerinde durulmuştur. AlSi10Mg alaşımının SLM yönteminde kullanılmasında imalat parametrelerinin gözeneklilik, mekanik özellikleri ve yüzey pürüzlülüğüne etkileri kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Bu çalışmanın, SLM yöntemi ile eklemeli imalatta üretilen parçaların nihai ürüne ulaşmak için yapılacak çalışmalara yardımcı olacağı düşünülmektedir.

2. METAL ESASLI EKLEMELİ İMALAT (METAL BASED ADDITIVE MANUFACTURING)

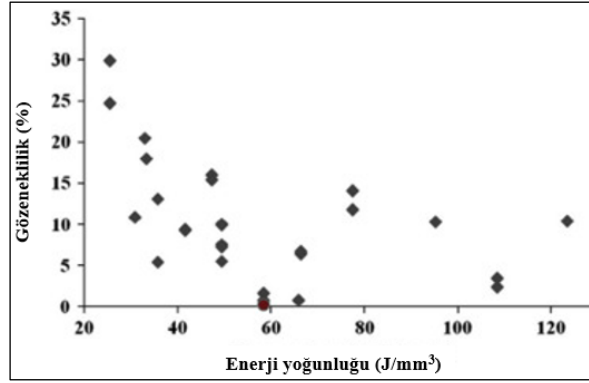
2.1. İmalat Parametrelerinin Gözeneklilik Üzerindeki Etkisi (Effect of Manufacturing Parameters on Porosity)

Metal esaslı eklemeli imalatta karşılaşılan en yaygın kusurlardan biri gözenekliliktir. Bu kusur genellikle füzyon eksikliği gözenekliliği (lack of fusion) ve anahtar deliği gözenekliliği (keyhole porosity) olarak iki şekilde ortaya çıkmaktadır (Şekil 6). Füzyon eksikliği gözenekliliği imalat parametrelerinin birbirleri ile uyumsuzluğundan kaynaklanan toz tabakalarının eksik erimesi ile oluşmaktadır. Anahtar deliği gözenekliliği yüksek enerji girişinin metalin kolayca buharlaşmasına neden olması ile gaz kabarcıklarının parça yüzeyinin altında sıkışması ile oluşmaktadır. Füzyon eksikliği gözenekliliğinin anahtar deliği gözenekliliğine kıyasla gerilmeyi arttırıcı olarak hareket etme olasılığı daha yüksektir [22,41-42].



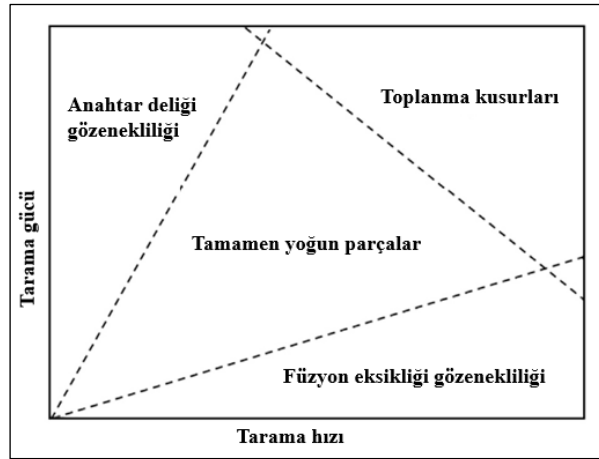
Şekil 6. Parçada oluşan gözeneklilikler (a) füzyon eksikliği (b) anahtar deliği [43]

Eklemeli imalatta malzemenin yoğunluğu ürün kalitesi açısından önemli bir faktördür. Dolayısı ile daha yoğun bir ürün elde etmek için optimum imalat parametreleri aralığının belirlenmesi gerekmektedir. Çok yüksek veya çok düşük enerji yoğunluğu kombinasyonlarında üretilen ürünlerde farklı kusur oluşturma mekanizmaları meydana gelmektedir [44]. Read vd. [23] SLM yöntemi ile üretilmiş AlSi10Mg alaşımlı parçalarda gözeneklilik oluşumu üzerindeki imalat parametrelerinin etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda lazer gücünün, tarama hızının ve tarama hızı ile tarama aralığı arasındaki etkileşimin gözenek oluşumunu önemli ölçüde etkilediğini gözlemlemişlerdir. Düşük ve yüksek enerji yoğunluklarında gözenekliliğin arttığını ve AlSi10Mg alaşımının eklemeli imalatında düşük gözeneklilik için optimum enerji yoğunluğunun 60-75 J/mm³ arasında olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 7).



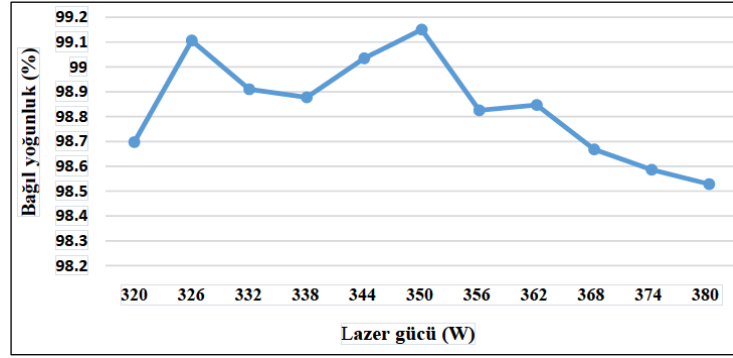
Şekil 7. Enerji yoğunluğunun gözeneklilik ile ilişkisi [23]

Eklemeli imalat çalışmalarında gözeneklilik ve imalat parametreleri arasındaki ilişki kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır (Şekil 8). Gözeneklilik dışında toplanma kusurları da işleme parametrelerinden etkilenmektedir. Gu ve Shen [45] yüksek tarama hızının lazer kaynaklı eriyik sıçramalarına neden olabileceğini ve bununla toplanma kusurlarına yol açabileceğini ve bu kusuru azaltmak için tarama hızını ve katman kalınlığını azaltmak gerektiğini ifade etmişlerdir.



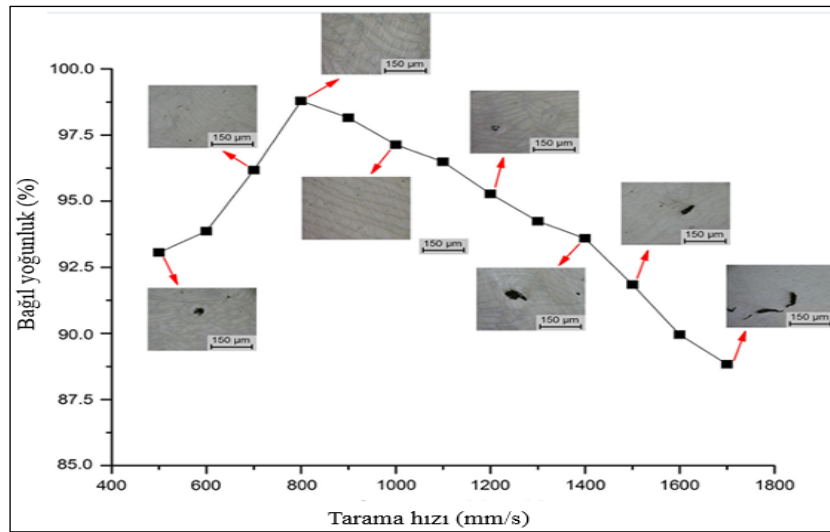
Şekil 8. İmalat parametrelerinin gözeneklilik üzerindeki etkisinin gösterimi [46]

Literatürde, SLM yöntemi ile üretilen parçaların kalitesini arttırmak için imalat parametrelerinin kusurlar ve parçaların bağıl yoğunluğu üzerindeki etkilerinin araştırıldığı çalışmalar da yapılmıştır [3, 43, 47]. Bağıl yoğunluk SLM ile üretilen parçaların ürün kalitesinin önemli bir göstergesi olarak görülmektedir. Daha yüksek bir bağıl yoğunluk değerinde oluşan kusurlar daha düşük bir hacimde oluşmakta ve istenilen yoğunlukta parçalar elde edilmektedir. İmalat parametrelerinin, elde edilen parçaların kusurları ve bağıl yoğunluğu üzerinde önemli etkileri vardır. Lazer gücü bağıl yoğunluk üzerinde en etkili parametre olduğu belirtilmiştir [48]. Eşitlik 1’de lazer gücünün enerji yoğunluğu ile doğru orantılı olduğu görülmektedir. Lazer gücünün artması ile enerji yoğunluğundaki artış, toz malzemenin tamamen erimesine ve bağıl yoğunluğun artmasına neden olmaktadır. Ayrıca lazer gücü belirli bir değeri aştığında malzeme buharlaşması ile kusurların meydana gelmesine ve beraberinde daha düşük bir bağıl yoğunluğa neden olmaktadır [48]. Ahmed vd. [49]. AlSi10Mg alaşımli parçaların üretilmesinde imalat parametrelerinin bağıl yoğunluk üzerindeki etkisini araştırmışlardır. İmalat parametreleri olarak tarama hızı (1650 mm/s) tarama aralığı (0,13 mm) ve tarama gücü (320-380 W) değişkenleri kullanılmıştır. 350 W lazer gücünde üretilen numunelerin bağıl yoğunluğunun %99’un üzerinde olduğunu ve artan lazer güçlerinde bağıl yoğunluğun düştüğünü belirtmişlerdir (Şekil 9).



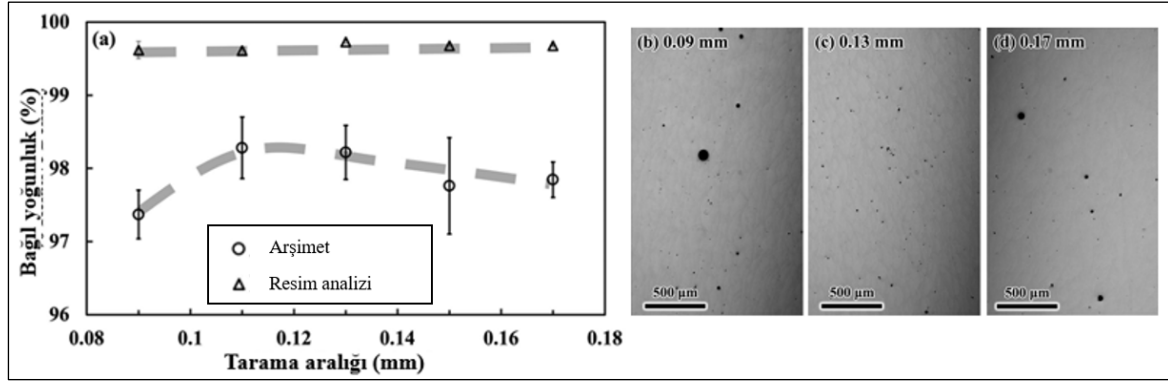
Şekil 9. Bağlı yoğunluğun lazer gücü ile değişimi [49]

Tarama hızı eşitlik 1'de gösterildiği gibi enerji yoğunluğu ile ters orantılıdır ve üretilen parçaların bağlı yoğunluğu üzerinde farklı bir etkiye sahiptir. Çok düşük bir tarama hızı aşırı enerji yoğunluğuna yol açabilir ve SLM sürecinde ertirme havuzda malzeme buharlaşmasına ve sıçramasına neden olabilir. Bu durumda yüksek gözenek oranıyla sonuçlanmaktadır. Çok yüksek bir tarama hızı toz malzemenin tamamen erimesi için yetersiz enerji yoğunluğuna ve füzyon eksikliği kusurlarına neden olmaktadır. Chen vd. [47] AlSi10Mg alaşımının eklemeli imalatında tarama hızının parçanın bağlı yoğunluğu üzerindeki etkisini araştırmak için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada imalat parametreleri lazer gücü (180 W), tarama aralığı (0,06 mm) ve tarama hızı (300-1700 mm/s) olarak kullanılmıştır. Tarama hızı 500 mm/s'den 800 mm/s'ye çıkarken parçanın bağlı yoğunluğu %94'ten %98'e yükselmiştir. Tarama hızı 800 mm/s'nin üzerine çıktığında tarama hızı arttıkça numunenin bağlı yoğunluğu azalmıştır. Bağlı yoğunluktaki bu azalmayı katılma aşamasında tarama hızı arttıkça erimeyen parçacıkların neden olduğu gözenek ve toplanma miktarındaki artışlarla ilişkilendirmişlerdir (Şekil 10).



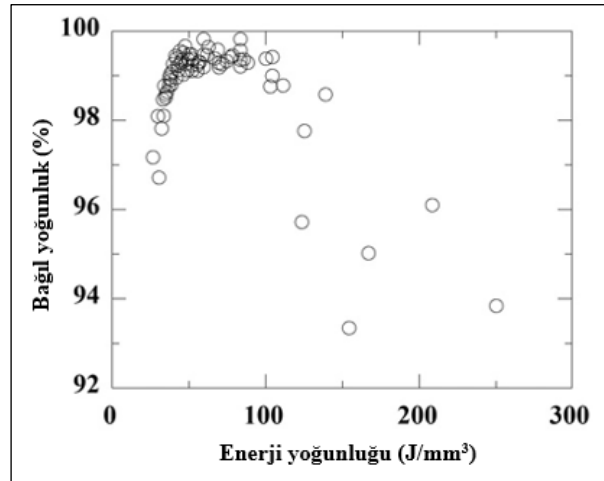
Şekil 10. Bağlı yoğunluğun tarama hızı ile değişimi [47]

Tarama aralığı, bağlı yoğunluk üzerinde tarama hızına benzer bir etkiye sahiptir. Daha büyük tarama aralığı ile bağlı yoğunluk maksimum değerine kadar artar ve sonra azalmaktadır. Hyer vd. [50] AlSi10Mg alaşımli numunelerin üretilmesinde tarama aralığının bağlı yoğunluğa etkisini araştırmışlardır. Çalışmada lazer gücü (250 W), tarama hızı (1200 mm/s) ve katman kalınlığı (0,03 mm) parametreleri sabit tutularak değişken tarama aralıklarında (0,09-0,13-0,17 mm) parçalar üretilmiştir. Üretim sonrasında en yüksek bağlı yoğunluğun 0,13 mm tarama aralığında elde edildiğini ve enerji yoğunluğunun 53,41 J/mm³ olduğunu söylemişlerdir. Tarama aralığı 0,13 mm'den daha düşük veya daha yüksek olduğunda bağlı yoğunluk azalmıştır. Bağlı yoğunluk azalışını düşük ve yüksek enerji yoğunluğu ile ilişkilendirmişlerdir (Şekil 11).



Şekil 11. Tarama aralığının bağıl yoğunluk üzerindeki etkisi [50]

Metal tozlarının ergitme yoğunluğu, lazer ışınının enerji yoğunluğuna bağlıdır [21]. Belirlenecek olan en uygun enerji yoğunluğunu sağlayan imalat parametreleri ile üretilen numunelerde %100'e çok yakın bağıl yoğunluk elde edilmektedir. Kimura vd. [43] optimum bağıl yoğunlukta parçalar üretmek için lazer parametrelerini araştırmışlardır. Üretilen numunelerin bağıl yoğunluğu yüksek ve düşük enerji yoğunluğunda azalmış ve düşüşler 100 J/mm^3 'ü aşan enerji yoğunluğunda daha belirgin olmuştur. Yüksek yoğunluklu (%99'dan fazla) numunelerin üretiminde ideal enerji yoğunluğu aralığının $50\text{-}100 \text{ J/mm}^3$ olduğu görülmüştür (Şekil 12).



Şekil 12. Enerji yoğunluğunun bağıl yoğunluk üzerindeki etkisi [43]

Tablo 1'de AlSi10Mg alaşımının eklemeli imalatında imalat parametrelerinin üretilen parçaların yoğunluğu üzerindeki etkileri verilmiştir. Elde edilen parçalar tam yoğun ($\delta \geq \%99$), yoğun ($\% 99 < \delta \leq \%85$) ve gözenekli ($\delta < \%85$) olarak sınıflandırılmıştır.

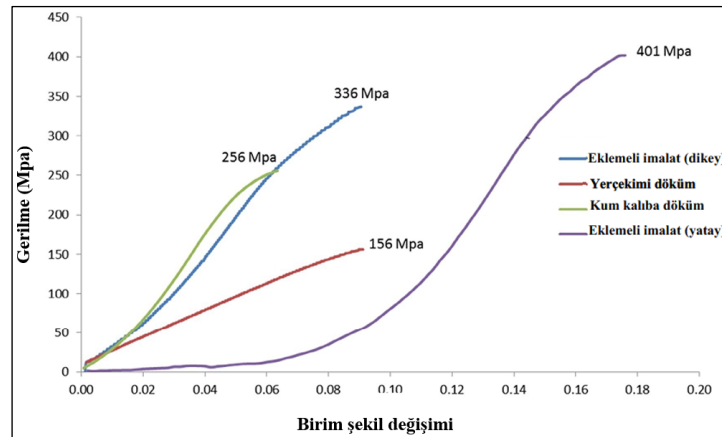
Tablo 1. AlSi10Mg alaşımlı parçaların üretimi için kullanılan temel imalat parametreleri ve değerleri

Malzeme	Lazer Gücü (W)	Tarama Hızı (mm/s)	Tarama Aralığı (μm)	Katman Kalınlığı (μm)	Enerji Yoğunluğu (J/mm^3)	Tam yoğun, Yoğun, Gözenekli	Ref. no
AlSi10Mg	350	1050	170	50	39	Tam yoğun	[51]
	788	1099	300	60	40	Tam yoğun	
	463,625,788, 950	500,800,1099, 1400,1700, 2000	300,350, 400	60	17-75	Yoğun	[52]
	100	250, 500, 750, 1000	50, 100	40	25-200	Yoğun	[3]
	320, 360, 400, 370	600, 750, 900, 1300	70,90-116,40, 190	30, 30	145-200, 50	Yoğun, Yoğun	[53], [54]

240, 260, 320, 360, 400	1200, 1400, 1600, 1800, 2000	36, 40, 45, 51.4, 60	30	111	Tam yoğun	[55]
400, 440	1350, 1500	105	50	38-56	Tam yoğun	[56]
300	1230	105	50	68	Yoğun	[56]
150	500, 1500, 2500	45, 75, 105,	30	74, 95, 222	Tam yoğun	[57]
250	1500	75	30	74	Yoğun	[57]
150	2500	105, 150	30, 60	9, 13	Gözenekli	[57]

2.2. İmalat Parametrelerinin Mekanik Özellikler Üzerindeki Etkisi (Effect of Manufacturing Parameters on Mechanical Properties)

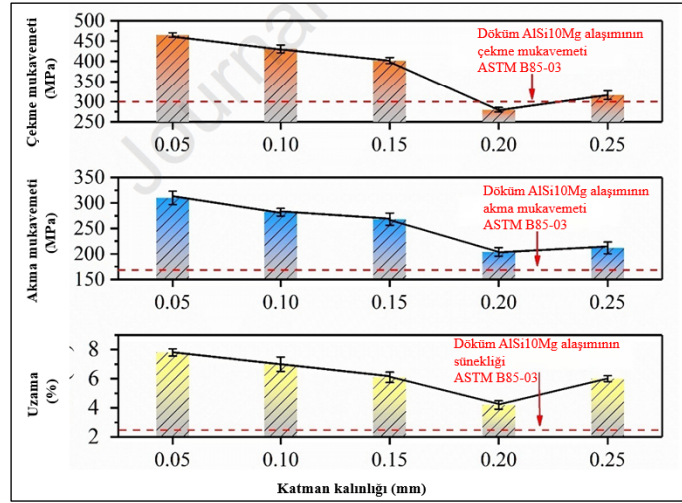
Eklemeli imalatta nihai ürüne ulaşma sürecinde birçok parametre söz konusudur. Bu nedenle parametrelerin ürün kalitesi (çekme mukavemeti, akma mukavemeti, süneklik, sertlik) üzerindeki etkisinin araştırılması gerekmektedir. SLM yöntemi ile üretilen parçalarının mekanik özellikleri geleneksel bir üretim yöntemi ile üretilen parçalardan daha yüksektir. SLM ile üretilen AlSi10Mg parçalarının döküm yöntemi ile üretilenlere göre daha yüksek çekme mukavemeti ve sertlik göstermektedir. Eklemeli imalatın bu avantajı imal edilen parçaların ince taneli mikro yapıda olması ile açıklanmaktadır [58]. Jawade vd. [59] SLM yöntemi ve geleneksel yöntemlerle (döküm) üretilen AlSi10Mg alaşımlı numunelerin mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Eklemeli imalat ile üretilmiş AlSi10Mg alaşımlı parçaların döküm yöntemi ile üretilenlere kıyasla daha iyi çekme mukavemeti gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca eklemeli imalat ile yatay olarak üretilen numunelerin dikey yöndeki numunelere kıyasla daha iyi sonuçlar vermiştir. Bu mukavemet artışını yatay yönde oluşturulan katmanların çekme testi sırasında yüklenme yönü boyunca üretilmesi ile katmanlar arası daha iyi bağ yapısı ile açıklamışlardır (Şekil 13). Kempen vd. [60] AlSi10Mg alaşımlı numunelerin eklemeli imalatında yatay olarak üretilen numunelerin mukavemet açısından daha iyi performans sergilediğini söylemişlerdir.



Şekil 13. AlSi10Mg alaşımlı parçalarının mukavemet açısından karşılaştırılması [59]

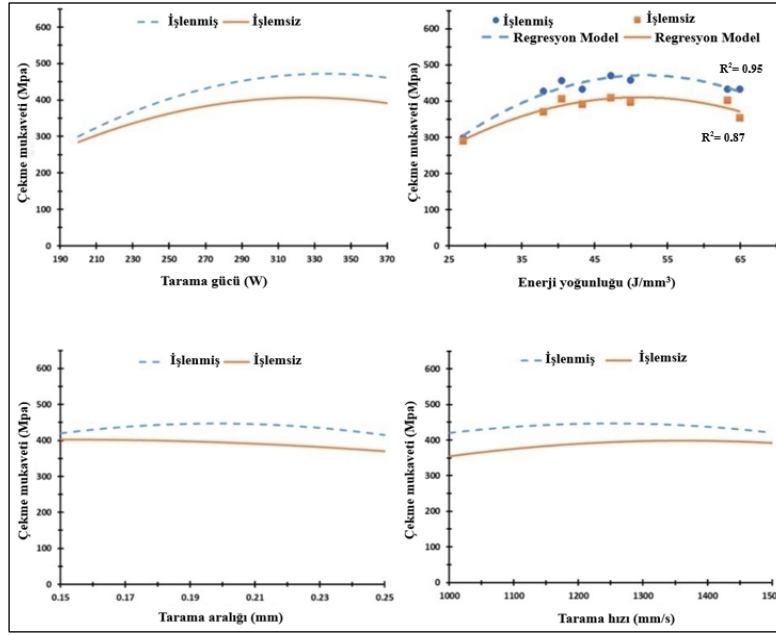
Dong vd. [61] AlSi10Mg alaşımından üretilen parçalar üzerinde tarama hızının çekme mukavemeti ve sünekliğe etkisini araştırmışlardır. Parça üretiminde kullanılan parametreler tarama aralığı (0,7 mm), tarama hızı (950-1100-1250-1400 mm/s), tarama gücü (190 W) ve katman kalınlığı (0,03 mm) olarak belirlenmiştir. 950 mm/s tarama hızında maksimum çekme mukavemeti (386 MPa) ve süneklik (%5,6) elde edilmiştir. Tarama hızı 1100 mm/s'den 1400 mm/s değerine yükseldikçe çekme dayanımı kademeli olarak 386 MPa'dan 330 MPa'ya, süneklik değeri 1400 mm/s tarama hızında %4'e düşmüştür. Mekanik özelliklerdeki bu düşüşü yüksek tarama hızında zayıf metalurjik bağ oluşumu ve erimemiş partiküllerin neden olduğu düzensiz gözeneklerin oluşumuna atfetmişlerdir. Liu vd. [62] AlSi10Mg alaşımından üretilen numuneler üzerinde katman kalınlığının mekanik özelliklerine etkisi incelemişlerdir. Çalışma sonucunda numunelerinin mekanik özellikleri katman kalınlığının değişimi ile artan ve azalan bir eğilim sergilemiştir. Katman kalınlığı 0,05 mm olduğunda mekanik özellikler en yüksek değere ulaşmış ve çekme mukavemeti, akma mukavemeti, süneklik değerleri sırasıyla 465 MPa, 310 MPa ve %7,8'dir. Katman kalınlığının artmasıyla birlikte parçaların mukavemet özelliği önce 0,2 mm katman kalınlığında en düşük değere (çekme

mukavemeti 280 MPa, akma mukavemeti 204 MPa, süneklik %4.2) kadar düşmekte ve en yüksek katman kalınlığı değerinde belirgin bir şekilde artmıştır. Parçaların mukavemet özelliklerinin döküm yöntemi ile elde edilen AlSi10Mg alaşımlı parçalardan daha üstün olduğunu söylemişlerdir (Şekil 14).



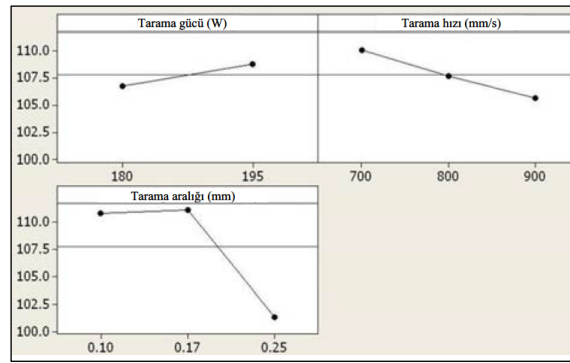
Şekil 14. Katman kalınlığının mekanik özellikler üzerindeki etkisi [62]

AlSi10Mg alaşımının eklemeli imalatında enerji yoğunluğunun mekanik özellikler üzerindeki etkisi bir çok çalışmada araştırılmıştır. AlSi10Mg alaşımından üretilen parçalar için ideal enerji yoğunluğunun belirlenmesi ürün kalitesi açısından önemlidir. İdeal enerji yoğunluğunda üretilmeyen parçalarda kusurlar oluşmakta ve üretilen parçalar mukavemet özellikleri açısından olumsuz etkilenmektedir. Maamoun vd. [63] eklemeli imalat ile üretilen AlSi10Mg alaşımlı parçaların ve eklemeli imalat sonrası işlem görmüş parçaların çekme mukavemeti üzerinde imalat parametrelerinin etkisini araştırmışlardır. İşlem görmüş parçaların işlemsiz parçalara göre daha yüksek çekme mukavemetine sahip olduğu görülmüştür. Çekme mukavemetindeki bu farkın yüzey pürüzlülüğünden kaynaklandığı belirtilmiştir. Şekil 15'te görüldüğü gibi deneysel sonuçlar ile regresyon modeli arasında bir uyum söz konusudur. Lazer gücü çekme mukavemeti üzerinde tarama aralığı ve tarama hızından daha etkilidir. Optimum enerji yoğunluğu değeri 50 J/mm^3 olduğunu ve bu değerın 1300 mm/s tarama hızı, 370 W lazer gücü ve $0,19 \text{ mm}$ tarama aralığında elde edilebileceğini vurgulamışlardır (Şekil 15). Wu vd. [64] AlSi10 Mg alaşımlı parçaların üretilmesinde yakın bir enerji yoğunluğunun ($50\text{-}65 \text{ J/mm}^3$) ideal değer olduğunu, Kimura ve Nakamoto [43] AlSi7Mg alaşımlı numunelerin imal edilmesinde 60 J/mm^3 bir enerji yoğunluğunun optimum değer olduğunu belirtmişlerdir.



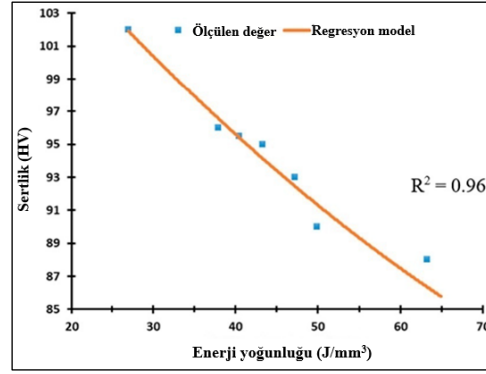
Şekil 15. İmalat parametrelerinin çekme mukavemeti üzerindeki [63]

Sertlik birçok endüstriyel uygulamada dikkate alınan önemli bir yüzey özelliğidir. Sertlik, malzemenin bölgesel plastik deformasyona karşı gösterdiği direncin karşılığıdır. Krishnan vd. [65] AlSi10Mg alaşımlı parçaların üretilmesinde imalat parametrelerinin sertlik üzerindeki etkisi incelemiştir. İşlem üzerindeki en etkili parametreyi belirlemek için anova metodu kullanılmıştır. Sertliği en çok etkileyen parametrenin tarama aralığı olduğu bunu sırası ile tarama hızı ve lazer gücünün izlediğini söylemişlerdir (Şekil 16).



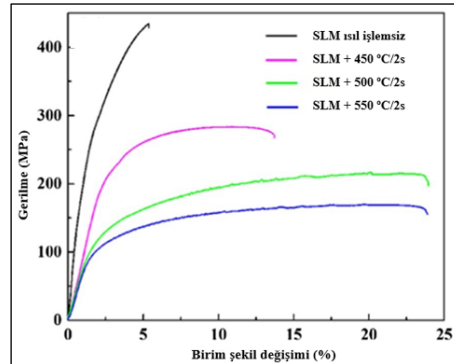
Şekil 16. Sertlik faktörünün etki grafiği [65]

Sertlik değeri gözeneklilik ile ilişkilidir. Bu nedenle gözenekliliği azaltan parametrelerin optimize edilmesi ile üretilen parçaların yüksek sertlikte olması sağlanmaktadır. Maamoun vd. [63] tarama gücü, tarama hızı ve tarama aralığının sertlik üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Enerji yoğunluğu arttıkça parçaların sertliğinin belirli bir seviyeye kadar arttığını ve daha yüksek enerji yoğunluğunda oluşan kusurlar nedeni ile azaldığını bildirmişlerdir. Artan ve azalan enerji yoğunluklarında sertlik değeri 86-103 HV arasında değişmekte ve maksimum değer 27 J/mm³ enerji yoğunluğunda elde edilmiştir. Enerji yoğunluğundaki artış anahtar deliği gözenekliliğine yol açmıştır. Lazer gücünün artması ile sertlik değerinin azaldığını, tarama aralığının ve tarama hızının artması ile parçanın sertliğinin arttığını belirtmişlerdir (Şekil 17). Giovagnoli vd. [66] AlSi10Mg alaşımlı parçaların üretilmesinde enerji yoğunluğunun sertlik üzerindeki etkisini araştırmışlardır. İdeal sertlik için enerji yoğunluğu aralığının 35-40 J/mm³ olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 17. Enerji yoğunluğunun sertlik üzerindeki etkisi [63]

SLM yöntemi ile üretilen parçalarda ergitme sürecinden kaynaklanan büyük kalıntı gerilmeler oluşmakta ve bu durumda parçaların sünekliklerinin düşük olmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, kalıtsal kusurların üstesinden gelmek, mekanik ve mikroyapısal performansı artırmak için üretim sonrası numunelere ısı işlemleri uygulanmaktadır. Aboulkhair vd. [67] SLM yöntemi ile üretilmiş AlSi10Mg alaşımlı parçalara uygulanan T6 ısı işleminin mekanik özelliklere etkisini incelemiştir. Isıl işlem sonrası malzemenin çekme mukavemeti, akma mukavemeti, sertlik değeri ve elastisite modülünde azalma meydana gelirken süneklik değeri artmıştır. Çalışma sonunda süneklik ısı işleme önemli ölçüde artarken mukavemet özelliklerinde küçük bir azalma ile döküm yöntemi ile karşılaştırıldığında SLM parçasının daha iyi sonuçlar verdiğini gözlemlemiştir. Li vd. [68] SLM ile üretilen AlSi10Mg alaşımlı parçalarının mikro yapıları ve mekanik özellikleri üzerinde ısı işlemlerinin etkisini incelemiştir. Standart T6 ısı işlem yöntemine uygun olarak numuneler farklı sıcaklıklarda (450, 500, 550 °C) 2 saat boyunca çözeltiye alma işlemine tabi tutulmuş, ardından su verme işlemi yapılmıştır. SLM yöntemi ile üretilen numunenin akma dayanımı (322 MPa) ve çekme dayanımının (434 MPa) en yüksek olmasına rağmen en düşük sünekliğe (%5) sahiptir. Numuneler 2 saat boyunca 450 °C'de çözelti ısı işlemine tabi tutulduğunda hem akma dayanımı (196 MPa) hemde çekme dayanımında (282 MPa) hızlı bir düşüş olurken, süneklikte (%13) büyük bir artış olmuştur. Çözelti sıcaklığının 550 °C'ye kadar artmasıyla, numuneler en düşük akma ve çekme dayanımı (90 ve 168 MPa) sergilerken, süneklikte maksimum değere (%23) yükseldiğini belirtmişlerdir (Şekil 18).



Şekil 18. Isıl işlemin farklı sıcaklıklarda mekanik özelliklere etkisi [68]

Tablo 2'de AlSi10Mg alaşımlı parçalarının mekanik özellikleri verilmiştir. Aşağıdaki tabloda derlenen tüm çalışmalar 25-110 J/mm³ enerji yoğunluğu değerleri arasındadır. Bu nedenle artan ve azalan enerji yoğunluğu değerlerinde mekanik özelliklerdeki değişim birbiriyle karşılaştırılabilir durumdadır.

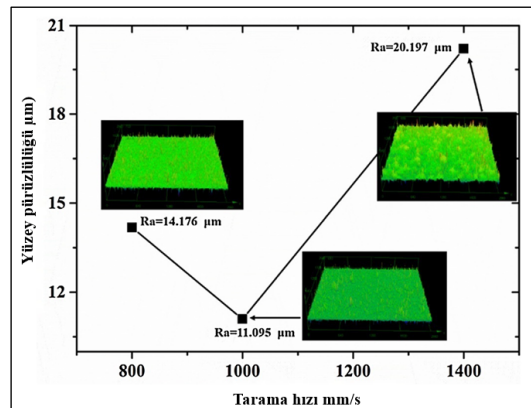
Tablo 2. AlSi10Mg alaşımlı parçaların mekanik özellikleri üzerinde imalat parametrelerinin etkisi

Malzeme	Lazer Gücü (W)	Tarama Hızı (mm/s)	Tarama Aralığı (mm)	Katman Kalınlığı (mm)	İnşa Yönü	Enerji Yoğunluğu (J/mm ³)	Sertlik (HV)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (Mpa)	Ref no
	350	1650	0,13	0,03	Yatay	54,39	139	242,5	412	[69]
	195	700	0,17	0,03	-	54,62	119,92	-	-	[65]
	340	1300	0,2	0,03	Yatay	43,58	-	248	386	[70]
	200	1400	0,105	0,03	Yatay	45,35	127	-	391	[60]

AlSi10Mg	250	500	0,15	0,05	Yatay	66,66	113,54	301,26	401,89	[59]
	150	1000	0,05	0,05	Yatay	60	127	-	460	[71]
	300	500	0,15	0,05	-	80	145	220	400	[72]
	180	1000	0,05	0,03	-	120	139	-	360	[73]
	190	950	0,07	0,03	-	95,23	125	-	380	[61]
	200	550	0,13	0,025	-	111,88	125	268	333	[67]
	330	1200	0,15	0,03	-	61,11	-	-	335	[74]
	350	1140	0,17	0,05	-	36,11	132,55	322,17	435,25	[68]
	200	1400	0,105	0,03	-	45,35	136	-	396	[75]
	250	1400	0,13	0,03	-	45,78	128	263,6	448	[76]
	370	1300	0,19	0,03	-	49,93	-	268	404	[77]
	370	1000	0,19	0,03	Yatay	64,91	118	186	354	[63]
	370	1300	0,19	0,03	Yatay	49,93	115	196	396	
	350	1170	0,24	0,05	-	24,92	-	300	455	[78]
	320	1455	0,11	0,05	-	39,98	-	240	385	[79]
400	1000	0,165	0,025	-	96,96	-	-	312	[80]	

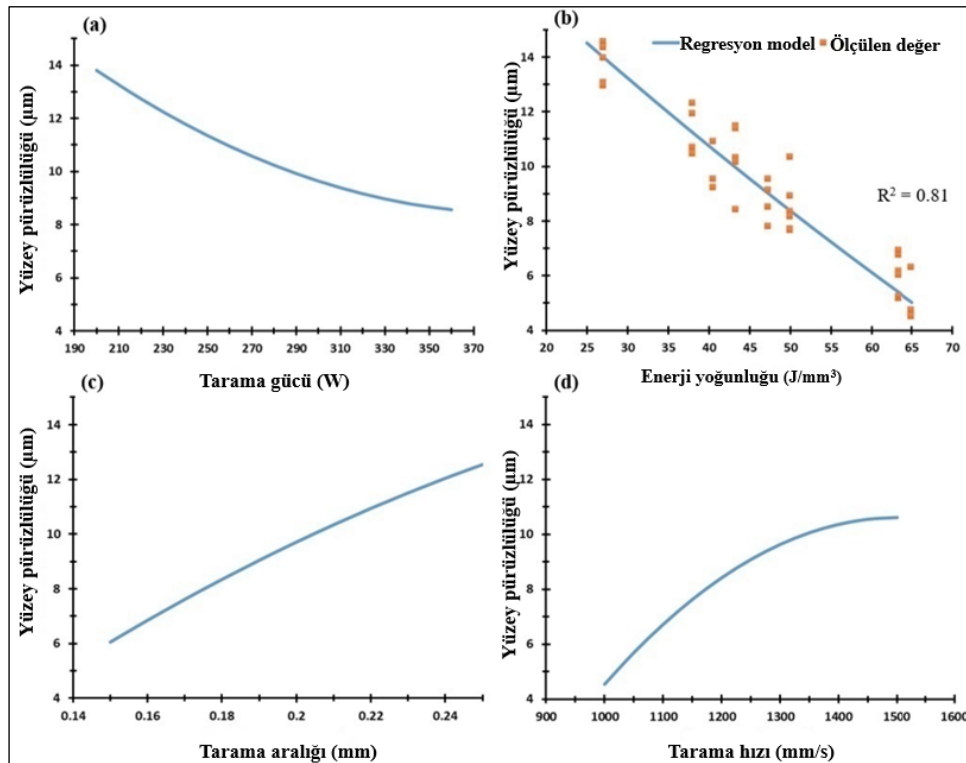
2.3. İmalat Parametrelerinin Yüzey Kalitesi Üzerindeki Etkisi (Effect of Manufacturing Parameters on Surface Quality)

Yüzey pürüzlülüğünü azaltmak için, eklemeli imalat süreçlerini ve pürüzlülüğe neden olan değişkenlerin daha iyi anlaşılması gerekmektedir. Literatür araştırmasında lazer gücünün, tarama hızının, tarama aralığının, katman kalınlığının ve bunların etkileşiminin (enerji yoğunluğunun) genellikle SLM yöntemi ile üretilen parçaların yüzey kalitesini etkileyen birincil parametreler olduğu görülmüştür [81-83]. Brecher vd. [84] tarama gücünün çok yüksek olduğunda eriyik havuzundaki aşırı enerji yoğunluğu nedeniyle toz malzemenin sıçrama potansiyeli olduğunu ve bunun nispeten düşük bir yüzey kalitesine yol açabileceğini söylemiştir. Tarama hızı açısından genellikle düşük bir hız tercih edilir, çünkü uzun süre eriyik havuzunun yeniden dağıtılmasına ve düz bir yüzey elde etmesine olanak tanımaktadır [82]. Pei vd. [73] AlSi10Mg alaşımlı ürünlerin üretilmesinde lazer gücünün, tarama hızının ve tarama aralığının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Deneysel sonuçlar SLM ile üretilmiş numunelerin gözeneklilik seviyesinin lazer ışınının enerji yoğunluğu ve tarama aralığından önemli ölçüde etkilendiğini göstermiştir. En iyi yüzey pürüzlülüğünü en düşük tarama aralığında (0,05 mm), en düşük tarama gücünde (150 W) ve orta tarama hızında (1000 mm/s) elde etmişlerdir (Şekil 19). Calignano vd. [85] lazer gücü, tarama hızı ve tarama aralığının SLM işlemi ile üretilen AlSi10Mg alaşımlı parçalarının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Parçalar bilyalı dövme öncesi ve sonrası olmak üzere yüzey pürüzlülüğü açısından değerlendirilmiştir. Çalışmada Taguchi L18 dizisi kullanılmış ve tarama hızının yüzey pürüzlülüğü için en etkili parametre olduğu ve bilyeli dövme işleminin yüzey pürüzlülüğünü %83 oranında azalttığını bulmuşlardır. Sharma vd. [86] yaptıkları çalışmada lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı ve inşa yönü (0°, 45°, 90°) gibi imalat parametrelerinin AlSi10Mg alaşımlı parçaların yoğunluğu ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Parametrelerin işlem üzerindeki etkisini belirlemek için anova analizi kullanılmıştır. Çalışma sonucunda yoğunluk ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametrenin tarama aralığı ve bunu sırası ile lazer gücü, tarama hızı ve inşa yönü olduğunu ifade etmişlerdir.



Şekil 19. Yüzey pürüzlülüğünün imalat parametreleri ile değişimi [73]

Sharma vd. [86] yaptıkları çalışmada lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı ve inşa yönü (0° , 45° , 90°) gibi imalat parametrelerinin AlSi10Mg alaşımlı parçaların yoğunluğu ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Parametrelerin işlem üzerindeki etkisini belirlemek için anova analizi kullanılmıştır. Çalışma sonucunda yoğunluk ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametrenin tarama aralığı ve bunu sırası ile lazer gücü, tarama hızı ve inşa yönü olduğunu ifade etmişlerdir. Wang vd. [87] lazer enerji yoğunluğunun yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Aşırı yüksek lazer enerji yoğunluğunun toplanma kusuruna yol açabileceğini, yetersiz lazer enerji yoğunluğunun ise gözeneklilik ve mikro çatlak gibi kusurlar üretme eğiliminde olduğunu ve yüzey pürüzlülüğünü etkilediğini gözlemlemişlerdir. Hitzler vd. [88] üretilmiş numunelerin yüzey pürüzlülüğünün imalat tablası üzerindeki konumlarına göre değiştiğini belirtmiştir. Ayrıca enerji yoğunluğunun artmasının üst yüzeyde ölçülen pürüzlülük değerlerinin yan yüzlere göre daha düşük değerlerde olduğunu söylemişlerdir. Maamoun vd. [89] imalat parametrelerinin AlSi10Mg alaşımlı parçaların yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini incelemiştir. 370 W lazer gücünde, 1000 mm/s tarama hızı ve 0,19 mm tarama aralığı değerleri ile hesaplanan 65 J/mm^3 enerji yoğunluğunda $4,5 \mu\text{m}$ 'lik bir yüzey pürüzlülüğü elde edildiğini ifade etmişlerdir (Şekil 20). Bir başka çalışmada AlSi10Mg alaşımının eklemeli imalatında en düşük yüzey pürüzlülüğünün ($5,09 \mu\text{m}$) 50 J/mm^3 enerji yoğunluğunda olduğu vurgulanmıştır [90]. Majeed vd. [91] AlSi10Mg alaşımlı parçaların üretiminde imalat parametrelerinin (lazer gücü, tarama hızı, örtüşme oranı, tarama aralığı) ve ısıl işlemlerin (çözeltiye alma, yapay yaşlandırma) yüzey kalitesi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda ısıl işlemsiz olarak 320 W lazer gücü, 600 mm/s tarama hızı, %35 örtüşme oranı ve 0,088 mm tarama aralığı parametreleri ile en iyi yüzey kalitesi elde edilmiştir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğü çözeltiye alma (540°C 'de 2 saat) ısıl işlemi ile daha da azaltılabileceğini bildirmişlerdir.



Şekil 20. İmalat parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi [89]

Tablo 3'de AlSi10Mg alaşımının eklemeli imalatında imalat parametrelerinin üretilen parçaların yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri verilmiştir.

Tablo 3. AlSi10Mg alaşımlı parçaların yüzey pürüzlülükleri üzerinde imalat parametrelerinin etkisi

Malzeme	Lazer Gücü (W)	Tarama Hızı (mm/s)	Tarama Aralığı (µm)	Örtüşme Oranı (%)	Katman Kalınlığı (mm)	Yüzey Pürüzlülüğü (µm)	Ref. no
AlSi10Mg	320	600	102,4	25	-	6,86	[91]
	320	600	95,5	30	-	3,73	
	320	600	88,7	35	-	3,57	
	320	750	93,1	25	-	3,80	
	320	750	86,9	30	-	3,92	
	320	750	80,7	35	-	3,85	[89]
	320	900	70,9	35	-	4,28	
	370	1000	190	-	0,03	4,5	
	370	1300	190	-	0,03	5,09	
	150	1000	50	-	-	11,09	

3. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Eklemeli imalat ile üretilen ürünlerin nihai (son) ürün olarak kullanılabilirliği son derece önemlidir. Nihai ürüne ulaşma aşamasında ideal imalat parametreleri ürün kalitesi açısından önemli bir faktördür. Optimum imalat parametreleri belirlenerek istenilen kalitede parçalar elde etmek mümkündür. Bu çalışmada, seçici lazer ergitme (SLM) yöntemi ile AlSi10Mg alaşımının eklemeli imalatında imalat parametrelerinin ürün kalitesi üzerindeki etkisi ayrıntılı olarak araştırılmıştır. Bu araştırma ile elde edilen önemli sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- SLM yöntemi ile AlSi10Mg alaşımli parçaların imalatında enerji yoğunluğunun ürün kalitesinde etkili olduğu tespit edilmiştir.
- Üretilen parçalarda en az gözeneklilik için ideal enerji yoğunluğu, 50-75 J/mm³ aralığındadır. Artan ve azalan enerji yoğunluklarında gözeneklilik seviyesinin arttığı belirlenmiştir.
- Bağlı yoğunluk, lazer gücü, tarama hızı ve tarama aralığı parametrelerinin artan değerleri ile optimum seviyelere ulaştığı ve bu parametrelerin yüksek değerlerinde bağlı yoğunluğun azaldığı görülmüştür.
- AlSi10Mg alaşımından üretilen parçaların optimum bağlı yoğunluk değeri 50-100 J/mm³ enerji yoğunluğu aralığında elde edildiği görülmüştür.
- Eklemeli imalat ile üretilen AlSi10Mg alaşımli parçalar döküm yöntemi ile üretilenlere kıyasla daha iyi mukavemet özelliği gösterdiği tespit edilmiştir.
- AlSi10Mg alaşımli parçalar için optimum çekme mukavemeti, 50-65 J/mm³ enerji yoğunluğu aralığında elde edilmiştir.
- Sertlik üzerinde etkili parametrenin tarama aralığı olduğu gözlenmiştir.
- Isıl işlemin sünekliği artırıcı etkiye sahip olduğu görülmüştür.
- AlSi10Mg alaşımli parçaların üretilmesinde en düşük yüzey pürüzlülüğü 50-65 J/mm³ enerji yoğunluğu aralığında oluştuğu görülmüştür.
- Isıl işlem ile yüzey pürüzlülüğünün daha da azaltılabileceği görülmüştür.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] M. Günay, S. Gündüz, H. Yılmaz, N. Yaşar, R. Kaçar, PLA esaslı numunelerde çekme dayanımı için 3D baskı işlem parametrelerinin optimizasyonu, *Politeknik Dergisi*, 23(1): 73-79, (2020).
- [2] C. Kiraz, H. K. Sezer, İ. Şahin, Kuyumculuk sektöründe 3B baskı tasarım tekniklerinin özgürlüğünden faydalanıldığında sektöre getirileri, *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 2(2): 46-58, (2018).
- [3] N. T. Aboulkhair, N. M. Everitt, I. Ashcroft, C. Tuck, Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting, *Additive manufacturing*, 1, 77-86, (2014).
- [4] N. Hutasoit, R. A. Rashid, S. Palanisamy, A. Duguid, Effect of build orientation and post-build heat treatment on the mechanical properties of cold spray additively manufactured copper parts, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 110(9): 2341-2357, (2020).
- [5] M. Günay, İ. Yeşildağ, Mechanical Properties of Low Carbon Steel Produced by GMAW-based Additive Manufacturing, *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(3): 175-182, (2021).
- [6] H. Dedeakayoğulları, A. Kaçal, Eklemeli İmalat Teknolojileri ve Kullanılan Talaşlı İmalat Yöntemleri Üzerine Yapılan Çalışmaların Değerlendirilmesi, *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, 1(1): 1-12, (2020).
- [7] <http://my3dconcepts.com/explore/how-3d-printing-works>, 20.01.2022.
- [8] A. N. Jinoop, S. K. Subbu, R. A. Kumar, Mechanical and microstructural characterisation on direct metal laser sintered Inconel 718, *International Journal of Additive and Subtractive Materials Manufacturing*, 2(1): 1-12, (2018).
- [9] L. Yang, *Additive manufacturing of metals: the technology, materials, design and production*, Cham: Springer, 45-61, (2017).
- [10] N. Guo, M.C. Leu, Additive manufacturing: technology, applications and research needs, *Frontiers of mechanical engineering*, 8(3): 215-243, (2013).
- [11] K. G. Prashanth, S. Scudino, H. J. Klauss, K. B. Surreddi, L. Löber, Z. Wang, J. Eckert, Microstructure and mechanical properties of Al-12Si produced by selective laser melting: Effect of heat treatment, *Materials Science and Engineering: A*, 590, 153-160, (2014).
- [12] F. Trevisan, F. Calignano, M. Lorusso, J. Pakkanen, A. Aversa, E. P. Ambrosio, D. Manfredi, On the selective laser melting (SLM) of the AlSi10Mg alloy: process, microstructure, and mechanical properties, *Materials*, 10(1): 76. (2017).
- [13] E. Brandl, U. Heckenberger, V. Holzinger, D. Buchbinder, Additive manufactured AlSi10Mg samples using Selective Laser Melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior, *Materials & Design*, 34, 159-169, (2012).
- [14] E. Louvis, P. Fox, C. J. Sutcliffe, Selective laser melting of aluminium components, *Journal of Materials Processing Technology*, 211(2): 275-284. (2011).
- [15] W. E. Frazier, Metal additive manufacturing: a review, *Journal of Materials Engineering and performance*, 23(6): 1917-1928, (2014).
- [16] H. Kahramanzade, Y. Sert, T. Küçükömeroğlu, Sürtünme Karıştırma İşleminin Eklemeli İmalat Yöntemi ile Üretilen AlSi10Mg Alaşımının Tribolojik Özelliklerine Etkisi, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (28), 1159-1166. (2021).

- [17] W. D. Nix, H. Gao, Indentation size effects in crystalline materials: a law for strain gradient plasticity, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 46(3): 411-425, (1998).
- [18] D. Buchbinder, W. Meiners, K. Wissenbach R. Popraw, Selective laser melting of aluminum die-cast alloy correlations between process parameters, solidification conditions, and resulting mechanical properties, *Journal of Laser Applications*, 27 (S2): (2015).
- [19] S. Sun, M. Brandt, M. J. L. A. M. Easton, Powder bed fusion processes: An overview, *Laser Additive Manufacturing*, 55-77, 2017.
- [20] E. U. Solakoğlu, Lazerle Metal Toz Ergitme (SLM) Prosesi Sonrası Proses Parametrelerinin Yüzey Kalitesine Olan Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 10, (2018).
- [21] B. Duman, M. C. Kayacan, Doğrudan metal lazer sinterleme/ergitme yöntemi ile imal edilecek parçanın mekanik özelliklerinin tahmini, *Teknik Bilimler Dergisi*, 7(1): 12-28. (2017).
- [22] J. P. Oliveira, A. D. LaLonde, J. Ma, Processing parameters in laser powder bed fusion metal additive manufacturing, *Materials & Design*, 193, 108762, (2020).
- [23] N. Read, W. Wang, K. Essa, M. M. Attallah, Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: Process optimisation and mechanical properties development, *Materials & Design (1980-2015)*, 65, 417-424, (2015).
- [24] P. Wei, Z. Wei, Z. Chen, J. Du, Y. He, J. Li, Y. Zhou, The AlSi10Mg samples produced by selective laser melting: single track, densification, microstructure and mechanical behavior, *Appl. Surf. Sci.*, 408, 38-50, (2017).
- [25] S. Siddique, M. Imran, E. Wycisk, C. Emmelmann, F. Walther, Influence of process-induced microstructure and imperfections on mechanical properties of AlSi12 processed by selective laser melting, *J. Mater. Process. Technol.*, 221, 205-213, (2015).
- [26] Ö. Bayraktar, G. Uzun, R. Çakiroğlu, A. Guldaz, Experimental study on the 3D-printed plastic parts and predicting the mechanical properties using artificial neural networks, *Polymers for Advanced Technologies*, 28(8): 1044-1051, (2017).
- [27] Y. Liu, Y. Yang, S. Mai, D. Wang, C. Song, Investigation into spatter behavior during selective laser melting of AISI 316L stainless steel powder, *Materials & Design*, 87, 797-806, (2015).
- [28] A. A. Martin, N. P. Calta, S. A. Khairallah, J. Wang, P. J. Depond, A.Y. Fong, V. Thampy, G. M. Guss, A. M. Kiss, K. H. Stone, C. J. Tassone, J. Nelson Weker, M. F. Toney, T. Van Buuren, M. J. Matthews, Dynamics of pore formation during laser powder bed fusion additive manufacturing, *Nature communications* 10(1): 1-10, (2019).
- [29] M. Bayat, A. Thanki, S. Mohanty, A. Witvrouw, S. Yang, J. Thorborg, N.S. Tiedje, J. H. Hattel, Keyhole-induced porosities in laser-based powder bed fusion (L-PBF) of Ti6Al4V: high-fidelity modelling and experimental validation, *Addit. Manuf.*, 30, 100835, (2019).
- [30] G. Kasperovich, J. Haubrich, J. Gussone, G. Requena, Correlation between porosity and processing parameters in TiAl6V4 produced by selective laser melting, *Materials & Design*, 105, 160-170, (2016).
- [31] W. E. Frazier, Metal additive manufacturing: a review, *Journal of Materials Engineering and performance*, 23(6): 1917-1928, (2014).

- [32] W. J. Sames, F. A. List, S. Pannala, R. R. Dehoff, S. S. Babu, The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing, *International materials reviews*, 61(5): 315-360. (2016).
- [33] A. Triantaphyllou, C. L. Giusca, G. D. Macaulay, F. Roerig, M. Hoebel, R. K. Leach, K. A. Milne, Surface texture measurement for additive manufacturing, *Surface topography: metrology and properties*, 3(2): 024002, (2015).
- [34] G. Strano, L. Hao, R. M. Everson, K. E. Evans, Surface roughness analysis, modelling and prediction in selective laser melting, *Journal of Materials Processing Technology*, 213(4): 589-597, (2013).
- [35] N. N. Kumbhar, A. V. Mulay, Post processing methods used to improve surface finish of products which are manufactured by additive manufacturing technologies: a review, *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 99(4): 481-487, (2018).
- [36] L. Hackel, J. R. Rankin, A. Rubenchik, W. E. King, M. Matthews, Laser peening: A tool for additive manufacturing post-processing, *Additive Manufacturing*, 24, 67-75, (2018).
- [37] S. Lee, Z. Ahmadi, J. W. Pegues, M. Mahjouri-Samani, N. Shamsaei, Laser polishing for improving fatigue performance of additive manufactured Ti-6Al-4V parts, *Optics & Laser Technology*, 134, 106639, (2021).
- [38] M. Kahlin, H. Ansell, D. Basu, A., Kerwin, L. Newton, B. Smith, J. J. Moverare, Improved fatigue strength of additively manufactured Ti6Al4V by surface post processing, *International Journal of Fatigue*, 134, 105497, (2020).
- [39] E. Maleki, S. Bagherifard, M. Bandini, M. Guagliano, Surface post-treatments for metal additive manufacturing: Progress, challenges, and opportunities, *Additive Manufacturing*, 37, 101619, (2021).
- [40] A. Du Plessis, P. Sperling, A. Beerlink, O. Kruger, L. Tshabalala, S. Hoosain, S. G. Le Roux, Standard method for microCT-based additive manufacturing quality control 3: surface roughness, *MethodsX*, 5, 1111-1116, 2018.
- [41] Q. Wang, Z. Zhang, X. Tong, S. Dong, Z. Cui, X. Wang, L. Ren, Effects of process parameters on the microstructure and mechanical properties of 24CrNiMo steel fabricated by selective laser melting, *Optics & Laser Technology*, 128, 106262, (2020).
- [42] T. Gustmann, A. Neves, U. Kühn, P. Gargarella, C. S. Kiminami, C. Bolfarini, S. Pauly, Influence of processing parameters on the fabrication of a Cu-Al-Ni-Mn shape-memory alloy by selective laser melting, *Additive Manufacturing*, 11, 23-31, (2016).
- [43] T. Kimura, T. Nakamoto, Microstructures and mechanical properties of A356 (AlSi7Mg0.3) aluminum alloy fabricated by selective laser melting, *Mater. Des.*, 89, 1294-1301, (2016).
- [44] H. Gong, K. Rafi, H. Gu, T. Starr, B. Stucker, Analysis of defect generation in Ti-6Al-4V parts made using powder bed fusion additive manufacturing processes, *Additive Manufacturing*, 1, 87-98, (2014).
- [45] D. Gu, Y. Shen, Balling phenomena in direct laser sintering of stainless steel powder: Metallurgical mechanisms and control methods, *Materials & Design*, 30(8): 2903-2910, (2009).
- [46] V. Gopan, K. L. D. Wins, A. Surendran, Innovative potential of additive friction stir deposition among current laser based metal additive manufacturing processes: A review, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 32, 228-248, (2021).

- [47] Z. Chen, Z. Wei, P. Wei, S. Chen, B. Lu, J. Du, S. Zhang, Experimental research on selective laser melting AlSi10Mg alloys: process, densification and performance, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26(12): 5897-5905, (2017).
- [48] Y. Bai, Y. Yang, D. Wang, M. Zhang, Influence mechanism of parameters process and mechanical properties evolution mechanism of maraging steel 300 by selective laser melting, *Materials Science and Engineering: A*, 703, 116-123, (2017).
- [49] A. Ahmed, M. S. Wahab, A. A. Raus, K. Kamarudin, Q. Bakhsh, D. Ali, Effects of selective laser melting parameters on relative density of AlSi10Mg, *Int. J. Eng. Technol*, 8(6): 2552-2557, (2016).
- [50] H. Hyer, L. Zhou, S. Park, G. Gottsfritz, G. Benson, B. Tolentino, Y. Sohn, Understanding the laser powder bed fusion of AlSi10Mg alloy, *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 9(4): 484-502, (2020).
- [51] E. Cerri, E. Ghio, G. Bolelli, Effect of the Distance from Build Platform and Post-Heat Treatment of AlSi10Mg Alloy Manufactured by Single-and Multi-Laser Selective Laser Melting, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30(7): 4981-4992, (2021).
- [52] S. Bai, N. Perevoshchikova, Y. Sha, X. Wu, The effects of selective laser melting process parameters on relative density of the AlSi10Mg parts and suitable procedures of the archimedes method, *Applied Sciences*, 9(3): 583, (2019).
- [53] A. Majeed, Y. J. Lv, Zhang, T. Peng, Z. Atta, A. Ahmed, Investigation of T4 and T6 heat treatment influences on relative density and porosity of AlSi10Mg alloy components manufactured by SLM, *Computers & Industrial Engineering*, 139, 106194, (2020).
- [54] L. Girelli, M. Tocci, M. Gelfi, A. Pola, Study of heat treatment parameters for additively manufactured AlSi10Mg in comparison with corresponding cast alloy, *Materials Science and Engineering: A*, 739, 317-328, (2019).
- [55] T. Yang, T. Liu, W. Liao, E. MacDonald, H. Wei, C. Zhang, K. Zhang, Laser powder bed fusion of AlSi10Mg: Influence of energy intensities on spatter and porosity evolution, microstructure and mechanical properties, *Journal of Alloys and Compounds*, 849, 156300, (2020).
- [56] K. Riener, S. Oswald, M. Winkler, G. J. Leichtfried, Influence of storage conditions and reconditioning of AlSi10Mg powder on the quality of parts produced by laser powder bed fusion (LPBF), *Additive Manufacturing*, 39, 101896, (2021).
- [57] J. C. Hastie, M. E. Kartal, L. N. Carter, M. M. Attallah, D. M. Mulvihill, Classifying shape of internal pores within AlSi10Mg alloy manufactured by laser powder bed fusion using 3D X-ray micro computed tomography: Influence of processing parameters and heat treatment, *Materials Characterization*, 163, 110225, (2020).
- [58] L. P. Lam, D. Q. Zhang, Z. H. Liu, C. K. Chua, Phase analysis and microstructure characterisation of AlSi10Mg parts produced by Selective Laser Melting, *Virtual and Physical Prototyping*, 10(4): 207-215 (2015).
- [59] S. A. Jawade, R. S. Joshi, S. B. Desai, Comparative study of mechanical properties of additively manufactured aluminum alloy, *Materials Today: Proceedings*, 46, 9270-9274. (2021).
- [60] K. Kempen, L. Thijs, J. Van Humbeeck, J. P. Kruth, Mechanical properties of AlSi10Mg produced by selective laser melting, *Physics Procedia*, 39, 439-446, (2012).

- [61] S. Dong, X. Zhang, F. Ma, J. Jiang, W. Yang, Z. Lin, Research on metallurgical bonding of selective laser melted AlSi10Mg alloy, *Materials Research Express*, 7(2): 025801, (2020).
- [62] M. Liu, K. Wei, X. Yue, G. Huang, J. Deng, X. Zeng, High power laser powder bed fusion of AlSi10Mg alloy: effect of laser beam mode, *Journal of Alloys and Compounds*, 164779, (2022).
- [63] A. H. Maamoun, Y. F. Xue, M. A. Elbestawi, S. C. Veldhuis, The effect of selective laser melting process parameters on the microstructure and mechanical properties of Al6061 and AlSi10Mg alloys, *Materials*, 12(1): 12, (2018).
- [64] H. Wu, Y. Ren, J. Ren, L. Liang, R. Li, Q. Fang, I. Baker, Selective laser melted AlSi10Mg alloy under melting mode transition: Microstructure evolution, nanomechanical behaviors and tensile properties, *Journal of Alloys and Compounds*, 873, 159823, (2021).
- [65] M Krishnan, E. Atzeni, R. Canali, F. Calignano, D. Manfredi, E. P. Ambrosio, L. Iuliano, On the effect of process parameters on properties of AlSi10Mg parts produced by DMLS, *Rapid Prototyping Journal*, (2014).
- [66] M. Giovagnoli, G. Silvi, M. Merlin, M. T. Di Giovanni, Optimisation of process parameters for an additively manufactured AlSi10Mg alloy: Limitations of the energy density-based approach on porosity and mechanical properties estimation, *Materials Science and Engineering: A*, 802, 140613 (2021).
- [67] N. T. Aboulkhair, I. Maskery, C. Tuck, I. Ashcroft, N. M. Everitt, The microstructure and mechanical properties of selectively laser melted AlSi10Mg: The effect of a conventional T6-like heat treatment, *Materials Science and Engineering: A*, 667, 139-146, (2016).
- [68] W. Li, S. Li, J. Liu, A. Zhang, Y. Zhou, Q. Wei, Y. Shi, Effect of heat treatment on AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting: Microstructure evolution, mechanical properties and fracture mechanism, *Materials Science and Engineering: A*, (663) 116-125, (2016).
- [69] A. A. Raus, M. S. Wahab, M. Ibrahim, K. Kamarudin, A. Ahmed, S. Shamsudin, Mechanical and physical properties of AlSi10Mg processed through selective laser melting, In *AIP Conference Proceedings*, 1831(1), 020027, (2017).
- [70] R. Casati, M. Hamidi Nasab, M. Coduri, V. Tirelli, M. Vedani, Effects of platform pre-heating and thermal-treatment strategies on properties of AlSi10Mg alloy processed by selective laser melting, *Metals*, 8(11): 954, (2018).
- [71] B. J. Mfusi, L. C. Tshabalala, A. P. I. Popoola, N. R. Mathe, The effect of selective laser melting build orientation on the mechanical properties of AlSi10Mg parts, In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 430(1): 012028, (2018).
- [72] D. Buchbinder, H. Schleifenbaum, S. Heidrich, W. Meiners, J. J. P. P. Bültmann, High power selective laser melting (HP SLM) of aluminum parts, *Physics Procedia*, 12, 271-278, (2011).
- [73] P. Wei, Z. Wei, Z. Chen, J. Du, Y. He, J. Li, Y. Zhou, The AlSi10Mg samples produced by selective laser melting: single track, densification, microstructure and mechanical behavior, *Applied surface science*, 408, 38-50, (2017).
- [74] R. K. Shah, P. P. Dey, Process parameter optimization of DMLS process to produce AlSi10Mg components, In *Journal of Physics: Conference Series*, 1240(1): 012011, (2019).

- [75] K. Kempen, L.Thijs, J. Van Humbeeck, J. P. Kruth, Processing AlSi10Mg by selective laser melting: parameter optimisation and material characterisation, *Materials Science and Technology*, 31(8): 917-923, (2015).
- [76] T. H. Park, M. S. Baek, H. Hyer, Y. Sohn, K. A. Lee, Effect of direct aging on the microstructure and tensile properties of AlSi10Mg alloy manufactured by selective laser melting process, *Materials Characterization*, 176, 111113, (2021).
- [77] P. Wang, H. Lei, X. Zhu, H. Chen, D. Fang, Influence of manufacturing geometric defects on the mechanical properties of AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting, *Journal of Alloys and Compounds*, 789, 852-859, (2019).
- [78] B. Chen, S. K. Moon, X. Yao, G. Bi, J. Shen, J. Umeda, K. Kondoh, Strength and strain hardening of a selective laser melted AlSi10Mg alloy, *Scripta Materialia*, 141, 45-49, (2017).
- [79] K. Gokuldoss Prashanth, S. Scudino, J. Eckert, Tensile properties of Al-12Si fabricated via selective laser melting (SLM) at different temperatures, *Technologies*, 4(4): 38, (2016).
- [80] J. Sun, L. Qiu, F. Wang, Y. Yang, L. Guo, A new modification effect of eutectic Si in selective laser melted AlSi10Mg, *Materials Science and Technology*, 35(6): 709-715, (2019).
- [81] A. Simchi, The role of particle size on the laser sintering of iron powder, *Metallurgical and Materials Transactions B*, 35(5): 937-948, (2004).
- [82] K. Mumtaz, N. Hopkinson, Top surface and side roughness of Inconel 625 parts processed using selective laser melting, *Rapid Prototyping Journal*, (2009).
- [83] J. P. Kruth, L. Froyen, J. Van Vaerenbergh, P. Mercelis, M. Rombouts, B. Lauwers, Selective laser melting of iron-based powder, *Journal of materials processing technology*, 149(1-3): 616-622, (2004).
- [84] C. Brecher, S. Jeschke, G. Schuh, S. Aghassi, J. Arnoscht, F. Bauhoff, F. Welter, Integrative production technology for high-wage countries, In *Integrative production technology for high-wage countries*, 17-76, (2012).
- [85] F. Calignano, D. Manfredi, E. P. Ambrosio, L. Iuliano, P. Fino, Influence of process parameters on surface roughness of aluminum parts produced by DMLS, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(9): 2743-2751, (2013).
- [86] R. Sharma, S. Kumar, R. Saha, Investigation of Laser Sintered AlSi10Mg Specimens for Density and Surface Roughness, In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 804(1): 012024, (2020).
- [87] L. Z. Wang, S. Wang, J. J. Wu, Experimental investigation on densification behavior and surface roughness of AlSi10Mg powders produced by selective laser melting, *Optics & Laser Technology*, 96, 88-96, (2017).
- [88] L. Hitzler, J. Hirsch, M. Merkel, W. Hall, A. Öchsner, Position dependent surface quality in selective laser melting: Positionsabhängige Oberflächenqualität im selektiven Laserstrahlschmelzen, *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 48(5): 327-334, (2017).
- [89] A. H. Maamoun, Y. F. Xue, M. A. Elbestawi, S. C. Veldhuis, Effect of selective laser melting process parameters on the quality of al alloy parts: Powder characterization, density, surface roughness, and dimensional accuracy, *Materials*, 11(12): 2343, (2018).

- [90] Z. Ç. Öter, Direkt metal lazer sinterleme (DMLS) yöntemi ile 3 boyutlu metal yazıcıda üretilen parçaların yüzey kalitesi, boyutsal hassasiyet ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesi, Doktora Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze, Türkiye, 2021.
- [91] A. Majeed, A. Ahmed, A. Salam M. Z. Sheikh, Surface quality improvement by parameters analysis, optimization and heat treatment of AlSi10Mg parts manufactured by SLM additive manufacturing, *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2(4): 288-295, (2019).