



**BANDIRMA
ONYEDİ EYLÜL
ÜNİVERSİTESİ**

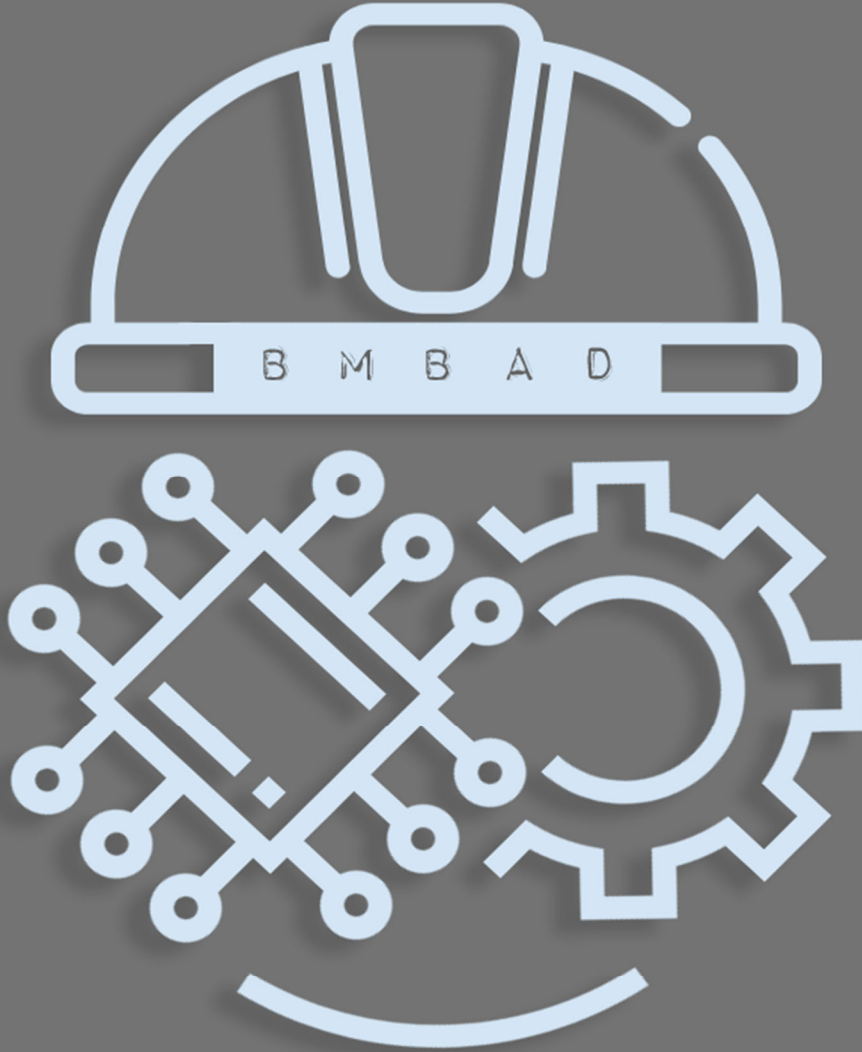
**BMBAD
BJESR**

Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi
Journal of Engineering Sciences and Researches

Cilt/Volume : 4

Sayı/Issue : 1

Yıl/Year : 2022





BMBAD
BJESR

Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi
Journal of Engineering Sciences and Researches



Müh.Bil.ve Araş.Dergisi

Cilt/Vol. 4

Sayı/Issue 1

2022

ISSN: 2687-4415

Sahibi/Owner

Prof.Dr. Süleyman ÖZDEMİR *Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi Rektörü*

Baş Editor /Editor in Chief

Doç.Dr. Muhammet Nuri SEYMAN *Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi*

Yardımcı Editörler/Associate Editors

Doç.Dr. Serhat DUMAN *Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi*

Dr.Öğr. Üyesi Onursal ÇETİN *Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi*

Alan Editörleri/Field Editors

Prof. Dr. Recep ÇALIN (Kırıkkale Üniversitesi) (Makina)

Doç. Dr. Serhat DUMAN (Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi) (Elektrik-Elektronik)

Doç. Dr. Bülent BÜYÜK (Bandırma Onyedi Eylül Üniversite) (Mühendislik Temel Bilimleri)

Doç. Dr. Onur ÜLKER (Eskişehir Teknik Üniversitesi) (Orman)

Dr. Öğr. Üyesi İlyas ÖZER (Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi) (Bilgisayar)

Dr. Öğr. Üyesi Uğur Erdem DOKUZ (Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi) (Yer Bilimleri)

Mizanpaj

Arş. Gör. F. Kebire BARDAK (Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi)

Dil Editörü

Arş. Gör. Muhammed Şamil BALCI (Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi)

Editörler Kurulu/Editorial Board

Prof. Dr. Feyzullah TEMURTAŞ, ftemurtas@bandirma.edu.tr, Bandırma Onyediy Eylül Üniversitesi

Prof.Dr. Mehmet KURBAN, mehmet.kurban@bilecik.edu.tr, Bilecik Şeyh Edibali Üniversitesi

Prof.Dr. Fırat KAÇAR, gkacar@istanbul.edu.tr, İstanbul Cerrahpaşa Üniversitesi

Prof.Dr. Cihan KARAKUZU, cihan.karakuzu@bilecik.edu.tr, Bilecik Şeyh Edibali Üniversitesi

Doç.Dr. Muhammet Nuri SEYMAN, mseyman@bandirma.edu.tr, Bandırma Onyediy Eylül Üniversitesi

Doç.Dr. Gökçe NUR YILMAZ, gokceyilmaz@tedu.edu.tr, TED Üniversitesi

Doç.Dr. Abdullah YEŞİL, ayesil@bandirma.edu.tr, Bandırma Onyediy Eylül Üniversitesi

Doç.Dr.Muharrem PUL, mpul@kku.edu.tr, Kırıkkale Üniversitesi

Dr.Öğr.Üyesi Onursal ÇETİN, ocerin@bandirma.edu.tr, Bandırma Onyediy Eylül Üniversitesi

Dr.Öğr.Üye. Hayri YAMAN, hyaman@kku.edu.tr, Kırıkkale Üniversitesi

Dr.Öğr. Üye. Rahim DEHKHARGHANI, rdehkharghani@bonabu.ac.ir, Computer Eng., Natural Language Processing, and Sentiment Analysis

Behnaz HASSANSHAHİ, behnaz.hassanshahi@oracle.com, Oracle Lab Australia, Computer Eng. Dynamic Analysis and Fuzzing Techniques

Dr.Öğr.Üyesi Ali DURMUŞ, adurmus@kayseri.edu.tr, Kayseri Üniversitesi

Danışma Kurulu/Advisory Board

Prof.Dr. Hasan BAYINDIR, hasanbayindir@dicle.edu.tr, Dicle Üniversitesi

Prof.Dr. Hasan ERBAY, erbay@kku.edu.tr, Kırıkkale Üniversitesi

Prof. Dr. Mustafa GÜNAY, mgunay@karabuk.edu.tr, Karabük Üniversitesi

Prof.Dr. Fırat KAÇAR, gkacar@istanbul.edu.tr, İstanbul Cerrahpaşa Üniversitesi

Prof.Dr. Cihan KARAKUZU, cihan.karakuzu@bilecik.edu.tr, Bilecik Şeyh Edibali Üniversitesi

Prof.Dr. Uğur TEMİZ, ugur.temiz@bozok.edu.tr, Yozgat Bozok Üniversitesi

Prof.Dr. Mehmet KURBAN, mehmet.kurban@bilecik.edu.tr, Bilecik Şeyh Edibali Üniversitesi

Prof.Dr. Osman YILDIZ, osmanyildiz@kku.edu.tr, Kırıkkale Üniversitesi

Prof.Dr. Nejat YUMUŞAK, nyumusak@sakarya.edu.tr, Sakarya Üniversitesi

Prof.Dr. İbrahim DEVELİ, ideveli@erciyes.edu.tr, Erciyes Üniversitesi

Doç.Dr. Adem DALCALI, adalcali@bandirma.edu.tr, Bandırma Onyediy Eylül Üniversitesi

Doç.Dr Sertaç BAYHAN, sbayhan@hbku.edu.qa, Hamad Bin Khalifa University

Doç.Dr Selim ÖNCÜ, soncu@karabuk.edu.tr, karabük Üniversitesi

Doç.Dr. İlker TÜRKER, iturker@karabuk.edu.tr, Karabük Üniversitesi

Doç.Dr. Hasan YAMIK, hasan.yamik@bilecik.edu.tr, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Doç.Dr.Muharrem PUL, mpul@kku.edu.tr, Kırıkkale Üniversitesi

Dr.Öğr.Üye. Ali DURMUŞ, adurmus@kayseri.edu.tr, Kayseri Üniversitesi

Dr. Öğr.Üye. Serhat Berat EFE, Sefe@bandirma.edu.tr, Bandırma Onyedı Eylöl Üniversitesi

Dr. Öğr.Üye. Kenan HATIPOĞLU, kenan.hatipoglu@mail.vwu.edu, West Virginia Area University

Dr. Öğr.Üye. Hayri YAMAN, hyaman@kku.edu.tr, Kırıkkale Üniversitesi

Dr.Öğr. Üye. Rahim DEHKHARGHANI, rdekharghani@bonabu.ac.ir, Computer Eng., Natural Language Processing, and Sentiement Analysis

Behnaz HASSANSHAHİ, behnaz.hassanshahi@oracle.com, Oracle Lab Australia, Computer Eng. Dynamic Analysis and Fuzzing Techniques

Yazıřma Adresi/ Correspondence Address

Bandırma Onyedı Eylöl Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Faköltesi, 10200 Bandırma/ Balıkesir, Türkiye

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/bjesr>

bjesr@bandirma.edu.tr

Tel: 0266 717 0117 (3512)

Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi hakemli uluslararası bir dergidir/ Journal of Engineering Sciences and Researches is a peer-reviewed international journal

İÇİNDEKİLER/CONTENTS

(Araştırma Makalesi/Research Article)

Deniz Üstü Rüzgar Enerji Santrali Projelerinde Ülke Uygulamalarının İncelenmesi ve Türkiye İçin Öneriler
Investigation of Country Practices in Offshore Wind Power Plant Projects and Recommendations for Turkey

1-21

Gökay KÜTÜKCÜ, Mehmet YALILI

(Araştırma Makalesi/Research Article)

Öğütülmüş Taneli Yüksek Fırın Cürüflü Kütle Betonlarında Sıcaklık Artışı ve Dayanım Gelişmesi Üzerine Bir
Vaka Araştırması

*A Case Study on Temperature Rise and Strength Development in Ground Granulated Blast Furnace Slag Mass
Concretes*

22-34

Kambiz RAMYAR, Nuri HARTA , Berna KOLUKISA

(Araştırma Makalesi/Research Article)

Hava Kirliliğinin Makine Öğrenmesi Tabanlı Tahmini: Başakşehir Örneği

Prediction of Air Pollution based on Machine Learning Methods: A Case Study for Başakşehir, İstanbul

35-44

Sibel ÜNALDI , Nesibe YALÇIN

(Araştırma Makalesi/Research Article)

Modelling and Control of Single-Phase Bidirectional AC/DC Converter Used in Microgrid Energy Systems
*Mikroşebeke Enerji Sistemlerinde Kullanılan Tek Fazlı İki Yönlü AC/DC Dönüştürücünün Modellenmesi ve
Kontrolü*

45-53

Evren İSEN

(Araştırma Makalesi/Research Article)

Performance Investigation of Bidirectional Hybrid Long-Haul Optical IM/DD OFDM WDM-PON Using
OOK-RSOA Remodulation

*OOK-RSOA Modülasyonunu Kullanan Çift Yönlü Karma Optik IM/DD OFDM WDM-PON Sisteminin
Performansının İncelenmesi*

54-61

Mahmoud ALHALABI , Necmi TAŞPINAR

Kuru Üzüm Tanelerinin Sınıflandırılması için Hibrit Bir Yaklaşım

A Hybrid Approach for Raisin Grains Classification

62-71

Serhat KILIÇARSLAN

Almanpınarı (Osmaniye) Killerinin Yapı Malzemesi Olarak Kullanımına Bir Yaklaşım

An Approach to the Usage of Almanpınarı (Osmaniye) Clays as Building Materials

72-79

Pınar KOÇHAN, Cihan YALÇIN, Yusuf URAS

Bilgisayarlı Görü Teknikleri Kullanılarak Yapay Zeka Temelli Limon Ağacı Rekolte Tahmini

Artificial Intellicence Based Prediction of Lemon Tree Yield Using Computer Vision Technique

80-88

Yalçın IŞIK, Mücahit ÜNAY, Ahmet KAYABAŞI

Predictive Maintenance Based On Machine Learning In Public Transportation Vehicles

Toplu Taşıma Araçlarında Makine Öğrenmesine Dayalı Kestirimci Bakım

89-98

Özlem GÜVEN, Hasan ŞAHİN



Deniz Üstü Rüzgar Enerji Santrali Projelerinde Ülke Uygulamalarının İncelenmesi ve Türkiye İçin Öneriler

Investigation of Country Practices in Offshore Wind Power Plant Projects and Recommendations for Turkey

¹Gökay KÜTÜKCÜ , ²Mehmet YALILI 

^{1,2}Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, 06510, Çankaya/Ankara, Türkiye

¹gkutukcu@epdk.gov.tr, ²myalili@epdk.gov.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

ARTICLE INFO

Article history

Received : 03 November 2021
Accepted : 26 November 2021

Keywords:

Wind Energy, Offshore Wind Power Plant, YEKA Auction, Renewable Energy

ABSTRACT

In this study, the practices and experiences of the United Kingdom, Germany, the Netherlands, Belgium, Denmark and China, which are the six leading countries in the world in terms of the installation of offshore wind power plants (WPPs), were examined. Policy documents regarding offshore WPP projects, the legal procedures carried out during the realization of the projects, the institutions and organizations taken part in the project development phase and the support mechanisms applied in these countries are explained. The practices of the selected countries were examined comparatively from the regulatory perspective and the applicability of best practices in Turkey was evaluated. Various suggestions have been made regarding the steps to be taken in the upcoming period for the establishment of an offshore WPP in Turkey based on an assessment of the current status and studies conducted so far regarding offshore WPP projects in Turkey.

© 2022 Bandırma Onyedü Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Science. Published by Dergi Park. All rights reserved.

MAKALE BİLGİSİ

Makale Tarihleri

Gönderim : 03 Kasım 2021
Kabul : 26 Kasım 2021

Anahtar Kelimeler:

Rüzgâr Enerjisi, Deniz Üstü Rüzgâr Enerji Santrali, YEKA İhalesi, Yenilenebilir Enerji

ÖZET

Bu çalışmada, dünyada deniz üstü rüzgâr enerji santrallerinin (RES) kurulumu bakımından önde gelen altı ülke olan Birleşik Krallık, Almanya, Hollanda, Belçika, Danimarka ve Çin'in uygulama ve tecrübeleri incelenmiştir. Deniz üstü RES projelerine ilişkin politika belgeleri, projelerin kurulumu esnasında yürütülen yasal prosedürler, proje geliştirme aşamasında hangi kurum ve kuruluşların görev aldığı ve bu ülkelerde uygulanan destekleme mekanizmaları açıklanmıştır. Seçilen ülkelerin uygulamaları düzenleme bakış açısıyla karşılaştırmalı biçimde incelenmiş ve iyi uygulama örneklerinin Türkiye'de uygulanabilirliği değerlendirilmiştir. Türkiye'de deniz üstü RES projelerine ilişkin mevcut durum ve yapılan çalışmalar değerlendirilerek Türkiye'de deniz üstü rüzgâr santrali kurulumu için önümüzdeki süreçte atılması gerekli adımlara ilişkin çeşitli önerilerde bulunulmuştur.

© 2022 Bandırma Onyedü Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi. Dergi Park tarafından yayınlanmaktadır. Tüm Hakları Saklıdır.

ORCID ID: ¹0000-0002-9761-0758
²0000-0002-6636-833X

1. GİRİŞ

Fosil enerji kaynaklarının sera gazı salımı nedeniyle çevreye olumsuz etkileri bulunmakta ve küresel ısınma ile iklim değişikliğine yol açmaktadır. Bu bakımdan fosil enerji kaynaklarına alternatif olarak temiz, çevre dostu ve sürdürülebilir enerji kaynakları olan yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretiminde kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları ayrıca sunduğu kaynak çeşitliliği imkânı ile enerjide dışa bağımlılığın azaltılarak enerji arz güvenliğinin sağlanması açısından da büyük öneme sahiptir. Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde hidrolik, rüzgâr ve güneş enerjisine dayalı üretim tesisleri önde gelmektedir. Rüzgâr enerjisi kapsamında inceleme yapmak gerekirse; elektrik enerjisi üretimi için istenen hızdaki ve formdaki rüzgâr enerjisinin sadece kara üzerinde değil deniz, okyanus gibi büyük su kütleleri üzerinde de sağlanabileceğinin anlaşılmasıyla rüzgâr enerjisine dayalı üretim tesisleri kara üzerinden sonra denizler üzerinde de inşa edilmeye başlanmıştır.

Öncelikle kara üzerinde kurulumuna başlanan rüzgâr enerji santralleri, rüzgâr formunun deniz üzerinde de bu tesislerin kurulumu için uygun olduğunun anlaşılmasıyla son 30 yıldır deniz üzerinde de kurulmaya başlanmıştır. Bu kurulu gücün çok büyük bir kısmı ise Birleşik Krallık, Almanya, Danimarka, Belçika, Hollanda ve Çin’de bulunmaktadır. Bu ülkelere ilave olarak, Türkiye de dâhil olmak üzere denize kıyısı olan ve deniz üstü rüzgâr santralleri kurulumu için uygun şartları sağlayan birçok ülke bu projelerin kurulumu için çalışma yapmaktadır [1].

Türkiye’de deniz üstü RES kurulumu amacıyla atılan en somut adım 2018 yılında Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından duyurusu yapılan ancak katılım olmadığı için ertelenen 1,2 GW kurulu gücündeki deniz üstü RES yarışma ilanındır [2].

Türkiye’de deniz üstü rüzgâr enerjisi ve deniz üstü RES projeleri kapsamında yapılan literatür incelemesinde, bu konuları irdeleyen çalışmalar bulunmakla birlikte, Türkiye’de deniz üstü RES projelerinin hâlihazırda uygulamasının bulunmaması sebebiyle çok fazla çalışma olmadığı görülmüştür.

Emeksiz ve Demirci (2019), hibrit alan seçimi metodu olarak adlandırılan metodu kullanarak 31 farklı kıyı bölgesinde deniz üstü RES potansiyeli üzerine çalışma yapmıştır. Yapılan çalışmada, 9 farklı bölgenin (Gökçeada, Bozcaada, Bandırma, Antalya, Mersin, Karasu, Bafra, İnebolu ve Sinop) deniz üstü RES projelerinin kurulumu için uygun olduğu tespit edilmiştir [3].

Argin ve arkadaşları (2018), Türkiye’nin deniz üstü RES potansiyeli hakkında benzer bir çalışma yaparak 55 farklı kıyı bölgesinde inceleme yapmıştır. Bu bölgelerde ortalama rüzgâr hızı, deniz tabanı ve sahanın uygunluğuna ilişkin yapılan çalışmada 11 farklı bölgenin deniz üstü RES projeleri için uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu bölgelerin toplam deniz üstü RES potansiyeli 1.629 MW olarak hesaplanmıştır [4].

Tortumluoğlu ve Doğan (2021), deniz üstü RES sahalarının seçimi için saha belirleme kriterleri ile deniz üstü RES projelerinin Kuzey Ege kıyılarına uygulanmasını incelemiştir. Gökçeada, Bozcaada, Çanakkale ve Ayvacık bölgeleri için uygulama yapılan çalışmada Kuzey Ege civarının deniz üstü RES projeleri için en uygun alan olduğu sonucuna ulaşılmıştır [5].

Koroğlu ve Ülgen (2018) tarafından Çanakkale ili, Gülpınar mevki, Tuzla Çayı açıklarında yer alan kıyı şeridinde, 100 MW kurulu gücünde bir deniz üstü RES projesi kurulması için gereken aşamalar ve bu tesisin üretilen enerjinin, aynı güçteki karasal RES projesiyle karşılaştırılması ve deniz üstü RES’in Çanakkale ilindeki ulusal şebekeye bağlantı şekli hakkında çalışma yapılmıştır [6].

Gülay (2019) tarafından hazırlanan yüksek lisans tez çalışmasında Gaziköy ve Gökçeada bölgesinde deniz üstü RES potansiyeli üzerine inceleme yapılmış, 5-30 metre su derinliğinde, tekil kazık temeller kullanılarak yapılan uygulama çalışmasında Gaziköy bölgesinde ortalama rüzgâr hızının Gökçeada’ya göre daha yüksek olmasına rağmen, Gaziköy bölgesinde deprem riski ve deniz trafiği gibi sebeplerle proje uygulanabilirliğinin Gökçeada’ya göre daha az uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır [7].

Özdilim (2017) tarafından yapılan yüksek lisans çalışmasında, Bozcaada bölgesinde 300 MW kurulu gücünde bir deniz üstü RES projesinin ekonomik analizi yapılmıştır [8].

Huvaj ve arkadaşları (2019) tarafından yapılan çalışmada deniz üstü rüzgâr türbinlerinde kullanılan temel tipleri ve deniz tabanı zemin araştırmaları incelenmiş, deniz tabanı zemin araştırmalarında kullanılan uluslararası standartlar belirtilerek zemin araştırmalarında kullanılan yöntemler ve teknikler hakkında bilgi verilmiştir [9].

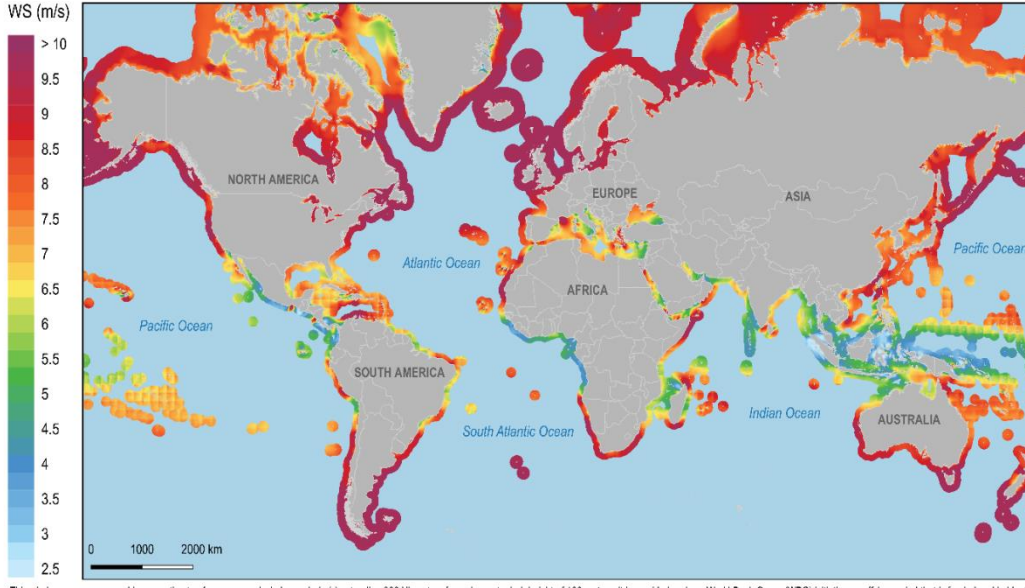
Çalışma kapsamında öncelikle deniz üstü RES projelerinin mevcut durumu analiz edilerek, bu projelerde önemli yatırımlar yaparak hâlihazırdaki kurulu gücün büyük çoğunluğuna sahip ülkeler incelenmiştir. Söz konusu ülkelerde deniz üstü RES projeleri ile ilgili güncel mevzuat, uygulanan izin onay süreçleri, bu projelerin yönetimi sürecindeki sorumlu kuruluşlar ve ülkelerde uygulanan destekleme mekanizmaları detaylı olarak incelenmiştir. Sonrasında Türkiye’de deniz üstü RES projeleri kapsamında yapılan çalışmalardan bahsedilerek Türkiye için deniz üstü RES projeleri ile ilgili önerilerde bulunulmuştur.

Literatürde yer alan çalışmaların birçoğunda daha çok belirli bölgelerde kapasite analizi yapıldığı, deniz üstü RES projelerine ilişkin mevzuat düzenlemeleri ile ilgili olarak çalışma yapılmadığı görülmektedir. Bu çalışmada ise deniz üstü RES projeleri düzenleyici işlemler yönünden ele alınarak uluslararası raporlar, yayımlanan makale ve kitaplar ve ülkelerin politika belgeleri ile resmi kuruluşlarının internet sitelerinde yapılan incelemelerle bu ülkelerde deniz üstü RES projelerinin mevcut durumu bütün yönleriyle ele alınmıştır. Daha sonra Türkiye için deniz üstü RES projesi geliştirme sürecinde düzenleyici işlemlerin nasıl olması gerektiğine ilişkin önerilerde bulunulmuştur. Yapılan öneriler, ülke örneklerinin incelenmesi neticesinde elde edilen bulgular ve ülkedeki

güncel mevzuat göz önüne alınarak projelerin ön hazırlık aşamasından başlayarak, izin onay süreçleri ve uygulanması önerilen destekleme mekanizmaları da dâhil çok yönlü olarak ele alınmıştır.

2. DENİZ ÜSTÜ RES PROJELERİNİN MEVCUT DURUMU

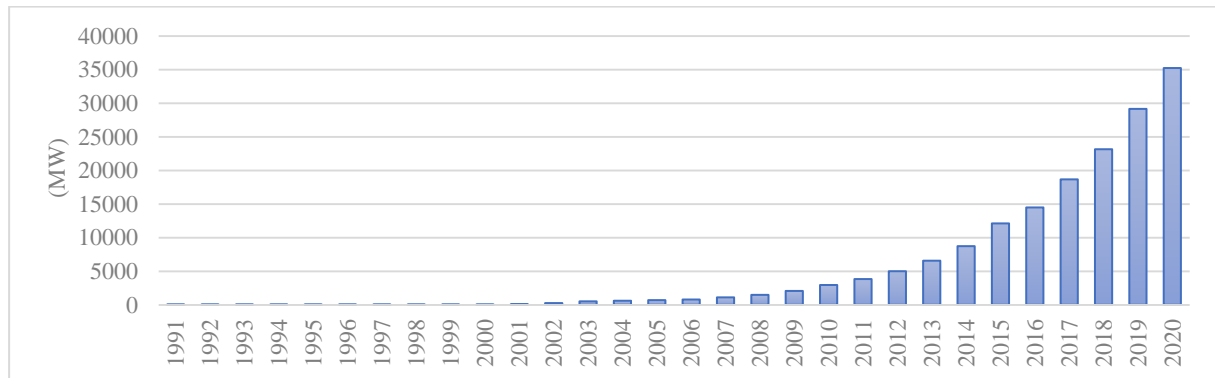
Deniz üstü RES projelerinin mevcut durumu açıklanırken öncelikle Dünya Bankası tarafından hazırlanan ve küresel ölçekte kara suları üzerindeki rüzgâr hızı ölçümlerini gösteren atlardan bahsetmek gerekmektedir. Söz konusu atlas, Dünya Bankası Enerji Sektör Yönetimi Destek Programı (ESMAP) tarafından oluşturulmuştur. Rüzgâr ölçüm verileri kıydan 200 km mesafeye kadar olan deniz sahaları üzerinde ve deniz seviyesinden 100 metre yükseklikteki alanda oluşturulmuştur. Oluşturulan atlasta, Çin'in doğu kıyıları, Kuzey Avrupa kıyıları, Kuzey Amerika'nın doğu ve batı kıyıları ile Güney Amerika'nın güney kıyıların deniz üstü RES projelerinin kurulumu için verimli alanlar olduğu söylenebilir. Söz konusu atlas verileri ile oluşturulan toplam teorik deniz üstü RES kapasitesi ise 15.600 GW olarak hesaplanmıştır [1].



Şekil 1. Dünya Bankası tarafından hazırlanan deniz üstü rüzgâr atlası [1].

Ayrıca Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) verilerine göre de kıydan 60 km mesafeye ve 60 metre su derinliğine kadar deniz üzerindeki rüzgâr enerjisinden elde edilebilecek teorik elektrik enerjisi miktarı yıllık 36.000 TWh olarak hesaplanmıştır. 2019 yılı itibarıyla küresel elektrik enerjisi tüketiminin 23.000 TWh olduğu göz önüne alındığında sadece kıydan 60 km mesafeye kadar olan bölümdeki enerji üretimi bile küresel tüketimin 1,5 katı olmaktadır [2].

Rüzgâr enerjisinden elektrik enerjisi elde etme çalışmaları neticesinde dünyanın ilk deniz üstü RES projesi 1991 yılında Danimarka'nın Vindeby şehri kıyısında işletmeye alınmıştır. İşletmeye alınan ilk deniz üstü RES projesi her ne kadar 1991 yılında faaliyete başlamışsa da 90'lı yıllar boyunca deniz üstü RES kurulumu bakımından kayda değer bir gelişme yaşanmamış; kurulumdaki asıl artış 2000'li yıllara gelindiğinde başlamıştır. Bu yıllarda ise Kuzey Denizi'nin güney bölgesi, İrlanda Denizi ve Baltık Denizi'nde deniz üstü RES projeleri geliştirilmiştir [3]. Bu denizler üzerinde ortalama rüzgâr hızının 8 m/s'nin üzerinde olması ve deniz derinliklerinin ortalama 50 metrenin altında olması bakımından bu alanlar deniz üstü RES projeleri için uygun deniz sahaları olarak değerlendirilmektedir. 7 m/s ve üzerinde ortalama rüzgâr hızına sahip bölgeler hem karasal hem de deniz üstü RES projeleri için verimli alanlar olarak değerlendirilmektedir [3].



Şekil 2. Deniz üstü RES projelerinin tarihsel gelişimi [4].

Şekil 2’de ilk deniz üstü RES projesinin kurulumunun yapıldığı 1991 yılından 2020 yıl sonuna kadar küresel deniz üstü RES kurulu gücünün gelişimi gösterilmiştir. Kurulu güçte önemli düzeyde artış 2010’lu yıllardan itibaren görülmeye başlanmış ve son on yılda kurulu güç on kat artış göstererek 2020 yıl sonu itibarıyla 35.219 MW kurulu güce ulaşılmıştır.

Toplam kurulu güç bakımından inceleme yapıldığında (Tablo 1); 2020 yıl sonu itibarıyla toplam deniz üstü RES kurulu gücü 35.219 MW seviyesine ulaşmıştır. Kurulu güç üzerinden inceleme yapılırsa Birleşik Krallık toplam 10.206 MW kurulu güç ile en yüksek kurulu güce sahip ülke, Çin toplam 9.996 MW kurulu güce ulaşarak ikinci, Almanya 7.728 MW kurulu güç ile üçüncü sırada yer almaktadır. Ayrıca Belçika, Danimarka ve Hollanda deniz üstü RES santralleri bakımından dünyada söz sahibi ülkelerdendir. Bu ülkelerin dışında 2020 yıl sonu itibarıyla; İsveç (192 MW), Tayvan (128 MW), Vietnam (99 MW), Japonya (85 MW), Güney Kore (136 MW), Finlandiya (71 MW), ABD (42 MW), İrlanda (25 MW), İspanya (5 MW), Norveç (2 MW), Fransa (2 MW) olmak üzere toplam 17 ülke deniz üstü RES kurulu gücüne sahiptir [4, 5].

Tablo 1. Toplam deniz üstü RES kurulu gücü [4].

Ülke	2019 yılı eklenen kapasite (MW)	2019 yılsonu toplam kapasite (MW)	2020 yılı eklenen kapasite (MW)	2020 yılsonu toplam kapasite (MW)
Birleşik Krallık	1.764	9.723	483	10.206
Çin	2.395	6.838	3.060	9.996
Almanya	1.111	7.493	237	7.728
Hollanda	0	1.118	1.493	2.611
Belçika	370	1.556	706	2.262
Danimarka	374	1.703	0	1.703
Güney Kore	0	73	60	136
ABD	0	30	12	42
Diğer	131	602	17	619
TOPLAM	6.145	29.136	6.068	35.219

Deniz üstü RES projelerinin önümüzdeki yıllarda, başka ülkelerde de yeni pazarlar edinmesi beklenmektedir. Sadece ABD’de uzun dönemde 25 GW deniz üstü RES projesinin hayata geçirilmesi planlanmaktadır. Türkiye’nin de içinde bulunduğu Avustralya, Çin Taipei, Hindistan, Vietnam, Yeni Zelanda ve Güney Kore gibi ülkelerde büyük çaplı deniz üstü RES projelerinin kurulması planlanmaktadır [6].

3. AVRUPA’DA DENİZ ÜSTÜ RES PROJELERİ

Bu bölümde öncelikle deniz üstü RES projelerinin Avrupa ülkelerinde gelişimine ilişkin inceleme yapılmıştır. Söz konusu inceleme genel olarak deniz üstü RES projelerinin Avrupa’da gelişimi, mevcut durumu, gelecek öngörülere, lisanslama, izin, onay süreçlerini kapsayan düzenleyici hükümler, süreçlerdeki düzenleyici kuruluşlar ile uygulanan destekleme mekanizmalarının irdelenmesi kapsamında gerçekleştirilmiştir.

Deniz üstü RES projelerinin diğer yenilenebilir enerji kaynaklarıyla birlikte Avrupa’da gelişiminde ele alınması gereken en önemli noktayı çevre sorunları oluşturmaktadır. Kyoto Protokolü (1998), Paris Anlaşması (2015) gibi uluslararası anlaşmaların ve Avrupa Birliği’nin bu konudaki çabaları sonucu bir dizi düzenleyici belge oluşturulmuştur. 2018/2001 numaralı Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Desteklenmesi Direktifi, 2030 yılına kadar toplam elektrik enerjisi üretiminin en az %32’sinin yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanması amacıyla AB üyesi ülkelere zorunlu hedefler tanımlamıştır. Bu direktif ile ülkelerin belirlenen hedefi yakalayabilmek amacıyla kendi “Milli Yenilenebilir Enerji Eylem Planı”nı oluşturarak yenilenebilir enerji kaynaklarını etkin bir şekilde kullanmaları gerekmektedir. Bu direktif ile Avrupa’da rüzgâr enerjisinin bu hedefi gerçekleştirmede önemli bir yere sahip olduğu anlaşılmıştır.

Avrupa Birliği tarafından deniz üstü RES projeleri kapsamında en güncel strateji belgesi “Temiz İklim Geleceği için Deniz Üstü Rüzgâr Enerji Potansiyelinden Yararlanmaya Yönelik AB Stratejisi (An EU Strategy to harness the potential of offshore renewable energy for a climate neutral future)” olarak adlandırılan belgedir. Bu strateji belgesi ile AB’nin 2050 itibarıyla iklim-nötr olma hedefi doğrultusunda, Avrupa’nın deniz üstü rüzgâr kapasitesinin 2030’da en az 60 GW’a, 2050’de ise 300 GW’a çıkartılması önerilmektedir.

Yukarıda bahsedilen temel hedefler doğrultusunda gelişimi başlayan yenilenebilir enerji projeleri içerisinde deniz üstü RES projelerini de ilgilendiren bir dizi yasal düzenleme yapılmıştır. Tablo 2’de sunulan temel mevzuat direkt olarak deniz üstü RES projelerini ilgilendirdiği gibi, elektrik üretim, iletim ve dağıtım sistemleriyle ilgili de olabilmektedir. Mevzuat hükümlerinin incelenmesi neticesinde, Avrupa’da deniz üzerinde mekânsal planlama ve çevresel analiz çalışmalarının yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmalar, herhangi bir deniz

sahasında deniz üstü RES projesi geliştirilmek istendiği takdirde yürütülmesi zorunlu olan çalışmalar içerisinde yer almaktadır.

Tablo 2. Avrupa Birliği deniz üstü RES mevzuatı.

Deniz Üstü RES Planlama	Şebeke Bağlantısı Yatırımı/İnşası	Proje İşletme
<ul style="list-style-type: none"> • EIA Directive (ÇED Kanunu) • Strategic EIA Directive (Stratejik ÇED Kanunu) • Maritime Spatial Planning Directive (Denizde Mekânsal Planlama Kanunu) • Marine Strategy Framework Directive (Deniz Stratejisi Çerçeve Kanunu) • Habitats and Birds Directive (Habitat ve Kuşlar Kanunu) 	<ul style="list-style-type: none"> • Trans-European Electricity Network Regulation (<i>Trans Avrupa Ağı Düzenlemesi</i>) • Notification of Investment Projects in Energy Infrastructure (<i>Enerji Altyapısındaki Yatırım Projelerinin Bildirimi</i>) • Inter-TSO Compensation monitoring (<i>İletim Sistemi İşletmecileri kompanzasyon mekanizması</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> • Network Code on Requirements for Grid Connection (<i>Şebeke Bağlantısı Gereksinimleriyle İlgili Ağ Kodu</i>) • NC on HVDC Grid Connection (<i>Doğru Akım Yüksek Voltaj Şebeke Bağlantısı</i>) • Capacity Allocation & Congestion Management (<i>Kapasite Tahsisi ve Kısıt Yönetimi</i>) • NC on Forward Capacity Allocation (<i>İleri Dönem Kapasite Tahsisi</i>)

Avrupa Kıtası'nda deniz üstü RES projelerinin geliştirildiği denizlere ilişkin yapılan incelemede Kuzey Denizi, Baltık Denizi ve İrlanda Denizi'nin ön plana çıktığı görülmektedir. Geliştirilen projeler bu üç denizde inşa edilmektedir. Bu denizler içerisinde Kuzey Denizi'ne ayrı bir parantez açılması gerektiği değerlendirilmektedir. 2020 yıl sonu kurulu güç dağılımına göre Avrupa'daki kurulu gücün %79'unu oluşturan santrallerin (19.833 MW) Kuzey Denizi'nde inşa edildiği görülmektedir [7]. Batısında İngiltere, kuzey doğusunda Norveç, doğusunda Danimarka, güney doğusunda Almanya ve Hollanda, güneyinde ise Fransa ve Belçika bulunan deniz birçok Avrupa ülkesiyle sınır konumundadır.

Kuzey denizini, deniz üstü RES projeleri için bu kadar uygun yapan en temel özellik ortalama derinliği ve deniz tabanının uygun oluşudur. Kuzey denizinin orta ve güney kesimlerinde ortalama su derinliği 35 metrenin altındadır.

3.1. Birleşik Krallık

Birleşik Krallık'ta 2000 yılında başlayan deniz üstü RES projeleri çalışmalarında, 2020 yıl sonu itibarıyla Birleşik Krallık deniz üstü RES kurulu kapasite bakımından dünyanın en yüksek kurulu gücüne sahip ülkesi konumuna gelmiştir. Küresel Rüzgâr Enerjisi Kurulu'nun (Global Wind Energy Council (GWEC)) 2020 Küresel Rüzgâr raporuna göre 2020 yıl sonu itibarıyla, Birleşik Krallık'ın deniz üstü rüzgâr kaynağına dayalı kurulu gücü 10.206 MW olmuştur. Deniz üstü RES santrallerinden üretilen elektrik enerjisi miktarı, Birleşik Krallık toplam elektrik enerjisi üretiminin yaklaşık olarak %10'una denk gelmektedir. [8].



Şekil 3. 1200 MW kapasite ile kurulu güç bakımından işletmedeki en büyük proje-Hornsea I [9].

Deniz üstü RES projelerinin lisanslama süreçleriyle ilgili olarak; Birleşik Krallık Gaz ve Elektrik Kurumu'ndan (*Office of Gas and Electricity Markets (OFGEM)*) bahsetmek gerekmektedir. 1980'li yıllardan sonra

özelleşmeye başlayan Birleşik Krallık enerji piyasasında bağımsız düzenleyici kuruluş olarak kurulan OFGEM elektrik piyasasında dağıtım ve iletim şebekesi işletmecilerinin, enterkonnekte şebeke işletmecilerinin, elektrik üretim tesislerinin lisanslamasından sorumludur [10].

Birleşik Krallık'ta deniz üzerindeki faaliyetlere ilişkin izin, onay ve lisanslama süreçlerini yöneten kuruluş Denizcilik Yönetim Teşkilatı'dır (Marine Management Organization (MMO)). 2009 yılında yürürlüğe giren Denizcilik ve Kıyı Erişimi Kanunu (Marine and Coastal Act) çerçevesinde; 2005 yılında kurulan Denizcilik ve Balıkçılık Ajansı'nın (Marine and Fisheries Agency) yeniden yapılandırılmasıyla 2010 yılında kurulan MMO, Birleşik Krallık karasuları içerisinde denizcilik ile ilgili faaliyetlerin düzenlenmesinden ve denizlerin korunmasından sorumlu düzenleyici otoritedir [11]. Deniz içerisine yapılan inşaa faaliyetleri, deniz tabanında yapılan tarama faaliyetleri, deniz içerisinde yer alan batıkları çıkarma faaliyetleri için MMO'dan Denizcilik ve Kıyı Erişimi Kanunu çerçevesinde "denizcilik lisansı" alma zorunluluğu bulunmaktadır. Deniz üstü RES projeleri de deniz içerisinde yapılan inşaa faaliyetleri tanımı içerisine girdiği için söz konusu projeler için MMO'dan "denizcilik lisansı" alma zorunluluğu bulunmaktadır. MMO, kıyıda 200 deniz mili uzunluğuna kadar deniz sahalarına ilişkin yetkili kuruluştur. Bu deniz sahaları dışındaki alanlarda Birleşik Krallık tarafından ilan edilen münhasır ekonomik bölgeler çerçevesinde denizcilik ile ilgili faaliyetler yürütülmektedir [12].

MMO'ya yapılan denizcilik lisansı başvurusunda; çevresel etki analizi, doğal ortam düzenleme değerlendirme, deniz koruma alanları değerlendirme, deniz planlama değerlendirme, Su Çerçevesi Direktif Değerlendirme (Water Framework Directive Assessment) ve Atık Çerçevesi Değerlendirme (Waste Framework Assessment) başlıklarında değerlendirme yapılır ve değerlendirme sonucunda uygun bulunması halinde "denizcilik lisansı" verilir [13].

Denizcilik lisansı için başvuru yapılan alanda veya deniz sahasıyla birlikte etkilenen karasal alanda Birleşik Krallık veya Avrupa Birliği tarafından koruma altına alınmış deniz canlısı türlerinin olduğunun tespit edilmesi halinde, MMO tarafından verilen "Yaban Hayatı Lisansı (Wildlife Licence)" alınması zorunluluğu bulunmaktadır.

MMO tarafından verilen denizcilik lisansından sonra, başvuruda bulunulması gereken ilgili bir diğer kuruluş ise The Crown Estate'dir. The Crown Estate Şirketi, Birleşik Krallık'ta Britanya monarkına ait mülkün ticari bir meta olarak işletilmesinden sorumlu kuruluştur. Ticari meta olarak işletilen mülk, monarkın kişisel mülkünü içermemektedir. Esasen bu şirket bir nevi varlık yönetim fonudur. Britanya karasuları üzerinde deniz tabanının mülkiyeti ile kömür, petrol ve doğal gaz haricinde Birleşik Krallık'ın kıta sahanlığı içerisinde her türlü keşif ve kullanım hakkı Crown Estate Şirketi'ne aittir [14].

Deniz üstü RES projeleri bakımından Crown Estate Şirketi'nin iki önemli rolü bulunmaktadır. Birincisi, deniz üstü RES projeleri ile ilgili olarak deniz tabanı ile ilgili çalışma yapılabilmesi için Crown Estate Şirketi tarafından sağlanan "Deniz tabanı araştırma lisansı (Seabed Survey Licence)" alınmalıdır. Bu lisans deniz tabanı ile ilgili olmak üzere jeofizik, ekolojik, meteorolojik çalışmalar ile deniz tabanında yapılacak arkeolojik çalışmalar kapsamında verilen belirli süreli (maksimum 12 ay) izin belgesidir [15].

Crown Estate Şirketi'nin deniz üstü RES projelerindeki bir diğer rolü ise belirlenen alanların kira ücretlerinin toplanmasıdır. Britanya Krallığının mülkü kabul edilen denizlerde kurulan bu üretim tesislerinin denizleri kiralama ücretleri bu şirkete ödenmektedir. Crown Estate tarafından belirlenen alanlarda kiralama süresi 22 yıl olarak tanımlanmaktadır ve belirtilen kiralama sözleşmeleri; inşaa faaliyeti kapsamında yüklenici firmanın yükümlülüklerini, projenin tamamlanma çizelgesini, lisansında belirtilen kapasitenin kurulumu ve bu kapasitenin sağlanması yükümlülüğünü, projenin sigorta koşullarını, kiralama sağlanan şirketin kira yükümlülüğü kapsamındaki mali yeterliliğini ve kullanım ömrünü tamamlayan türbinlerin kaldırılması koşullarını içermektedir. [14].

Kapasite tahsis süreçlerinden ayrı olarak Birleşik Krallık tarafından deniz üstü RES projelerini destekleme mekanizması olarak fark sözleşmesi (contract for difference (CfD)) modelinin uygulandığı görülmektedir. CfD modeli esas olarak Birleşik Krallık'ta 2013 yılında gerçekleşen Elektrik Piyasası Reformu çerçevesinde düşük karbon emisyonlu üretim tesislerinin teşvik edilmesi amacıyla geliştirilmiş bir mekanizmadır. Oluşturulan model ile düşük karbon emisyonu yaratan üreticiler ile devlet tarafından kurulmuş bir şirket olan "Low Carbon Contract Company (LCCC)" arasında özel hukuka dayalı ikili bir sözleşme mekanizması oluşturulmuştur [16]. Sözleşme, üreticilere 15 yıllık bir süre boyunca CfD'nin kullanım fiyatı ile piyasa referans fiyatı arasındaki farkı ödeyerek sabit bir fiyat sunmaktadır. Piyasa fiyatı CfD fiyatının üzerindeyse, üreticilerin farkı LCCC'ye ödemesi gerekir ve bu daha sonra elektrik tedarikçileri aracılığıyla tüketicilere aktarılır, tam tersi durumda ise LCCC şirketi üreticilere ödeme yapar [16].

Birleşik Krallık deniz üstü RES projeleri için ilk CfD ihale sonuçları, 2019 yılına kadar işletmeye girmesi planlanan projeler için 114 £/MWh (15,72 ABD Doları cent/kWh¹) ile 120 £/MWh (16,54 ABD Doları cent/kWh) olarak oluşmuştur. İkinci CfD ihale sonuçları, 2023 yılına kadar işletmeye girmesi planlanan projeler için fiyatlar 57 £/MWh (7,86 ABD Doları cent/kWh) ile 75 £/MWh (10,34 ABD Doları cent/kWh) şeklinde oluşmuştur ve önceki yarışmadan bu yana anlamlı bir azalma göstermiştir. Üçüncü CfD kapasite tahsis yarışması, deniz üstü RES projeleri için rekor düşük fiyatlar ile sonuçlanmış olup 2023/2024 ve 2024/2025

¹ Çapraz kur hesaplamaları 25/10/2021 tarihli Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası döviz satış kurları üzerinden hesaplanmıştır.

yıllarında işletmeye girmesi planlanan projeler için sırasıyla 39,65 £/MWh (5,46 ABD Doları cent/kWh) ve 41,61 £/MWh (5,74 ABD Doları cent/kWh) şeklinde fiyatlar oluşmuştur [17].

Birleşik Krallık'ta deniz üstü RES projeleri ile ilgili olarak ele alınacak bir diğer konu da söz konusu projelerin çevresel ve sosyal etkilerinin incelenmesidir. Çevresel etkiler toplu olarak ele alınmakla birlikte deniz içerisindeki çevresel etkiler projelerin doğası gereği daha önemlidir. Öncelikle Birleşik Krallık tarafından deniz üstü RES projesi kurulmasının yasaklandığı alanları ifade etmek gerekir. Bu alanlar; gemi güzergâhları, doğal gaz ve petrol boru hattı güzergâhları, elektrik ve telekomünikasyon kablolarının olduğu alanlar, kum çıkarma alanları ile doğal gaz ve petrol sahalarıdır [14].

Projelerin çevresel etkileri ile ilgili olarak; deniz üzerine inşa edilen bütün yenilenebilir enerji projelerinde çevresel etki değerlendirmesi (ÇED) sürecinin yürütülmesi ve deniz üzerinde risk değerlendirmesi yapılması zorunluluğu bulunmaktadır. Bu iki süreçte; deniz tabanındaki tortul kayaçlar, kuş nüfus yoğunluğu, oluşacak titreşim ve manyetik alanın balıklar ve deniz memelileri üzerine etkileri, mimari ve tarihi kalıntılar ile kültürel miras niteliğindeki yapılarla olumsuz etkilerin olup olmadığı analiz edilmektedir [14]. Bu etkiler üzerinde en fazla önem gösterilen konu ise Birleşik Krallık'ta önemli bir ekonomik büyüklüğe sahip olan balıkçılık faaliyetidir. Bu sebeple projelerin balık popülasyonuna olumsuz etkilerine önem verilmektedir. Genel olarak deniz üstü RES projelerinin balık popülasyonuna olumsuz etkilerinin olmadığı gözlemlenmiştir. Özellikle deniz üstü RES projelerinin olduğu sahalarda denizcilik faaliyeti yapılmadığı için bu bölgelerde popülasyon artışı bile gözlemlenmemektedir. Bunun yanında deniz altındaki altyapı elamanlarının balıkların göç rotalarında yol bulmalarını olumsuz etkilediği söylenebilir [14].

3.2. Almanya

Almanya temel olarak enerji politikasını ucuz, sürdürülebilir ve güvenli enerji temeline oturtmuştur [18]. Almanya deniz üstü RES projelerine ilişkin yapılan incelemede resmî olarak ulaşılan ilk rapor 2002 yılında yayımlanan "Deniz Üstü Rüzgâr Enerjisinde Alman Hükümeti'nin Stratejisi" adlı belgedir [19]. Alman deniz üstü RES yol haritasının en önemli kilometre taşı, bu strateji belgesi olarak değerlendirilebilir. Alman Enerji Ajansı (German Energy Agency (DNA)) koordinatörlüğünde, Savunma, Çevre ve Ekonomi Bakanlıklarıyla birlikte oluşturulan bu rapor, temel olarak Alman kara sularındaki potansiyel deniz üstü RES sahalarının belirlenmesine yönelik çalışmalar bütünüdür. Raporunda, Kuzey Denizi'nde 58,5 GW kurulu gücünde, Baltık Denizi'nde ise 4,6 GW kurulu gücünde potansiyel olduğu ifade edilerek her iki denizde de muhtemel deniz üstü RES sahaları belirlenmiştir.

2005 yılına gelindiğinde Almanya'da deniz üstü RES projelerinin desteklenmesi gerektiğini savunan Almanya Deniz Üstü Rüzgâr Enerjisi Kuruluşu (Germany Offshore Wind Energy Foundation) kurulmuştur. Kendisini kâr amacı gütmeyen, bölgesel ve bağımsız bir organizasyon olarak tanımlayan kuruluş; politika yapıcılar, denizcilik ve deniz üstü RES sektörü ile araştırma kuruluşları arasındaki iletişimi ve bilgi alışverişini sağlamaktadır [20].



Şekil 4. Almanya Gode Wind 1 and 2 denizüstü RES projesi-582 MW [21].

Lisanslama süreçleri incelenecek olursa ilk olarak ele alınması gereken kurum Federal Denizcilik ve Hidrografi Ajansı'dır (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)). Bağımsız düzenleyici bir otorite olan Ajansın temel görevleri Almanya deniz sahalarında (Kuzey Denizi ve Baltık Denizi) deniz güvenliği, hidrografik inceleme, deniz kirliliği izleme, denizler üzerinde mekânsal planlamanın hazırlanması ile deniz üstü RES tesislerinin testleri ve onayları olarak tanımlanmaktadır. İngiltere örneğinde olduğu gibi Almanya'da da denizcilik faaliyetleri ile ilgili bağımsız düzenleyici bir otorite bulunmakta ve bu düzenleyici kurum deniz üstü RES projelerinin lisanslamasından sorumludur [22].

BSH, denizlerde mekânsal planlama hazırlama sürecinde sadece Alman münhasır ekonomik bölgesinde kalan deniz sahalarında mekânsal planlamadan sorumludur. Münhasır ekonomik bölge dışında Almanya'nın kendi kıta sahanlığı içerisinde kalan sahalarda ise mekânsal planlama hazırlama sorumluluğu Alman karasularında kıyısı bulunan federal hükümetlerdir [22].

Alman MEB sınırları esasen Alman Devleti'ne ait olmayan kara suları olduğu için ilan edilen MEB sahalarında mekânsal planlama AB Denizde Mekânsal Planlama Kanunu çerçevesinde ele alınmaktadır. BSH tarafından 2005 yılında başlayan çalışmalar neticesinde gemi rotaları, boru hatları, bilimsel araştırma sahaları, deniz ortamı, hava trafiği, turizm, görsel etkiler, askeri kullanım, balıkçılık sahaları, kum ve taş çıkarma sahaları gözetilerek hazırlanan mekânsal planlama çalışması 2009 yılında tamamlanarak yayımlanmıştır [23].

BSH tarafından oluşturulan bu mekânsal plandan sonra ikinci aşama yine BSH tarafından Almanya MEB sınırları içerisinde "Saha Geliştirme Planı" (*Site Development Plan*) olarak adlandırılan planların hazırlanması ve yayımlanmasıdır. Saha geliştirme planı esasen; deniz mekânsal planında deniz üstü RES proje sahası olarak belirlenen sahalarda, deniz üstü RES projelerinin bu alanlardaki kapasite dağılımı, şebeke bağlantısı, kablolama planlarının yapılması gibi detaylı çalışmaları içeren plandır [24].

Deniz üstü RES projeleri ile ilgili bir diğer konu uygulanan destekleme mekanizmalarıdır. Almanya'da yenilenebilir enerjinin gelişimi için uygulanan destekleme mekanizmalarından biri alım garantisi (Feed-in tariff (FIT)) olarak adlandırılan mekanizmadır.

Almanya'da deniz üstü RES projeleri ile ilgili olarak uygulanan destekleme mekanizmaları temel olarak iki ayrı mekanizma şeklinde incelenebilir. Bunlar 2017 yılında kadar uygulanan alım garantisi mekanizması ve 2017 yılından itibaren uygulanmaya başlanan ihale metodudur [25].

Alım garantisi uygulama yönteminden bahsedilecek olursa Almanya'nın farklı tarihlerde farklı fiyatlar belirlediği görülmektedir. Farklı tarihlerde farklı fiyat uygulaması ülkede deniz üstü RES projelerinin gelişimini hızlandırmaktadır. Deniz üstü RES projeleri ile ilgili alım garantisi uygulamaları; 2009 öncesinde uygulanan tarife (Almanya'nın ilk deniz üstü RES projesinin 2010 yılında işletmeye girmesi nedeniyle 2009 yılında alım garantisi fiyatı değiştirilmiştir.), 2009-2011 yılı arası uygulanan tarife, 2011-2014 yılları arası uygulanan tarife ve 2014-2017 yılları arası uygulanan tarife olarak ayrılabilir. Yukarıdaki paragrafta bahsedildiği üzere 2017 yılından itibaren kapasite tahsisi, ihale yöntemi ile yapılmaktadır.

Almanya'da deniz üstü RES projelerinde uygulanan destekleme modelleri kısaca Tablo 3'te özetlenmiştir. Deniz üstü RES projeleri ile ilgili çalışmalara 2000 yılından itibaren hız veren Almanya, yenilenebilir enerji kaynaklarına uygulayacağı destekleme fiyatlarına deniz üstü RES projelerini de dâhil etmiş, ancak ilk deniz üstü RES projesinin 2010 yılında işletmeye girmiş olmasıyla da bu destekleme fiyatını o dönemin seviyelendirilmiş enerji maliyetleri (LCoE) koşullarını gözetenek daha gerçekçi bir değere çıkarmış, destekleme fiyatlarında son derece dinamik davranarak dönem koşullarına göre bu destekleme miktarlarını değiştirmiş, 2017 yılından itibaren de kapasite tahsisini ihale modeliyle gerçekleştirmeye başlamıştır.

Tablo 3. Almanya'da deniz üstü RES projeleri teşvik uygulamaları.

Uygulama Yılları	Uygulama Modeli	Açıklama
2009 öncesi	6,19 Avro cent/kWh (<i>sabit</i>) + 2,91 Avro cent/kWh (<i>2010 yılına kadar işletmeye girilmesi halinde</i>) olmak üzere toplam 9,1 Avro cent/kWh	Deniz derinliği ve kıydan uzaklık arttıkça teşvik edici düzenlemeler mevcut. Hiçbir projeye uygulanmamıştır.
2009-2011	13 Avro cent/kWh (<i>sabit 20 yıl</i>) + 2 Avro cent/kWh (<i>2015 yılına kadar işletmeye girme şartıyla 12 yıl</i>) olmak üzere toplam 15 Avro cent/kWh	Almanya'nın ilk deniz üstü RES projesi işletmeye geçmeden önce daha gerçekçi bir maliyet analizi ile oluşturulmuştur.
2012-2014	15 Avro cent/kWh (<i>2019 yılına kadar işletmeye girme şartı ve 12 yıl boyunca</i>) ya da 19,4 Avro cent/kWh (<i>8 yıl boyunca</i>)	İki farklı model oluşturulmuştur. Projeleri hızlandırmak için alım garantisi artırılarak sürenin kısaldığı bir model sunulmuştur.
2014-2017	15,4 Avro cent/kWh (<i>12 yıl süreyle</i>)	12 deniz milinin ötesine ve 20 metre su derinliğinin altında teşvik edilmektedir. Uygulanan alım garantisinde kademeli azaltma uygulanmaktadır.
2017-	Kapasite tahsis ihaleleri modeline geçildi. (<i>Maksimum fiyat 12 Avro cent/kWh olmak üzere her bir ihale için ayrı ayrı belirlenen tavan fiyatlar üzerinden en düşük teklife 20 yıl süreli</i>)	"0 Avro/MWh" teklif fiyatları yarışmaların en dikkat çekici sonucudur. Projeler herhangi bir destekleme mekanizmasına tabi olmadan üretilen elektrik enerjisi piyasa fiyatı üzerinden satılacaktır.

3.3. Danimarka

1991 yılında 5 MW kurulu gücünde deniz üstü RES projesi ilk defa üretime başlayan ve bütün dünyaya bu kapsamda yol gösterici konumda bulunan Danimarka’da deniz üstü RES projelerinin gelişiminin arkasındaki ana neden ülkenin karasal RES projeleri için yeteri kadar alana sahip olmamasıydı. Danimarka 8.750 km kıyı şeridine sahip Kuzey Denizi ve Baltık Denizi gibi iki adet sığ denize kıyısı olan bir ülkedir [26]. Karasal RES projeleri için yeterli alana sahip olmayışı buna karşılık çok uzun kıyı şeridi ile deniz üstü RES projeleri için son derece uygun iki farklı denize sahip olması gibi avantajları iyi değerlendiren Danimarka, rüzgâr enerjisinden elektrik enerjisi üretiminin denizler üzerinde yoğunlaşması gerektiğini çok erken sayılabilecek bir zamanda fark etmiştir (Danish Energy Agency, 2020c).



Şekil 5. İşletmeye alınan ilk deniz üstü RES (Vindeby) projesi [27].

Deniz üstü RES projelerinde Danimarka denizde mekânsal planlama çalışmalarını oluşturarak yola çıkmıştır. Bu kapsamda 1995 yılında deniz üstü RES projeleri için denizde mekânsal planlama komitesi oluşturulmuştur. Komite, Danimarka Enerji Ajansı tarafından yönetilmekte ve doğal çevre, denizde ve navigasyonda güvenlik ve şebeke iletim koşullarından sorumlu hükümet yetkililerinden oluşmaktadır. Tüm kamu otoriteleri, belirlenen deniz üstü RES sahalarının uygun yerleşimlerini kabul ettiğinde, konu ilgili komşu ülkeler ile de istişare edilir. Tüm bu yol haritası çerçevesinde 1997, 2007, 2011 ve 2012 yıllarında denizde mekânsal planlama çalışmaları yapılarak saha belirlemesi yapılmıştır [28].

Deniz üstü RES projeleri bakımından Danimarka’da en yetkili kuruluşun Danimarka Enerji Ajansı olduğu söylenebilir. Danimarka Enerji Ajansı, deniz üstü RES projelerini planlamak ve bunlara lisans ve üretim onayları vermekle görevlendirilmiş, deniz üstü RES projelerinin planlanması ve devreye alınmasından sorumlu makamdır.

Danimarka’da deniz üstü RES projesi oluşturmak için dört lisans gereklidir. Tüm lisanslar, “tek durak noktası” (İngilizce literatürde One-stop shop olarak adlandırılır) olarak hizmet veren Danimarka Enerji Ajansı tarafından verilmektedir. Böylece Danimarka Enerji Ajansı bütün projelerin başından sonuna kadar yürütülmesi ile bütün mevzuat süreçlerini düzenleyerek bürokratik süreçleri kısaltmayı amaçlamaktadır. Danimarka Enerji Ajansı tarafından verilen bu dört lisans;

- Ön hazırlık araştırma lisansı,
- Deniz üstü RES türbinleri kurma lisansı (bu lisansın verilmesinden önce, bir ÇED analizi yapılmalıdır),
- 25 yıl boyunca rüzgâr enerjisinden yararlanma lisansı (elektrik üretim lisansına denk gelmektedir),
- Elektrik üretim yetkilendirme lisansı (25 MW ve üstü tesislere için ayrıca verilen yetkilendirme lisansı) şeklindedir [29].

Bu dört lisans belirli bir proje için arka arkaya verilir. Şebeke bağlantısı lisansı, proje küçük ölçekli olduğunda deniz üstü RES türbinlerini kurma lisansına dâhil edilebilir. Daha büyük projeler için şebeke bağlantısı için ayrıca bir onay verilir. Tek durak noktası olarak adlandırılan bu sistemle başvuruların hızlı ve bürokratik süreçlerden en az şekilde etkilenecek şekilde yürütülmesinin sağlanması amaçlanmıştır.

Danimarka örneğinde, yeni deniz üstü RES projeleri iki farklı prosedüre göre kurulabilmektedir. Bu yöntemler; ihale usulü ve açık kapı prosedürü (İngilizce literatürde open door procedure) olarak adlandırılmaktadır. Bu iki yöntem içerisinde ihale yöntemi daha kapsamlı ve süreçleri daha uzun olan bir yöntemdir.

Açık kapı modeli olarak adlandırılan sistemde proje geliştiricisi, belirli bir alanda seçilen büyüklükte bir deniz üstü RES projesi için bütün çalışmaları kendisi yapar. Bu modelde inşa edilmesi planlanan proje için Danimarka Enerji Ajansı tarafından verilen “ön hazırlık araştırma lisansı” alınmasına gerek yoktur. Başvuru asgari olarak projenin bir tanımını, hangi ön incelemelerin yapılacağını, türbinlerin boyutunu, adedini ve projenin coğrafi konumunun sınırlarını içermelidir. Açık kapı modelinde, proje geliştirici üretilen elektriğin karaya iletilmesi için

gerekli iletim tesisi için ödeme yapar. Şu ana kadar bu model kapsamında bir deniz üstü RES başvurusu alınmamıştır [28].

Bu prosedürde, Danimarka Enerji Ajansı, belirli boyuttaki bir deniz üstü RES projesi için ihale duyurusu yapmaktadır. Teklif sahipleri belirli bir miktarda üretilen elektrik için sabit bir tarife üzerinden elektrik üretmeye istekli oldukları fiyat için teklif sunmaya davet edilir. Kazanan fiyat, proje konumuna, sahadaki rüzgâr koşullarına, o sırada piyasadaki rekabet durumuna bağlı olarak projeden projeye farklılık göstermektedir.

İhale modeli kapsamındaki projelerde, Danimarka İletim Şebekesi İşletmecisi hem trafo istasyonunu hem de elektriği deniz üstü RES sahasından karaya taşıyan su altı kablosunu inşa eder, bu hattın sahibidir ve hattın bakımından sorumludur.

İhale yönteminin uygulama aşamaları aşağıda sunulmaktadır:

- 1. İlgili istekliler ve yatırımcılar ile teknik diyalog:** Danimarka Enerji Ajansı, potansiyel isteklileri ve yatırımcılarla ihale şartnamesi öncesi eşit muamele, şeffaflık ve orantılılık ilkelerine dayanan teknik bir diyalog gerçekleştirir. Bu görüşmelerle ihale şartnamesinin pazar ihtiyaçlarına göre ayarlanması hedeflenmektedir.
- 2. Sözleşme duyurusu ve tam ihale şartnamesinin yayımlanması:** Sözleşme ilanı, Danimarka Enerji Ajansı'nın bir imtiyaz sözleşmesi yapmak istediğini piyasaya bildirir. Potansiyel isteklilerin ön yeterliliği için teknik ve mali kriterleri belirler.
- 3. Ön yeterliliğe sahip isteklilerle müzakere:** Potansiyel istekliler, ön yeterlilik başvurusu yaparak ihale prosedürüne katılmakla ilgilendiklerini beyan eder. Danimarka Enerji Ajansı şartname şartlarının nihai tasarımını, sözleşme teklifini vb. ön yeterliliğe sahip isteklilerle müzakere eder.
- 4. Nihai ihale çağırısı:** Müzakereler esas alınarak ihale dokümanları, yayımlanan ihale dokümanları çerçevesinde istekliler tarafından düzenlenir ve nihai teklifler son ihale belgelerine dayalı olarak sunulur.
- 5. Kazananın seçimi ve sözleşme taslağının hazırlanması:** Nihai kazanan, ihale belgelerinde yer alan ihale kriterlerine göre seçilir. Danimarka Enerji Ajansı daha sonra kazananla imtiyaz sözleşmesi imzalar ve parlamentonun onayına tabi olarak ön araştırma ve kurulum için gerekli izinleri verir.

Deniz üstü RES projeleri ile uygulama yöntemi incelenen Danimarka'da deniz üstü RES projelerinin gelişimi ve karbon emisyonu azaltım hedefleri arasında önemli bir ilişki olduğu görülmektedir. Karbon emisyonunu azaltma hedeflerini yakalayabilmek adına deniz üstü RES projelerinin planlanan şekilde gelişmesinin çok önemli olduğu görülmektedir. Bu sebeple de deniz üstü RES projelerinin kurulumunu hızlandırmak için bürokratik süreçlerin mümkün olduğunca azaltılabilmesi adına Danimarka Enerji Ajansı deniz üstü RES projelerinin hemen hemen bütün süreçlerini yönetmektedir.

3.4. Belçika

Kuzey Denizi'ne kıyısı olan bir başka Avrupa ülkesi Belçika da deniz üstü RES projelerini hayata geçirerek elektrik enerjisi üretiminde denizdeki rüzgâr enerjisinden yararlanan ülkelerdendir.

Belçika karasuları ve münhasır ekonomik bölge (MEB) sahalarında deniz üstü RES alanlarının belirlenme süreçlerinden bahsetmek gerekirse; Belçika deniz alanlarında deniz üstü RES projeleri de dâhil olmak üzere çeşitli faaliyetlerin gelişmesi neticesinde, Federal Parlamento tarafından çıkarılan 20 Temmuz 2012 tarihli Kanun ile deniz sahalarının planlanması ve düzenlenmesi için yasal bir çerçeve oluşturması ve ardından aşağıda yer alan Kraliyet Kararnamelerinin çıkarılması sağlanmıştır. Bu kararnameler:

- Doğal Yaşam Alanlarının ve Yabani Hayvan ve Floranın Korunmasına İlişkin Direktif ve Yabani Kuşların Korunmasına İlişkin Direktif (16 Ekim 2012 tarihli Kraliyet Kararnamesi),
- Özel bir danışma komisyonunun oluşturulması ve Deniz Alanları Geliştirme Planının kabul edilmesi için prosedür (13 Kasım 2012 tarihli Kraliyet Kararnamesi),
- Deniz Alanları Geliştirme Planı (20 Mart 2014 tarihli Kraliyet Kararnamesi)

şeklinde olup deniz üstü RES sahaları bu prosedürler çerçevesinde oluşturulmaktadır (CREG, 2021).

Belçika deniz üstü RES projelerinin kurulumunda yer alan düzenleyici işlemler şu şekilde açıklanabilir: Federasyon şeklinde yönetim yapısına sahip ülkede, enerji piyasası alanında Belçika'nın tamamındaki federal düzenleyici kuruluş Elektrik ve Gaz Düzenleme Komisyonu'dur (Commision for Electricity and Gas Regulation (CREG)). Federal düzenleyici kuruluş elektrik ve doğal gaz piyasalarında şeffaflığı ve rekabeti izler, iletim tarifelerini onaylar, piyasa durumunun genel çıkarlara uygun olup olmadığını ve genel enerji politikasına uyup uymadığını değerlendirir, tüketici çıkarlarını korur. Federal düzenleyici kuruluş dışında ise üç adet bölgesel düzenleyici kuruluş bulunmaktadır. Bölgesel düzenleyici kuruluşların görevleri; elektrik ve doğal gaz piyasalarının organizasyonundan ve işletilmesinden sorumlu olmak, bölgesel makamlara tavsiyelerde bulunmak ve alınan kararların uygulanmasını izlemektir [30].

Belçika federal sistemi kapsamında, üç bölgenin her biri (Flanders, Wallonia ve Brüksel), nükleer santraller, iletim şebekesi düzenlemesi ve deniz üstü RES projeleri hariç olmak üzere, enerji politikası dâhil çeşitli alanlarda kendi topraklarında karar verme ve düzenleme yapma yetkisine sahiptir [31].

Elektrik üretim tesislerinin kurulumu sırasındaki izin onay süreçlerinden ise Federal Enerji Bakanlığı ve CREG birlikte sorumludur. Yeni elektrik üretim tesislerinin inşası, CREG'in tavsiyesi üzerine Federal Enerji Bakanlığı tarafından verilen bireysel ön izne tabidir. Elektrik üretim tesisinin kurulumu için Federal Enerji Bakanlığı tarafından verilen ön izin için 25 MW sınırı bulunmaktadır. Yeni tesislerin inşası, tesisin kapasitesi 25 MW'tan

az veya buna eşitse, alınması gereken ön izinden muaftır. Bu tür kurumlar için, CREG'e ve Federal Enerji Bakanlığına, net geliştirilebilir kapasiteyi ve kurulumun yerini belirten bir beyan önceden gönderilmelidir. Bu sürecin devamında Federal Enerji Bakanlığı üretim lisansı verilir verilmeyeceğine karar verir. Üretim lisansı verilen şirket lisansta tanımlanan yükümlülükler çerçevesinde tesisi belirli bir süre içerisinde işletmeye almak zorundadır. Bu süre Belçika Elektrik Kanunu'nda 5 (beş) yıl olarak belirlenmiştir [31]. Deniz üstü RES projeleri kapsamında verilen üretim lisansı; lisansta belirlenen santral sahası sınırları çerçevesinde, türbinlerin kurulumu ve işletilmesi ile rüzgâr ve dalga enerjisinin kullanım hakkını vermektedir. Verilen lisansın süresi ise 30 yıl olarak belirlenmiştir [32].

Buna ek olarak, deniz üstü RES projeleri özelinde, izin sahibinin tesisi inşa etme hakkı ve işletme lisansı dışında "deniz koruma izni" olarak adlandırılan bir çevre izni alması gereklidir. Bu izne ilişkin başvuru prosedürü ile ilgili yasal çerçeve aşağıda belirtilmiştir [32]:

- Başvuru sahibi, Doğal Çevre Operasyon Müdürlüğü Kuzey Denizi Matematik Modelleme Bilimsel Hizmet Yönetimi Birimi olarak adlandırılan kuruluşa bir çevresel etki çalışması sunar.
- Raporun sunulduğu kurum başvuru kapsamında bir çevresel etki değerlendirmesi raporu oluşturur.
- Oluşturulan rapor, raporun sunulduğu kurumun görüş ve değerlendirmeleri ile birlikte Federal Deniz Koruma Bakanlığı'na gönderilir ve Federal Deniz Koruma Bakanlığı nihai kararını verir.

Belçika'da deniz üstü RES projesi kurulumu için gerekli olan üçüncü temel izin, Kuzey Denizi'ne (Belçika karasuları ve MEB sınırları içerisinde) deniz altı kabloları döşemek için verilen izindir. Bu izin Federal Enerji Bakanlığı tarafından verilmektedir [32].

Belçika'daki yenilenebilir enerji projeleri, genellikle yenilenebilir enerji kaynağından belirli miktarda elektrik üretimini teşvik eden yeşil sertifikaların verilmesi ile desteklenmektedir. Yenilenebilir kaynaklardan üretilen her 1 (bir) MWh net elektrik için bölgesel piyasa düzenleyicileri ya da federal bölgesel düzenleyici kuruluş olan CREG tarafından bir yeşil sertifika verilir. Üreticiler bu yeşil sertifikaları elektrik tedarikçilerine veya Belçika İletim Sistemi İşletmecisine satabilir. Bu durumda iletim sistemi işletmecisi, söz konusu yeşil sertifikaları Federal Hükümet tarafından belirlenen garantili bir fiyattan satın almakla yükümlüdür [32].

Belçika Elektrik Kanunu, Federal Hükümetin deniz üstü RES projeleri için özel bir destek planı oluşturmasını hükme bağlamıştır. Bu destek sistemi Belçika İletim Sistemi İşletmecisi tarafından asgari sabit fiyatla 20 yıllık bir süre için satın alma yükümlülüğü olan yeşil sertifika programıdır. Belirtilen en düşük sabit yeşil sertifika fiyatı ile ilgili olarak, deniz üstü RES projeleri için 1 Mayıs 2014 tarihi referans alınarak iki farklı yöntemle ödeme yapılmaktadır. 1 Mayıs 2014'ten önceki deniz üstü RES projeleri, kurulu kapasitenin ilk 216 MW'lık kısmından üretilen elektrik için MWh başına minimum 107 Avro sabit fiyatla ve daha sonraki ilave her kapasiteden sonra MWh başına 90 Avro sabit fiyatla yeşil sertifikalarını Belçika İletim Şebekesi İşletmecisine satabilir. 1 Mayıs 2014'ten sonra uygulanan modelde ise; deniz üstü RES projeleri, Yeşil Sertifikaları kapsamındaki üretimlerini İletim Sistemi İşletmecisine deniz üstü RES projeleri için seviyelendirilmiş enerji maliyetine (LCoE) dayalı sabit bir asgari fiyattan 20 yıllık bir süre boyunca satabilir. Seviyelendirilmiş enerji maliyeti, proje sahibi firmayla yapılan görüşmeyi takiben CREG'in önerisine dayanarak Enerji Bakanlığı tarafından belirlenir [32]. Deniz üstü RES projelerinin gelişimi, mevcut durumu, deniz sahalarının belirlenme yöntemi, deniz üstü RES projelerinde uygulanan düzenleyici işlemler ve destekleme mekanizmalarının anlatıldığı bu bölümde, federatif yapıya sahip Belçika'da deniz üstü RES projelerinin bölgesel otoritelerden ayrı tutularak merkezi hükümet tarafından yürütülmesi, bu projelere Belçika Devleti'nin daha bütünsel bir bakış açısıyla yaklaştığının göstergesidir. Teşvik mekanizması olarak ise alım garantisi ve fark kontratları dışında, yeşil sertifikaların uygulandığı görülmektedir. Belçika deniz üstü RES projeleri ile ilgili olarak söylenebilecek bir diğer önemli husus ise hâlihazırda deniz üstü RES tesislerine sahip ülkeler içerisinde en az deniz sahasına sahip ülkenin Belçika olmasına rağmen mevcut deniz sahalarını çok etkin bir şekilde kullanarak bu projeleri hayata geçirmiş olmasıdır.

3.5. Hollanda

Hollanda deniz üstü RES projelerine önem veren ülkelerdendir. Bunu ortaya koyan en önemli belgelerden biri Deniz Üstü RES Yol Haritası 2030 (Offshore Wind Energy Roadmap 2030) adlı belgedir. 2020 yılında yayımlanan belgede, 2030 yılına kadar yaklaşık 7 GW kurulu gücünde 4 adet projenin işletmeye alınması planlanmış ve bu projelere ilişkin sahalarda belirlenmiştir [33].

Hollanda'da deniz üstü RES projelerinin önemini gösteren diğer bir husus, ülkede deniz üstü RES için ayrı bir kanunun yürürlükte olmasıdır. Deniz Üstü Rüzgâr Enerjisi Kanunu (Offshore Wind Energy Act) 1 Temmuz 2015 tarihinde yürürlüğe girmiştir. Hollanda, Almanya'dan sonra deniz üstü rüzgâr enerjisi ile ilgili kanun seviyesinde düzenleme yapan ikinci ülke konumundadır. Kanunun yürürlüğe konulmasındaki amaç, yenilenebilir enerji hedeflerine ulaşılmasını sağlamak amacıyla deniz üstü RES projelerinin gerçekleştirilmesine yönelik karar verme sürecini basitleştirmek ve hızlandırmak olarak ifade edilmektedir [34]. Kanuna ilişkin önemli noktalar ifade edilecek olursa; hükümet, önerilen santrallerin mekânsal planlama düzenlemeleri, çevresel değerlendirme süreçleri ve projelerin şebeke bağlantısı ile ilgili olarak deniz üstü RES proje yatırımcısının sorumluluğunu devralmıştır.

Deniz üstü rüzgâr enerjisi ile ilgili olarak düzenleyici işlemler ve kurumlardan bahsetmek gerekirse, projelerle ilgili ana düzenleyici kuruluş Ekonomik İşler ve İklim Politikası Bakanlığı'dır (Ministry of Economic Affairs

and Climate Policy). Ekonomik İşler ve İklim Politikası Bakanlığı, iklim ve enerji politikası düzenlemeleri kapsamında belirlenen hedeflere ulaşılmasını destekleyen önlemlerin tasarlanması ve uygulanması konusunda birincil sorumluluğa sahiptir. Deniz üstü RES projelerinin gerçekleştirileceği sahaların belirlenmesi sürecini Bakanlık yürütmektedir. Sahaların seçimi sürecindeki bütün jeoteknik, jeolojik, çevresel ve deniz meteorolojisine ilişkin çalışmalar Bakanlık adına Hollanda Kurumsal Ajansı (The Netherlands Enterprise Agency) tarafından yapılmaktadır. Projelerin inşa edilmesi ve işletilmesi için gerekli izin ise yine Bakanlık tarafından verilmektedir. İzin verme kriterleri Deniz Üstü Rüzgâr Enerjisi Kanunu'nda belirtilmiştir.

Deniz sahalarının belirlenmesi ise geniş kapsamlı bir denizde mekânsal planlama çalışmasına dayanmaktadır. Deniz mekânsal planlaması ise Hollanda Su Kanunu (Dutch Water Act) çerçevesinde hazırlanan ve 2016-2021 yıllarını kapsayan Milli Su Planı (National Water Plan) çerçevesinde oluşturulmuştur. Hollanda deniz sahaları ve münhasır ekonomik bölgeleri içerisinde kapsamlı bir planlamayı içeren Milli Su Planı Belgesi'nde deniz üstü RES projeleri için ayrılan alanlar da belirlenmiş olup belirlenen bu alanların dışında proje geliştirilmesine izin verilmemektedir [35]. Deniz üstü RES projeleri için belirlenen alanlar içerisindeki sahalarda kapasite tahsisi ise ihale yöntemiyle gerçekleştirilmektedir. Kapasite tahsis ihaleleri ile uygulanacak destekleme mekanizmaları Ekonomik İşler ve İklim Politikası Bakanlığı adına Hollanda Kurumsal Ajansı tarafından yürütülmektedir. Tahsisi yapılacak sahaya ilişkin bütün ön çalışmalar ihaleden önce Hollanda Kurumsal Ajansı tarafından proje geliştirme planı yapan şirketlerle paylaşarak proje geliştiricilerin sahaya ilişkin daha detaylı bilgi sahibi olmaları sağlanmaktadır. Uygulanan ihale yöntemi ise destek mekanizmalı ve destekleme mekanizmasının olmadığı ihale olarak iki farklı şekildedir. Destek mekanizmalı yöntemde; belirlenen tavan alım fiyatından düşük olmak üzere en düşük teklifi veren firma ihaleyi kazanmaktadır. Burada uygulanan destekleme mekanizması ise Sürdürülebilir Enerji Teşvik Programı (The Sustainable Energy Incentive Scheme) olarak adlandırılan bir mekanizma ile tanımlanmıştır. Bu sistemde destekleme mekanizmasına dâhil her bir yenilenebilir enerji kaynağı için, birim enerji üretim maliyeti yıllık olarak belirlenmekte ve piyasa koşullarına göre oluşan o yılın birim elektrik fiyatı, yıllık olarak belirlenen bu maliyetin altında kalırsa aradaki fark destekleme mekanizması kapsamında şirkete ödenmektedir. Deniz üstü RES projeleri için uygulanacak destekleme süresi 15 yıl olarak belirlenmiştir [36]. Destekleme mekanizmasının uygulanmadığı ihale yönteminde ise ihalesi yapılan sahaya birden fazla başvuru olması durumunda kapasite tahsisi Bakanlık tarafından yapılan puanlama sistemine göre yapılmaktadır. Bu puanlamada başvuruda bulunan şirketlerin deneyimleri, ekonomik yapıları, sahaya ilişkin başvuru planlamaları, türbin dizilimleri gibi kriterler değerlendirilerek en yüksek puanı alan şirkete kapasite tahsisi yapılmaktadır.

4. ÇİN

Rüzgâr enerjisi kullanımı bakımından karasal RES projelerinde önemli bir tecrübeye sahip olan Çin, bu tecrübesini deniz üstü RES projelerine aktarmayı başarmıştır. Bilindiği üzere deniz üstü RES projelerinin ilk olarak inşası ve hayata geçirilmesi Avrupa'da olmuştur. Avrupa dışında ise en dikkat çekici ülke Çin'dir. İlk deniz üstü RES projesini 2010 yılında işletmeye almıştır [4]. Aradan geçen 10 yıllık sürenin sonunda 2020 yıl sonu itibarıyla kapasitesini 9.996 MW seviyesine çıkarmıştır. Özellikle 2020 yılı içerisinde 7 adet, toplam 2.048 MW büyüklüğünde projeyi işletmeye almıştır [37]. Ayrıca 2007 yılında yayımlanan Çin Rüzgâr Enerjisi Raporu'na göre 20 metrenin altındaki deniz derinliğinde deniz üstü RES potansiyeli 750 GW olarak hesaplanmıştır [38].

Çin'de deniz üstü RES projeleri de dâhil olmak üzere yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı projelerin gelişimindeki ana etmenin küresel ölçekte tehdit oluşturan karbondioksit salımını azaltma ve özellikle aşırı kömür tüketimi sonucu ülkeyi tehdit eden hava kirliliğidir. Deniz üstü RES projelerinin gelişimindeki bir diğer etken ise Çin'in nüfus yoğunluğunun ve ekonomik aktivitelerin özellikle denize yakın doğu sahillerinde yoğunlaşmış olmasıdır. İnşa edilen deniz üstü RES projeleri bu şehirlerin yoğun enerji talebini karşılamada büyük katkı sunmaktadır.

İlk olarak deniz sahalarının belirlenme yöntemi ve bu süreçten sorumlu kuruluşlar hakkında bilgi verilecektir. Çin'de deniz sahaları ile ilgili yetkili kuruluş olan Devlet Okyanus İdaresi (State Oceanic Administration), Çin'in iç denizleri, karasuları, bitişik bölgesi, münhasır ekonomik bölgesi, kıta sahanlığı ve diğer deniz alanlarının kullanımları, çevre koruma, bilimsel araştırma ve adaların korumasına ilişkin yasa ve yönetmeliklerin hazırlanmasından sorumludur [39]. Deniz sahalarının işlevsel bölümlendirilmesi de Devlet Okyanus İdaresi tarafından yürütülmektedir. Deniz mekânsal planlama kavramı Çin'de Deniz İşlevsel Bölümlendirme (Marine Functional Zoning) olarak tanımlanmaktadır.

Deniz mekânsal planlama üzerine 30 yıldan fazla süren bir tecrübesi olan Çin, bu çalışmalara ilk olarak 1988 yılı gibi erken sayılabilecek bir zamanda başlamıştır. 1 Haziran 2002 tarihli Deniz Kullanım Yönetimi Kanunu ile deniz mekânsal planlama ve deniz sahalarının kullanımı hakkında aşağıda açıklanan üç temel yaklaşım belirlenmiştir.

- **Deniz yetkilendirme sistemini kullanma hakkı:** Kanuna göre deniz devlete aittir. Devlet Konseyi, denizlerin mülkiyetini Devlet adına kullanır.
- **Denizde işlevsel bölümlendirme sistemi:** Kanun, deniz alanının herhangi bir şekilde kullanımının Devlet tarafından oluşturulan deniz işlevsel bölümlendirme planına uygun olmasını şart koşmaktadır.

- **Kullanıcı ücreti sistemi:** Denizi kullanma hakkı, Devletin hukuk sistemi tarafından korunmaktadır. Devlet, denizi kullanan herhangi bir kurum veya gerçek kişinin düzenlemelere uygun olarak ücret ödemesini gerektiren bir kullanım ücreti sistemi oluşturmuştur.

Deniz planlaması hakkında yapılan güncellemelerden en sonuncusu, çalışmalarına 2010 yılında başlanan ve 2011-2020 yıllarını kapsayan deniz işlevsel bölümlendirme çalışmasıdır. Bu planlama kapsamında deniz koruma alanlarının, Çin'in yetki alanı altındaki deniz alanının en az %5'i olması gerektiği ve bu alanların 2020'ye kadar toplam deniz alanının %11'inden az olamayacağı belirlenmiştir. Ayrıca kendi deniz sahaları beş farklı denize (Bohai, Sarı, Doğu Çin ve Güney Çin denizleri ve Tayvan'ın doğusundaki deniz alanı) bölünmüş ve bu denizler toplam 29 deniz alanına bölünmüştür [40]. Özellikle, denizde yenilenebilir enerjinin geliştirilmesi için önceden seçilmiş alanlar "*mineral ve enerji*" kategorisi içerisinde yer almaktadır. Deniz üzerinde yenilenebilir enerji projesi geliştirilmesi sadece bu önceden seçilmiş alanlar içinde önerilebilmektedir [38].

Deniz üstü RES projelerinin kurulumu ile ilgili olarak yasal çerçeve ve düzenleyici işlemler zaman içerisinde gelişerek olgunlaşan birçok süreçten oluşmaktadır. Bu yasal çerçeve içerisinde temel düzenleyici belge Yenilenebilir Enerji Kanunu'dur. Söz konusu kanun rüzgâr enerjisi ile ilgili olanlar da dâhil olmak üzere yenilenebilir enerji sektörünün ve projelerinin gelişimini yöneten genel çerçeveyi sunmaktadır.

Deniz üstü RES projelerinin kurulumunda rol oynayan düzenleyici kurumlardan bahsedilecek olursa, çeşitli aşamalarda birden fazla düzenleyici otorite tarafından düzenleme yapılmaktadır. Bu kuruluşların başında Milli Enerji İdaresi (National Energy Administration (NEA)) gelmektedir. Milli Enerji İdaresi, en genel ifadeyle Çin enerji sektörünü denetleyen Kurumdur [41]. Merkezi düzeyde, ülke çapında bir deniz üstü RES geliştirme planı yayımlamaktan sorumluyken, eyalet düzeyindeki birimleri ise kendi yerel deniz üstü RES planlarını hazırlama hakkına sahiptir.

Deniz sahalarının planlanmasından sorumlu kuruluş olarak yukarıda bahsedilen Devlet Okyanus İdaresi ve yerel birimleri, projelerin yürütüldüğü deniz alanlarının onaylanmasından, alanların kullanım hakkını onaylayan Deniz Alanları Kullanım Sertifikasının sağlanmasından, deniz altı kablolarının montajının onaylanmasından ve seyrüsefer güvenliği ve çevresel etkilerin incelenmesinden sorumludur.

Ulusal Kalkınma ve Reform Komisyonu (National Development and Reform Commission (NDRC)) deniz üstü RES projeleri için uygulanan destekleme mekanizmalarının belirlenmesinden sorumludur.

Maliye Bakanlığı, deniz üstü RES projeleri için sağlanan sübvansiyon ve fonların kontrolünden ve dağıtımından sorumludur.

Bilim ve Teknoloji Bakanlığı, deniz üstü RES projelerinde araştırma teşvikleri ile bu alandaki teknoloji yatırımlarının teşvik süreçlerinin yönetilmesinden sorumludur.

İskân ve Kentsel-Kırsal Kalkınma Bakanlığı kara üzerindeki inşaat faaliyetleri için inşaatla ilgili onay ve izinlerin verilmesinden sorumludur.

Devlet Piyasa Düzenleme İdaresi (State Administration for Market Regulation (SAMR)), ulusal teknik standartların yayımlanmasından sorumludur.

Deniz üstü RES projeleri için uygulanan kapasite tahsis yönteminden bahsedilecek olursa, bu süreci 2019 yılı öncesi ve sonrası olarak ayırmak gerekmektedir. 2018 yıl sonuna kadar uygulanan yöntemde; proje geliştirmek isteyen şirket öncelikle Milli Enerji İdaresi'ne başvurarak, Milli Enerji İdaresi tarafından hazırlanan Deniz Üstü RES Planı'na göre başvuru yapıp yapamayacağını teyit etmektedir. Milli Enerji İdaresi tarafından uygun görülmesi halinde ilk olarak ön araştırma izni olarak adlandırılan izin belgesiyle projeye başlama izni verilmektedir. Bu süreçlerin de olumlu olarak tamamlanmasıyla proje geliştirmek isteyen şirkete Milli Enerji İdaresi tarafından proje yapma izni verilmektedir [36].

2019 yılından itibaren ise deniz üstü RES sahalarının tahsisi Milli Enerji İdaresi tarafından 18 Mayıs 2018 tarihinde yayımlanan "*Rüzgâr Enerjisi Projelerinin Rekabetçi Tahsisi için İdari Kılavuz*" uyarınca belirlenen yarışma usulüne göre yapılmaktadır. Bu rekabetçi tahsis planı, tüm karasal ve deniz üstü RES projeleri için geçerlidir. Bu tahsis metodolojisinde projeler iki farklı yöntemle değerlendirilir. Birinci yöntem, proje geliştiricisinin önceden tanımlandığı sistemdir. Bu yöntem, proje geliştiricinin yerel yönetimle rüzgâr enerjisi geliştirme anlaşması yaptığı ve ön çalışmalarını proje geliştiricisinin tamamladığı projeleri kapsamaktadır. Milli Enerji İdaresi, bu projeleri belirli parametrelere göre değerlendirir ve onlara bir puan verir. Puanı yüksek olan projeler, proje tahsisinde öncelikli olarak yer almaktadır. İkincisi ise projeye ilişkin ön geliştirme çalışmalarının projenin yapılacağı eyaletteki yerel yetkililer tarafından yapıldığı yöntemdir. Sahanın geliştirileceği proje, Milli Enerji İdaresi tarafından yapılan rekabetçi ihale ile belirlenir [36].

Deniz üstü RES projelerinin kurulum sürecinde uygulanan destekleme mekanizmalarından bahsedilecek olursa; Çin tarafından uygulanan destekleme mekanizmasının temelinde alım garantisi sistemi bulunmaktadır. 2014 yılına kadar deniz üstü RES projeleri için uygulanan alım garantisi fiyatı 0,74 Yuan/kWh (11,65 ABD Doları cent/kWh²) olmuştur. Bu fiyat özellikle projeye ilgili işletme maliyetlerinin görece düşük olarak değerlendirilmesi sonucu piyasa koşullarının altında bir fiyat olarak belirlenmiştir. 2014 yılında Ulusal Kalkınma ve Reform Komisyonu tarafından, deniz üstü RES projelerinde ihalesiz olarak tahsis edilen projeler için alım

² Çapraz kur hesaplamaları 25/10/2021 tarihli Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası döviz satış kurları üzerinden yapılmıştır.

garantisi 0,85 Yuan/kWh (13,39 ABD Doları cent/kWh) olarak belirlenmiştir [38]. Alım garantisi, proje işletmeye alındıktan itibaren 20 yıl süreyle uygulanmaktadır [42]. Uygulanan bu destekleme mekanizması ise 2021 yılının sonuna kadar işletmeye alınacak projeler için geçerlidir [4].

5. DİĞER ÜLKELER VE GENEL DEĞERLENDİRME

Ülke incelemeleri kısmında deniz üstü RES projelerinin başlangıcı, mevcut durumu, gelecek planlamaları, deniz sahalarının belirlenme süreçleri, izin ve onay süreçleri ile ihale yöntemleri ve destekleme mekanizmalarının incelendiği altı ülke, esasen deniz üstü RES projelerinin 2020 yılı sonu itibarıyla toplam kurulu güç bakımından %98'ini oluşturmaktadır. Bu ülkelerin mevcut uygulamaları özet şeklinde Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4. Deniz üstü RES projelerine ilişkin ülke uygulamalarının özeti.

	Almanya	B. Britanya	Danimarka	Belçika	Hollanda	Çin
Saha belirleme yöntemi	Bütün ülkelerde deniz üstü RES projeleri için potansiyel alanlar, geniş kapsamlı denizde mekânsal planlama çalışması neticesinde belirlenmiştir.					
Çevresel etki çalışmaları	Bütün ülkelerde rüzgâr türbini temelleri ile deniz altı kablo seriminin bölgedeki deniz canlılarına olan etkileri ile rüzgâr türbinlerinin kuş göç güzergâhındaki etkileri incelenmektedir.					
Sahaya ilişkin ön çalışmalar	Hükümet tarafından yapılır.	Proje geliştiricisi şirketin sorumluluğunda	Hükümet tarafından yapılır.	Hükümet tarafından yapılır.	Hükümet tarafından yapılır.	Hükümet tarafından yapılır.
Kapasite tahsis yöntemi	İhale yöntemi	İhale yöntemi	İhale yöntemi ve ihalesiz tahsis bulunmakta	İhale yöntemi	İhale yöntemi	İhale ve ihalesiz yöntemle tahsis
Destekleme modeli	Alım garantisi	Fark kontratları	Fark kontratları	Yeşil sertifika	Fark kontratları	Alım garantisi
İletim sistemi inşası	İletim şebekesi işletmecisi sorumluluğu	Şirket sorumluluğunda	İletim şebekesi işletmecisi sorumluluğu	İletim şebekesi işletmecisi sorumluluğu	İletim şebekesi işletmecisi sorumluluğu	İletim şebekesi işletmecisi sorumluluğunda
Deniz üstü RES Kanunu	Ayrı bir Kanun bulunmaktadır.	Yoktur.	Yoktur.	Yoktur.	Ayrı bir Kanun bulunmaktadır.	Yoktur.
Lisanslama süreci	Bütün izinler Federal Denizcilik ve Hidrografi Ajansı tarafından sağlanmaktadır.	Birden çok lisans gerekli (deniz tabanı araştırmaları lisansı, denizde inşaa faaliyetleri lisansı ve elektrik üretim lisansı)	Danimarka Enerji Ajansı (Bağımsız düzenleyici kurum) tarafından dört farklı lisans verilir (ön hazırlık, denizde inşaat, rüzgâr enerjisinden yararlanma ve üretim lisansı)	Üç farklı lisans gerekli (Deniz koruma lisansı, deniz altı kablo döşeme lisansı ve üretim lisansı)	Ekonomik İşler ve İklim Politikası Bakanlığı projelerin inşası ve işletilmesi için iki farklı izin vermektedir.	Deniz alanları kullanımı, deniz altı kabloların döşenmesi ve kara üzerindeki inşaat faaliyetleri için izin gereklidir.
Sorumlu Kuruluş/ Kuruluşlar	Tek sorumlu kuruluş Federal Denizcilik ve Hidrografi	Birden çok kurumun sorumluluğu bulunmaktadır. (Düzenleyici	Danimarka Enerji Ajansı tek sorumlu kuruluşur.	Enerji Bakanlığı ve Bağımsız düzenleyici otorite sorumludur. Ana	Tek sorumlu kuruluş Ekonomik İşler ve İklim Politikası	Merkezi ve federal düzeyde birçok kuruluşun sorumluluğu

	Ajansı'dır.	kurumlar, Denizcilik Yönetim Teşkilatı ve The Crown Estate şirketidir.)		sorumluluk Enerji Bakanlığı'ndadır.	Bakanlığı'dır.	bulunmaktadır.
Düzenleyici otoritenin rolü	Düzenleyici otorite deniz üstü RES projelerinin sürecine dâhil değildir.	Üretim lisansı verilmektedir.	Düzenleyici otorite bütün süreci yönetmektedir.	Üretim lisansı verilmesi için Bakanlığa tavsiye verir ve Yeşil Sertifikaları düzenler.	Düzenleyici otoritenin sorumluluğu bulunmamaktadır.	Düzenleyici otorite (Milli Enerji İdaresi) deniz üstü RES'lerin planlamasından sorumludur.

6. TÜRKİYE'DE DENİZ ÜSTÜ RES PROJELERİNE İLİŞKİN SÜREÇLER

Türkiye'de deniz üstü RES süreci ile ilgili atılan en somut adım Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından 2018 yılında duyurusu yapılan YEKA ihalesidir. “Rüzgâr Enerjisine Dayalı Deniz Üstü (Offshore) Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları ve Bağlantı Kapasitelerinin Tahsisine İlişkin Yarışma İlanı” ile ülkenin ilk deniz üstü RES yarışma ilanı 21/06/2018 tarihli ve 3045 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanmıştır [43]. Toplam 1200 MW kurulu gücündeki bağlantı kapasitesi Gelibolu, Saros ve Kıyıköy bölgeleri olmak üzere üç farklı bölge için ilan edilmiştir.

Yarışma başlangıç tavan fiyatının 8 ABD Doları cent/kWh olarak ilan edildiği yarışmada, elektrik enerjisi alım süresi sözleşme kapsamında, üretim tesisinin ilk geçici kabulünün yapıldığı tarihten itibaren üretilen ilk 50 (elli) TWh miktarın sisteme verildiği süre olarak belirlenmiştir.

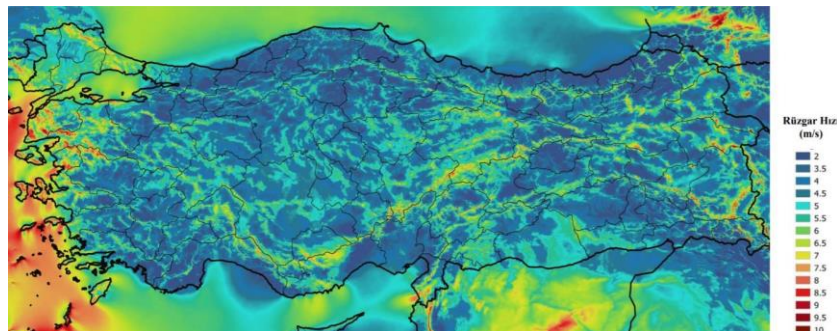
Teknik şartnamenin bedeli ödenmek suretiyle temin edilebileceği ilana ilişkin başvuruların 23/10/2018 tarihine kadar yapılabileceği duyurulmuş ancak yarışmaya katılmak üzere söz konusu tarihe kadar başvuru olmaması nedeniyle yarışma ertelenmiştir.

Şartnamenin bedeli ödenmek suretiyle temin edilmesi sebebiyle, şartnameye ilişkin detaylara bu çalışma kapsamında yer verilememiştir.

Ancak YEKA ihale süreçlerinin incelenmesine ilişkin hazırlanan raporun incelenmesi neticesinde; yerli katkı oranının en az %60 olduğu, projede çalışacak kişilerin %80’inin Türkiye uyruklu olması, 2,5 milyon ABD Doları geçici teminatın ve 12,5 milyon ABD Doları proje tamamlanma teminatının yer aldığı anlaşılmıştır [44].

2018 yılında duyurusu yapılan deniz üstü RES yarışma ilanı sonrasında yeni bir yarışma modeli oluşturmak amacıyla bir dizi çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmalar, deniz üstü RES projelerine sahip ülkelerin yetkili kurumları ile yapılan iş birliği anlaşmaları, rüzgâr enerjisi potansiyel atlasının deniz üstü rüzgâr hızlarını daha detaylı içerecek şekilde yeniden hazırlanması, deniz üstü RES kapsamında Avrupa Birliği fonları (Instrument for Pre-Accession Assistance (IPA)) kullanımı ile Dünya Bankası ile yapılan anlaşmaları kapsamaktadır.

Deniz üstü RES projeleri kapsamında daha etkin bir yol haritası oluşturmak amacıyla yapılan çalışmalar arasında en dikkat çekici olanı Bakanlık ile Danimarka Enerji Ajansı ve Danimarka Kamu Hizmetleri ve İklim Bakanlığı arasında 22/06/2018 tarihinde imzalanan mutabakat zaptıdır [45]. Türkiye için deniz üstü RES yol haritasının oluşturulması amaçlanan anlaşma 2 faz olarak planlanmış, birinci fazda teknik süreçler hakkında bir yol haritası oluşturulması planlanırken ikinci faz çalışmasında ise ihale prosedürleri, finansman yöntemleri gibi konuların netleştirilmesi amaçlanmaktadır. İki ülke arasındaki anlaşmaya göre çalışmanın 2022 yılında tamamlanması hedeflenmektedir. Türkiye’nin deniz üstü rüzgâr ve dalga enerjisi potansiyelini belirlemek amacıyla Avrupa İmar ve Kalkınma Bankası (European Bank for Reconstruction and Development (EBRD)) ile beraber “Identifying and Mapping Offshore Wind and Wave Energy Potential of Turkey” adlı proje yürütülmekte olup proje Mayıs 2020’de tamamlanmıştır. Proje kapsamında Türkiye için yeni bir rüzgâr atlası oluşturulmuştur. Söz konusu harita; Türkiye geneli, yedi coğrafi bölge ve her bir il için ayrı ayrı oluşturulmuş olup Enerji İşleri Genel Müdürlüğü’nün internet sitesinde yer almaktadır [46].



Şekil 6. Türkiye ortalama rüzgâr hızı atlası [46].

6.1. Deniz Üstü RES Projeleri Kapsamında Güncel Mevzuatın İncelenmesi

Bu bölümde deniz üstü RES projeleri bütünsel bir bakış açısıyla ele alınarak bu tür projelerin hangi güncel mevzuatları etkileyebileceği üzerinde değerlendirme yapılmıştır. Mevzuat incelemesi öncelikle elektrik piyasası mevzuatı kapsamındaki süreçlerin incelenmesi şeklinde olup daha sonra karasularına ilişkin ulusal ve uluslararası düzenlemeler, deniz saha planlamaları, kıyı ve sahillere ilişkin ilgili mevzuat ve deniz yapılarına ilişkin düzenlemelerin irdelenmesi şeklinde yapılmıştır.

Ülkemizde rüzgâr enerjisine dayalı üretim tesislerinin kuruluşu güncel mevzuat hükümlerine göre üç farklı modele göre yapılabilmektedir. Bu yöntemler; lisanslı üretim, YEKA modeli ve lisanssız üretimdir. Deniz üstü RES projelerinin görece büyük ölçekli projeler olması sebebiyle lisanslı üretim ve YEKA modeli çerçevesinde proje geliştirilmesinin uygun olacağı değerlendirilmektedir.

2018 yılında Bakanlık tarafından duyurusu yapılan deniz üstü RES yarışma ilanı YEKA modeli kapsamında yapılmıştır. Bu sebeple öncelikle YEKA modeli kapsamında inceleme ve değerlendirme yapılacaktır. YEKA modeli, 18/5/2005 tarihli ve 25819 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe giren 5346 sayılı “Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun (Kanun)”un 4 üncü maddesinde açıklanmaktadır. Kanunun 4 üncü maddesinde yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin ve verimli kullanılması, bu alanların ve bağlantı kapasitelerinin yatırımcılara tahsisiyle yatırımların hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesi amacıyla kamu ve hazine taşınmazları ile özel mülkiyete konu taşınmazlarda ilgili kurum ve kuruluşların görüşü alınarak yer seçimi yapmak suretiyle yenilenebilir enerji kaynak alanları oluşturulacağı ifade edilmektedir. Söz konusu maddede YEKA olarak ilan edilen alanlarda Bakanlık tarafından kapasite tahsis yarışmaları düzenlenerek bu alanlarda etkin ve hızlı bir şekilde yenilenebilir enerji kaynağına dayalı proje geliştirilmesi amaçlanmaktadır. YEKA Yönetmeliği ile ilgili vurgulanması gereken ve deniz üstü RES yarışma süreçlerini de yakından ilgilendiren önemli bir nokta Kanunun dördüncü maddesinde yapılan değişikliktir. 25/03/2020 tarihinde yapılan değişiklikle YEKA kapsamında belirlenen yarışma ilanında tavan fiyatın Türk Lirası (TL) üzerinden belirlenmesi zorunluluğu getirilmiştir.

YEKA modelinin uygulanması amacıyla da Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları Yönetmeliği (YEKA Yönetmeliği) 09/10/2016 tarihli ve 29852 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe girmiştir. Yönetmelik kapsamında YEKA olarak adlandırılan sahalarda kapasite tahsis yarışmaları yapılmaktadır. YEKA’lar ilgili yönetmelik kapsamında iki farklı yöntemle belirlenmektedir. Birinci yöntemde YEKA’lar Bakanlık tarafından gerçekleştirilen çalışmalar kapsamında belirlenerek Resmî Gazete’de ilan edilebilmektedir. İkinci yöntemde, gerçekleştirilen “YEKA Amaçlı Bağlantı Kapasite Tahsisi Yarışması”nı kazanan tarafından sözleşmenin imzalanması sonrasında bağlantı hakkı kazanılan bağlantı bölgesinde olacak şekilde aday YEKA’lar (proje sahaları) önerilmekte ve bu alanlar, Bakanlık tarafından uygun bulunması halinde YEKA olarak ilan edilmekte ve yatırımcıya üzerinde elektrik üretim tesisi kurulması amacıyla tahsis edilmektedir. Deniz üstü RES kapsamında duyurusu yapılan ilk yarışma ilanında kapasite tahsis yöntemi Bakanlık tarafından ilan edilen üç bölgede (Saros, Kırıkköy, Gelibolu) yapılmıştır.

YEKA Yönetmeliği (Yönetmelik) kapsamında belirlenecek yarışma tavan fiyatına ilişkin Yönetmeliğin 10 uncu maddesinin üçüncü fıkrası ile sınırlama getirilmiştir.

YEKA kapsamında yapılan yarışma ilanında belirlenen tavan fiyatın TL üzerinden belirlenmesine ilaveten vurgulanması gereken bir diğer husus da 30/01/2021 tarihli ve 31380 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan 3453 sayılı Cumhurbaşkanlığı Kararı’dır [47]. Söz konusu karar ile ABD Doları cent/kWh üzerinden uygulanan YEK Destekleme Mekanizması (YEKDEM) ve yerli katkı fiyatlarının TL/kWh üzerinden uygulanmasına karar verilmiştir. Böylece hem YEKA hem de YEKDEM kapsamındaki üretim tesislerine uygulanan destekleme mekanizmasının TL üzerinden devam etmesi, deniz üstü RES projeleri için duyurusu yapılacak olası bir yarışma ilanında, yarışma tavan fiyatının TL üzerinden belirlenmesi gerekeceği anlamına gelmektedir. Söz konusu Cumhurbaşkanlığı Kararı ile rüzgâr enerjisine dayalı projeler için YEKA modeli kapsamında uygulanacak bir yarışmada tavan fiyatın en yüksek 40 kuruş/kWh olacağı anlamına gelmektedir. (Rüzgâr enerjisine dayalı projeler için destekleme fiyatı 32 kuruş/kWh, yerli katkı fiyatı ise 8 kuruş/kWh olarak belirlenmiştir). Deniz üstü RES projelerinin karasal RES projelerine göre hem yatırım hem de işletme maliyetlerinin yüksek olması sebebiyle 40 kuruş/kWh üzerinden belirlenecek bir yarışma tavan fiyatının, yatırımcılar açısından düşük bulunabileceği değerlendirilmektedir. Bu kapsamda 3453 sayılı Cumhurbaşkanlığı Kararı’nda deniz üstü RES projeleri için de ayrı bir destekleme fiyatı belirlenmesinin gerekebileceği değerlendirilmektedir. Bu destekleme fiyatının ise karasal RES projelerine göre daha yüksek olması gerektiği önerilmektedir.

Deniz üstü RES projeleri kapsamında 2018 yılında yapılan yarışma ilanı ve olası diğer deniz üstü RES projelerinin YEKA modeli kapsamında ilan edilecek sahalarda yapılacağı değerlendirilmektedir. Ancak 5346 sayılı Kanun ve YEKA Yönetmeliğinde, YEKA olarak ilan edilen alanların “*kamu ve hazine taşınmazları ile özel mülkiyete konu taşınmazlar*” olarak tanımlandığı görülmektedir. Bu kapsamda YEKA olarak ilan edilen alanlarla kara üzerindeki arazilere atıf yapıldığı görülmektedir. Bu sebeple hem 5346 sayılı Kanuna hem de YEKA Yönetmeliği’ne, YEKA olarak ilan edilebilecek sahalarda içerisine “*Türk karasuları*” ifadesinin eklenmesinin hem mevzuatın kapsamını genişleteceği hem de Türk karasuları üzerinde de YEKA ilan edilebilmesine, enerji mevzuatı açısından yasal dayanak oluşturabileceği değerlendirilmektedir.

Kanunun 5 inci maddesinde ise; “*...Kıyı ve sahil şeritlerinden yararlanmada öncelikle kamu yararı gözetilir...*” hükmüne yer verilmiştir.

“Kıyının Korunması, Yapı Yasağı, Kıyı ve Denizde Yapılacak Yapılar” başlıklı 6 ncı maddesinde, kıyılarda imar planı kararları ile yapılabilecek yapılar tanımlanmış, 10/12/2018 tarihli ve 30621 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe giren 7153 sayılı Kanun ile Kıyı Kanunu’nun 6 ncı maddesine ilave hükümler eklenmiş, bu çerçevede imar planı kararları ile yapılabilecek yapılara deniz üstü RES projeleri ve iletim hatlarının inşa edilebilmesine ilişkin hüküm eklenmiştir. Bakanlık tarafından ilan edilen ilk deniz üstü RES yarışma ilanının yapıldığı 2018 yılı içerisinde Kıyı Kanunu’na ilave hükümler eklenerek Kıyı Kanunu çerçevesinde kıyılara deniz üstü RES üretim tesislerinin ve enerji nakil hatlarının inşa edilebilmesine olanak tanınmıştır.

7. TÜRKİYE İÇİN DENİZ ÜSTÜ RES PROJELERİ KAPSAMINDA SÜREÇ ÖNERİSİ VE SONUÇLAR

Bu bölüme kadar dünyada deniz üstü RES projelerine ilişkin ülke örnekleri incelenmiş, Türkiye’de 2018 yılında yayımlanan deniz üstü RES yarışma ilanı ile ilan sonrası yapılan çalışmalara yer verilmiş ve Türkiye’deki güncel mevzuat hükümleri çerçevesinde deniz üstü RES projelerine ilişkin hukuki düzenlemeler incelenmiştir. Bu bölümde ise incelenen tüm bu süreçler çerçevesinde Türkiye için deniz üstü RES projelerinin gelişimine yönelik yol haritasının nasıl olması gerektiğine ilişkin çeşitli önerilerde bulunulmuştur.

Türkiye için deniz üstü RES projelerinin gelişimi ile ilgili yapılacak analizlerde öncelikle karasal RES projelerinin mevcut durumunun, diğer bir ifadeyle Türkiye’deki yaygınlığının analiz edilmesi gerekmektedir. Türkiye’de karasal RES projeleri bakımından hâlihazırda işletmede veya kısmi işletmede olan projelere inşası devam eden ve önlisans aşamasındaki projeler eklendiğinde yaklaşık 16 GW kurulu gücünde bir kapasite tahsisi gerçekleştirilmiştir [48]. Bilindiği üzere 2006 yılında yayımlanan Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası’na göre Türkiye’de kurulabilecek rüzgâr enerjisine dayalı santrallerin toplam kapasitesi yaklaşık olarak 48 GW olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamada karasal RES’lerin kapasitesi 38 GW, deniz üstü RES kapasitesi ise 10 GW olarak belirlenmiştir. Bu kapsamda, karasal RES projeleri için mevcut potansiyelin tamamının henüz kullanılmadığı görülmektedir.

Bilindiği üzere, Marmara Bölgesi Türkiye’de elektrik üretim tesislerinin yoğun olarak yer aldığı ve elektrik enerjisi tüketiminin görece yüksek olduğu bölgeler arasındadır. Bu bölgedeki elektrik enerjisi üretimi ise yoğun olarak bölgede bulunan termik santrallerden karşılanmakta ayrıca buradaki yoğun tüketim iletim şebekesi için de yük oluşturmaktadır. Bu sebeple bu bölgedeki enerji ihtiyacının büyük ölçekli temiz enerji kaynaklarından sağlanması hem bu bölgedeki çevresel etkiler açısından olumsuz bir durum yaratmayacak hem de bölgenin enerji talebi karşılanmış olacaktır. Buna karşılık bu bölgede, kara üzerinde büyük ölçekli yenilenebilir enerji kaynağına dayalı tesis inşa edilmesi de mümkün olamamıştır. Bu bölgedeki aritmetik nüfus yoğunluğunun yüksekliğine bağlı sık yapılaşmanın yaygınlığı sebebiyle kara üzerinde büyük ölçekli yatırım için yeterli alan bulunmasında yaşanan güçlük bu durumun en önemli sebeplerindendir. Ancak deniz üzerine gelindiğinde, hem deniz üzerinde elektrik enerjisi üretimi için düzgün formda ve yüksek hızlarda rüzgâr bulunmakta hem de tesis kurulumu için yeteri kadar saha bulunmaktadır. Düzgün bir planlama yapılması durumunda bu bölgelerde büyük ölçekli deniz üstü RES projelerinin kurulumu sağlanarak bölgenin enerji ihtiyacında ciddi bir rahatlama sağlanabilir.

Türkiye için deniz üstü RES projeleri kapsamında yapılacak başka bir genel değerlendirme ise deniz üstü RES projelerinin deniz sahalarındaki konumlarının belirlenmesiyle ilgilidir. Türkiye sığ denizlere sahip bir ülke olmayıp kıyından uzaklaştıkça deniz derinlikleri rüzgâr türbini temellerini inşa etmeye izin vermemektedir. Bu sebeple Türkiye’de inşa edilecek projelerin kıyıya yakın olması doğal bir zorunluluktur. Böylece inşa edilecek enerji nakil hattı maliyeti de büyük miktarda artmamış olacaktır. Türkiye’nin kıyısı olduğu denizlerin sahip olduğu özel durum göz önüne alındığında, rüzgâr türbini temeli olarak yüzer sistemlerin kullanılması bir öneri olarak getirilebilir ancak bu durum şu aşamada Türkiye için uygulanması güç bir kapsamı işaret etmektedir.

Türkiye için deniz üstü RES projeleri kapsamında yapılacak diğer bir değerlendirme ise bu projelerin maliyetleri ile ilgilidir. Türkiye için yapılacak deniz üstü RES projesinin ilk yatırım maliyetinin uluslararası raporlarda açıklanan seviyelendirilmiş enerji maliyetlerine göre daha yüksek olması muhtemeldir. Bu sebeple yapılacak olası bir ihale duyurusunda projeye ilişkin seviyelendirilmiş enerji maliyeti hesabının çok detaylı bir şekilde yapılması hem maliyetin daha net ortaya konulması hem de ihale kapsamında belirlenecek tavan alım fiyatının tespitinde çok önemlidir. Dolayısıyla kaynak ve tesis türüne bağlı olarak değişkenlik gösteren seviyelendirilmiş enerji maliyetinin detaylı olarak ortaya konulması ihale duyurusu öncesinde tamamlanması gereken en kritik çalışmalardandır.

Bilindiği üzere Bakanlık tarafından 2018 yılında duyurusu yapılan yarışma ilanında kurulu güç 1.200 MW olarak belirtilmiştir. Üç faklı deniz sahası için bu büyüklükte bir ihale duyurusu esasen çok yüksek bir kapasite olarak değerlendirilmektedir. Deniz üstü RES tecrübesi olan ülkelerin incelenmesi neticesinde bu ülkelerin tamamının ilk ihale uygulamalarının görece daha küçük ölçekli projelerle başladığı, bu tesislerin kurulum aşamalarında elde edilen tecrübelerin daha büyük kurulu güçte projelere aktararak büyük güçteki projelerin kurulumunun ilerleyen süreçlere yayıldığı görülmüştür. Türkiye için de ilk ihale modelinin 1.200 MW gibi büyük bir kurulu güçten ziyade ihale koşullarına göre belirlenebilecek daha küçük kurulu güçte bir proje kapsamında ele alınmasının Türkiye’nin ve muhtemel yatırımcıların bu kapsamda tecrübe kazanması açısından önemli olacağı değerlendirilmektedir.

Türkiye için deniz üstü RES projelerinin ön hazırlık süreçleri ile ilgili değerlendirme yapılacak olursa, deniz üstü RES projelerini hayata geçiren bütün ülkelerin ön hazırlık aşaması olarak dört temel çalışma yaptığı görülmüştür. Bu çalışmalar;

- Denizde mekânsal planlama çalışmaları,
 - Deniz tabanına yönelik çalışmalar,
 - Deniz yüzeyinde oşinografi çalışmaları,
 - Projelere ilişkin çevresel etki analizi çalışmaları,
- şeklindedir.

Denizde mekânsal planlama çalışmalarının kapsamı sadece deniz üstü RES projeleri olmayıp ülkeler kendi karasularını bir bütün olarak değerlendirip bu suları enerji kaynakları, madencilik, ulaşım, turizm, sit alanları gibi farklı kapsamlarda ele alarak denizlerdeki uygulamaya esas her bir alanı belirlemiştir. Türkiye’de bu alanda bir planlama çalışması olmadığı görülmüştür.

Deniz tabanı ve deniz yüzeyine ilişkin araştırmaları içeren çalışmaların büyük oranda ihaleyi hazırlayan otorite tarafından hazırlanarak ihale şartnamesine ek olarak konulduğu tespit edilmiştir. Esasen ülkemizde yapılan ilk ihale duyurusunda da hazırlanan şartnameye, planlanan sahalara ilişkin veriler konulmuştur. Türkiye de bu kapsamda sahaya ilişkin veri sunumunun kamu tarafından sağlandığı yöntemi takip etmiştir. Ancak Türkiye ile ilgili özel durum bu verilerin deniz tabanı ve yüzeyine ilişkin yeterince bilgi sağlamadığı yönündeki eleştirilerdir. Deniz tabanına ilişkin veriler, rüzgâr türbini temellerinin inşası için çok önemli olup deniz tabanının bu kurulum için uygun olup olmadığının tespiti ya da uygun olsa bile yüksek maliyetlere sebep olup olmadığının tespiti açısından önemlidir. Bu çalışmalara ek olarak Türkiye’nin aktif fay hatlarına sahip olması sebebiyle deniz tabanında yapılan incelemelerin deprem ve tsunami riskini de ortaya koyacak şekilde hazırlanması büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmaları MTA Genel Müdürlüğü’nün hem bu alandaki bilgi birikimi ile tecrübesi hem de teknik yeterlilikler (Oruç Reis Sismik Araştırma Gemisi’ne sahip olması) bakımından sağlayabileceği değerlendirilmektedir.

Deniz üstü RES projeleri kapsamında yapılacak bir diğer ön çalışma ise bu projelerin çevresel etki değerlendirmesi ile ilgilidir. Bu değerlendirmede, projelerin hem deniz içerisinde hem de deniz üzerindeki göç rotalarını etkileyip etkilemediği, oluşacak elektromanyetik alanın ve proje geliştirme aşamasındaki gürültü faktörünün bu canlılara etkileri ve tesislerin işletilmesi esnasındaki titreşim etkilerinin analizi bu çalışmalar kapsamında ele alınması gereken konulardır.

Bu projelerin geliştirilmesi aşamasında ele alınması gereken önemli diğer bir husus da limanlarla ilgilidir. Bu projelerin geliştirilme sürecinin hemen her aşamasında özel gemiler kullanılmakta, gerek türbin temellerinin, gerek türbin kulesi ve motor gövdesinin gerekse türbin kanatlarının proje sahasına taşınması için özel liman ve gemi gereksinimleri bulunmaktadır. Bu sebeple proje geliştirilmek istenen deniz sahasındaki limanların bu projelerin kurulumu için gerekli ekipman lojistiği ve taşıma işlemleri için uygunluğunun değerlendirilmesi de gerekmektedir.

YEKA Yönetmeliğinin 1 inci maddesinde Yönetmeliğin amacı; büyük ölçekli yenilenebilir enerji yatırımlarının hızlı ve etkin bir şekilde kurulumunun sağlanması ile yenilenebilir enerji kaynaklarında yerliliğin artırılması ve teknoloji transferinin sağlanması olarak ifade edilmektedir. Öncelikle deniz üstü RES projeleri kapsamında büyük ölçekli yatırımların yapılması mümkün görülmekle birlikte ilk aşamada yerlilik ile ilgili hedeflere ulaşılabilmemesinin görece zor olduğu değerlendirilmektedir. Ülkemizde deniz üstü RES projeleri ile ilgili hâlihazırda bir piyasanın oluşmamış olması sebebiyle olası bir ihalede yerlilik şartının da bu durumlar gözeticilerle ele alınması gerektiği değerlendirilmektedir.

Türkiye için, ihalede belirlenecek yarışma tavan fiyatı için yapılacak değerlendirmede vurgulanması gereken en önemli husus 5346 sayılı “Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun” un dördüncü maddesinde 25/03/2020 tarihinde yapılan değişiklikle YEKA Yönetmeliği kapsamında kurulacak üretim tesisleri için belirlenecek tavan fiyatın TL üzerinden belirlenmesi zorunluluğudur. Kanun değişikliği sonrası Bakanlık tarafından duyurusu yapılan “YEKA RES-3” ile “YEKA GES-3”, “YEKA GES-4” ve “YEKA GES-5” yarışma ilanlarında yarışma tavan fiyatı TL üzerinden belirlenmiştir. Buna ek olarak 30/01/2021 tarihli ve 31380 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan 3453 sayılı Cumhurbaşkanlığı Kararı ile 1/7/2021 tarihinden 31/12/2025 tarihine kadar işletmeye girecek YEKDEM kapsamındaki tesislere uygulanacak destekleme fiyatlarında, TL üzerinden belirlenen fiyatlar açıklanmıştır. Bu çerçevede deniz üstü RES projeleri için yapılacak ihale duyurusunda da tavan fiyatın TL üzerinden olması güncel mevzuat hükümleri çerçevesinde zorunludur. 3453 sayılı Cumhurbaşkanlığı Kararı’nda rüzgâr enerjisine dayalı projeler için destekleme fiyatı 32 kuruş/kWh, yerli aksam desteği de 8 kuruş/kWh olarak belirlenmiştir. Bu destekleme fiyatlarının karasal RES projeleri referans alınarak belirlendiği, bu sebeple deniz üstü RES projeleri için de ayrı bir destekleme fiyatının belirlenmesi gerektiği değerlendirilmektedir. Söz konusu Cumhurbaşkanlığı Kararı ile TL üzerinden belirlenen destekleme fiyatlarının üçer aylık periyotlar halinde ÜFE, TÜFE, ABD Doları ve Avro kuru üzerinden karar verilmiştir.

Söz konusu formüle göre üçer aylık dönemler halinde YEKDEM fiyatlarında yapılacak güncellemede, yeni fiyatın geçerli olacağı üç aylık dönemin öncesindeki; ikinci veya beşinci aya ait üretici fiyat endeksi (ÜFE) ve tüketici fiyat endeksi (TÜFE) ile sırasıyla ikinci, üçüncü, dördüncü ve beşinci, altıncı, yedinci aylardaki ABD Doları ve Avro kurlarının ortalamasının hesaplamaya dâhil edilmesine karar verilmiştir. Bu güncelleme, destek fiyatlarının TL üzerinden belirlenmesiyle ilgilidir. Haliyle planlanacak bir deniz üstü RES yarışmasında, yarışma

tavan fiyatının TL üzerinden hangi fiyat olarak belirleneceğinin yanında bu fiyatın belirli periyotlar şeklinde hangi esaslara göre güncelleneceği de önem kazanmaktadır. Türkiye’de uygulanacak deniz üstü RES projeleri için uluslararası yatırımcıların bu tür bir yarışmaya katılımının sağlanabilmesi için güncelleme fiyatlarının sadece ABD Doları ve Avro kuru üzerinden belirlenmesinin daha etkili olabileceği değerlendirilmektedir.

Deniz üstü RES projeleri için önemli hususlardan birisi de kullanım ömrü tamamlanan türbinlerin sökülmesi ile ilgilidir. 20-25 yıllık bir kullanım ömrü olduğu değerlendirilen bu türbinlerin kullanımları tamamlandıktan sonra denizden kaldırılması önemli bir konudur. Bu kapsamda hazırlanacak bir şartnamede mutlaka bu tesislerin sökülmesinin nasıl yapılacağına ilişkin hükümlere yer verilmeli ve bu tesisin sökülmesi şirketin yükümlülüğü altında olmalıdır. Bu yükümlülüğü kapsamında ilgili otorite tarafından süreci garanti altına almak adına türbinlerin sökülmesine ilişkin şirketlerden ek teminat alınmasının özellikle çevresel kaygılar ile denizlere olası etkiler bakımından son derece önemli olduğu değerlendirilmektedir.

Ülke incelemelerinde elde edilen bilgiler çerçevesinde edinilen önemli bulgulardan biri denizler üzerinde geliştirilen bu projelerde mutlaka denizlerle ilgili düzenleyici bir kurumun sürece dahil olduğudur. Ülkemizde hâlihazırda denizlerle ve/veya su ile ilgili düzenleyici bir kurum bulunmamaktadır. Bu sebeple Türkiye Cumhuriyeti kararları üzerinde bu projelerin geliştirilmesi sürecinde denizler üzerinde kapsamlı bir bakış açısıyla süreci inceleyecek bir yapıya ihtiyaç duyulabileceği değerlendirilmektedir.

Yine ülke incelemelerinde elde edilen bulgulardan birisi de deniz üstü RES projeleri ile ilgili süreçlerin bazı ülkelerde belirli bir kurumun uhdesinde yürütülmesine karşın (Almanya, Danimarka, Hollanda), bazı ülkelerde ise (Birleşik Krallık, Belçika, Çin) birden çok kuruluşun koordinasyonu yürütülmesidir. Türkiye’de YEKA modelindeki süreçlerin Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yürütülmesi sebebiyle, deniz üstü RES projeleri için tek sorumlu kuruluş tarafından yönetilen modele uygun olduğu söylenebilir.

Almanya’da deniz üstü RES projelerinin gelişiminin sağlanması amacıyla kıyıda daha uzakta ve daha derine inşa edilen projelerde uygulanan destekleme mekanizmaları artmaktadır. Türkiye deniz sahalarının Kuzey Denizi ve Baltık Denizi gibi sığ denizler olmaması ve kısa mesafelerde derinleşmesi sebebiyle kıyıda çok fazla uzaklaşamayacağı değerlendirilmektedir. Bu sebeple destekleme mekanizmalarının kıyıda uzaklık veya derinliğe göre artırılmasından ziyade yerli ürün geliştirilmesi ve kullanılmasına yönelik teşvik mekanizmalarının daha uygun olacağı değerlendirilmektedir.

Sonuç itibarıyla, bu makalede deniz üstü rüzgâr santrallerine yönelik çeşitli ülkelerin iyi uygulamaları ve tecrübeleri ile bu projelerin geliştirilmesinde önem arz eden hususlar, gerekli mevzuat düzenlemeleri ve teşvik mekanizmaları karşılaştırılmalı analiz çerçevesinde detaylı şekilde irdelenmiştir. Ayrıca ülkemiz güncel elektrik piyasası mevzuatı kapsamında düzenleme bakış açısıyla değerlendirme yapılarak geniş kapsamlı süreç önerilerinde bulunulmuştur. Bu bağlamda bu çalışmanın, Türkiye’de önümüzdeki süreçte geliştirilmesi planlanan deniz üstü rüzgâr santrali projelerine yönelik ön hazırlık çalışmaları ve uygulamaya yönelik yapılması gereken işlemler ile gerekli mevzuat düzenlemelerine ilişkin sunulmuş olan öneriler kapsamında literature faydalı olacağı düşünülmektedir.

Yazarların Katkısı

Gökay Kütükcü: Literatür incelemesi ve araştırmaların yürütülmesine, makalenin yazımına, grafik ve tabloların oluşturulmasına katkı sağlamıştır.

Mehmet Yalılı: Makalenin konusu ve kapsamının belirlenmesine, içeriğinin derlenmesine, yazımına ve son okumasına katkı sağlamıştır.

Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

KAYNAKÇA

- [1] ESMAP. (2020). Offshore wind Technical Potential. <https://esmap.org/node/197070> (Erişim tarihi: Eylül 21, 2021).
- [2] Clean Energy Pipeline, “Eurpoe: Offshore Wind Outlook 2020,” <https://www.twobirds.com/~media/pdfs/offshore-wind-outlook-2020.pdf?la=en&hash=6644A5B33B3876F2BADB0B1AC7D1D696350C57FC> (Erişim tarihi: Ekim 25, 2021).
- [3] ESMAP. (2019). Expanding Offshore Wind to Emerging Markets. <https://www.worldbank.org/en/topic/energy/publication/expanding-offshore-wind-in-emerging-markets> (Erişim tarihi: Eylül 21, 2020).
- [4] GWEC. (2021). Global Offshore Wind Report 2020. <https://gwec.net/> (Erişim tarihi: Haziran 26, 2021)
- [5] Wind Europe. (2020). <https://windeurope.org/about-wind/history/> (Erişim tarihi: Eylül 1, 2021).
- [6] Offshore Wind Outlook 2019. (2019). <https://www.iea.org/reports/offshore-wind-outlook-2019> (Erişim tarihi: Haziran 31, 2021).
- [7] Wind Europe. (2021). Offshore Wind in Europe Key Trends and Statistics 2020.
- [8] The Crown Estate. (2019). Offshore Wind Operational Report. <https://www.thecrownestate.co.uk/en-gb/media->

- and-insights/stories/2020-the-crown-estate-2019-offshore-wind-operational-report-demonstrates-strength-and-maturity-of-the-uk-offshore-wind-industry/#:~:text=18%20June%202020,The%20Crown%20Estate%202019%20Offshore%20Wind%20Operational%20Report%20demonstrates%20strength,the%20UK%20offshore%20wind%20industry&text=Total%20electricity%20production%3A%2032TWh%20of,supply%2030%25%20of%20UK%20homes. (Erişim tarihi: Ekim 5, 2021).
- [9] NS Energy, “What is Hornsea One? Profiling the world’s largest offshore wind farm,” 2019. NS Energy.
- [10] OFGEM, “OFGEM,” 2021. <https://www.ofgem.gov.uk/publications-and-updates/list-all-electricity-licensees-including-suppliers> (Erişim tarihi: Ekim 3, 2021).
- [11] Marine Management Organization. (2021). Our MMO Story-the next ten years. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/901328/mmo_the_next_10_years_web.pdf (Erişim tarihi: Eylül 10, 2021)
- [12] UK Government, “Marine Licences,” 2021. <https://www.gov.uk/guidance/do-i-need-a-marine-licence> (Erişim tarihi: Ekim 4, 2021).
- [13] UK Government, “Marine Licence Necessary Documents,” 2018. <https://www.gov.uk/guidance/the-marine-licence-application-timeline> (Erişim tarihi Ekim 4, 2021).
- [14] Department of Trade and Industry. (2003). A Strategic Framework for the Offshore Wind Industry. https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/A_Strategic_Framework_for_the_Offshore_Wind_Industry.pdf (Erişim tarihi: Ekim 10, 2020)
- [15] The Crown Estate. (2020b). Seabed Survey Licence. <https://www.thecrownestate.co.uk/en-gb/what-we-do/on-the-seabed/seabed-survey-licences/> (Erişim tarihi: Ekim 5, 2021)
- [16] M. Welisch, “Auctions for allocation of offshore wind contracts for difference in the UK,” Oxford Inst. Energy Stud., 2019, doi: <https://doi.org/10.26889/9781784671297>.
- [17] UK Wind History 2019. <https://guidetoanoffshorewindfarm.com/offshore-wind-history> (Erişim tarihi Ekim 3, 2021).
- [18] Energy Transition, “Energy Transition,” 2020. <https://energytransition.org/> (Erişim tarihi: Ekim 9, 2021).
- [19] DENA, “Strategy of German Government on the offshore wind energy,” 2002. https://www.offshorewindenergy.org/COD/reports/report-files/report_033.pdf (Erişim tarihi: Ekim 10, 2021).
- [20] . German Offshore Wind Energy Foundation, “German Offshore Wind Energy Foundation,” 2020. <http://www.offshore-stiftung.de/en/offshore-windenergy> (Erişim tarihi: Ekim 13, 2020).
- [21] Sun&Wind Energy, “Sun&Win,” 2017. <https://www.sunwindenergy.com/offshore-wind-energy/dong-energy-inaugurates-gode-wind-1-2-offshore-wind-farms>.
- [22] BSH, “BSH General Info,” 2021. https://www.bsh.de/EN/TOPICS/Offshore/offshore_node.html (Erişim tarihi: Ekim 14, 2021).
- [23] P. Ursula, “Legal frame for the use of offshore wind energy in Germany,” in Baltic Environmental Forum 2009, pp. 10–14, 2009.
- [24] BSH, “German Site Deveelopment Plan,” 2021. https://www.bsh.de/EN/TOPICS/Offshore/Sectoral_planning/sectoral_planning_node.html (Erişim tarihi: Ekim 15, 2021).
- [25] Green Giraffe, “Green Giraffe,” 2021. <https://green-giraffe.eu/article/germany’s-new-offshore-wind-law-fit-purpose> (Erişim tarihi: Ekim 21, 2021).
- [26] Britannica, “Denmark Geography,” 2021. <https://www.britannica.com/place/Denmark> (Erişim tarihi: Ekim 27, 2021).
- [27] PM Network, “Vindeby Offshore Wind Farm,” 2019. <https://www.pmi.org/learning/library/top-50-projects-vindeby-offshore-wind-farm-11722>.
- [28] Danish Energy Agency, “Denmark Ongoing Offshore Wind Tenders,” 2020. <https://ens.dk/en/our-responsibilities/wind-power/ongoing-offshore-wind-tenders> (Erişim tarihi: Ekim 27, 2021).
- [29] Danish Energy Agency, “Danish Wind Energy Production,” 2020. <https://ens.dk/en/our-services/statistics-data-key-figures-and-energy-maps> (Erişim tarihi: Ekim 27, 2020).
- [30] CREG, “Belgian Regulatory Authorities,” 2021. <https://www.creg.be/nl/consumenten/energiemarkt/wie-doet-wat-op-de-energiemarkt> (Erişim tarihi: Ekim 26, 2021).
- [31] European Committee of the Regions, “Belgian Energy,” 2021. <https://portal.cor.europa.eu/divisionpowers/Pages/Belgium-Energy.aspx> (Erişim tarihi: Şubat 26, 2021).
- [32] CMS, “Belgium Ofshore Wind Regulations,” 2017. <https://cms.law/en/int/expert-guides/cms-expert-guide-to-offshore-wind-in-northern-europe/belgium> (Erişim tarihi: Şubat 27, 2021).
- [33] Ministry of Economic Affairs and Climate Policy. (2020). Offshore Wind Energy Roadmap 2030. <https://english.rvo.nl/sites/default/files/2018/03/Letter-Parliament-Offshore-Wind-Energy-2030.pdf> (Erişim tarihi: Haziran 11, 2021)
- [34] IEA, “Dutch Offshore Wind Energy Act,” 2016. <https://www.iea.org/policies/6121-netherlands-offshore-wind-energy-act-wet-wind-op-zee> (Erişim tarihi: Haziran 11, 2021).
- [35] National Enterprise Agency, “Offshore Wind Energy in the Netherlands,” 2015. https://www.rvo.nl/sites/default/files/2015/03/Offshore_wind_energy_in_the_Netherlands.pdf

- (Erişim tarihi: Haziran 11, 2021).
- [36] World Forum Offshore Wind, “Offshore Wind Worldwide ‘Regulatory Framework in Selected Countries,’” Hamburg, 2020.
- [37] WFO. (2021). Global Offshore Wind Report. https://wfo-global.org/wp-content/uploads/2020/06/WFO_Global-Offshore-Wind-Report-2020.pdf (Erişim tarihi: Haziran 1, 2021)
- [38] M. DeCastro, S. Salvador, M. Gomez-Gesteria, X. Costoya, D. Corvolha, and F. J. Sanz-Larruga, “Europe, China and the United States: Three different approaches to the development of offshore wind energy,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 109, pp. 55–70, 2019.
- [39] The State Council, “State Oceanic Administration,” 2014. http://english.www.gov.cn/state_council/2014/10/06/content_281474992889983.htm (Erişim tarihi Haziran 2, 2021).
- [40] UNESCO, “China Marine Spatial Planning Programme,” 2021. <http://msp.ioc-unesco.org/world-applications/asia/china/> (Erişim tarihi Haziran 2, 2021).
- [41] The State Council, “National Energy Administration,” 2014. http://english.www.gov.cn/state_council/2014/10/01/content_281474991089761.htm (Erişim tarihi Haziran 2, 2021).
- [42] REVE, “China’s Offshore Wind Energy Industry Post-2021,” 2020. <https://www.evwind.es/2020/10/22/chinas-offshore-wind-energy-industry-post-2021/77839> (Erişim tarihi: Mart 3, 2021).
- [43] Resmi Gazete, “Deniz Üstü RES Yarışma İlanı,” 2018. <https://www.resmigazete.gov.tr/ilanlar/eskiilanlar/2018/06/20180621-4.htm#Ç02>.
- [44] Shura. (2018). Enerji dönüşümünü destekleyen düzenleyici çerçevenin güçlendirilmesi için YEKA ihalelerini daha etkin kılan fırsatlar. https://www.shura.org.tr/wp-content/uploads/2019/01/SHURA_Enerji-dönüşümünü-destekleyen-düzenleyici-çerçevenin-güçlendirilmesi-YEKA-ihalelerini-daha-etkin-kılan-fırsatlar-1.pdf (Erişim tarihi: Haziran 18, 2021)
- [45] EnerjiPortali, “Türkiye, Danimarka İle İşbirliği Yaparak Deniz Üstü RES Projelerine Başlıyor,” <https://www.enerjiportali.com/turkiye-danimarka-ile-isbirligi-yaparak-deniz-ustu-res-projelerine-basliyor/> (Erişim tarihi: Ekim 27, 2021).
- [46] Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, “Türkiye Rüzgâr Potansiyeli Atlası,” 2020. <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-ruzgar> (Erişim tarihi: Ekim 19, 2021).
- [47] Resmi Gazete, “Yeni YEKDEM Mekanizması,” 2021. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2021/01/20210130-9.pdf>. (Erişim tarihi: Ekim 5, 2021)
- [48] EPDK, “Elektrik Piyasası Üretim Lisansları,” *EPVYS*, <http://lisans.epdk.gov.tr/epvys-web/faces/pages/lisans/elektrikUretim/elektrikUretimOzetSorgula.xhtml> (Erişim tarihi: Ekim 5, 2021).



Öğütülmüş Taneli Yüksek Fırın Cürüflü Kütle Betonlarında Sıcaklık Artışı ve Dayanım Gelişmesi Üzerine Bir Vaka Araştırması

A Case Study on Temperature Rise and Strength Development in Ground Granulated Blast Furnace Slag Mass Concretes

¹Kambiz RAMYAR , ²Nuri HARTA , ³Berna KOLUKISA 

¹Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Bornova/İzmir, Türkiye

²Kent Beton Kalite Kontrol ve Güvence Müdürü, İzmir, Türkiye

³Kentçim Kalite Kontrol Müdürü, İzmir, Türkiye

¹kambiz.ramyar@ege.edu.tr, ²nuriharta@kentcim.com,

³bernakolukisa@kentcim.com

Araştırma Makalesi/Research Article

ARTICLE INFO

Article history

Received : 29 December 2021

Accepted : 27 February 2022

Keywords:

Mass Concrete, Blast Furnace Slag, Temperature Rise, Strength Development

ABSTRACT

In this study, the temperature rise and strength development in 94000 m³ volume and up to 2-3 m deep reinforced concrete foundations of some high-rise buildings were investigated. In the preliminary study, the temperature rise was recorded in the core and surface of 1.5-2 m cubic mock-up blocks. The rate of strength development in slag concrete within first 7 days was found to be lower than that of the control mix containing a portland composite cement. However, beyond 7 days there was a considerable increase in the rate of strength development so that equivalent strength was obtained at 28 days. The negligible difference between the temperatures recorded in the mock-up and field concrete was attributed to the concrete placement temperature and ambient temperature. The temperature in core concrete reached its maximum value (55 to 64°C) within 42 to 60 hours, prolonging with the increase in placement temperature of concrete.

© 2022 Bandırma Onyedi Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Science. Published by Dergi Park. All rights reserved.

MAKALE BİLGİSİ

Makale Tarihleri

Gönderim : 29 Aralık 2021

Kabul : 27 Şubat 2022

Anahtar Kelimeler:

Kütle Betonu, Yüksek Fırın Cürüflü, Sıcaklık Artışı, Dayanım Gelişimi

ÖZET

Bu çalışmada bazı çok katlı yapıların, 94000 m³ hacme ve 2-3 m'ye varan derinliğe sahip temellerinde kullanılan cürüflü betonlarda adyabatik sıcaklık artışı ve basınç dayanımı gelişmesi incelenmiştir. Ön araştırma kapsamında betondaki hidratasyon ısısının yol açtığı sıcaklık artışı 1.5-2 m ayrıtlı küp bloklarda, bloğun çekirdeği ve yüzeyinde kaydedilmiştir. Portland kompozite çimentosu içeren betona kıyasla cürüflü betonda dayanım gelişmesinin özellikle ilk 7 günde düşük olduğu, ancak bu yaştan sonra kayda değer mertebede arttığı, 28 günde kontrol karışımı dayanımına eşitlendiği tespit edilmiştir. Ön çalışmada ve temel betonlarında kaydedilen sıcaklıkların arasındaki ihmal edilebilecek farkın, betonun yerleştirme sıcaklığı ve ortam sıcaklığından kaynaklandığı kanısına varılmıştır. Dökümden 42-60 saat sonra beton sıcaklığının 55-64°C arasında değişen sıcaklıklarda pik yaptığı, pik sıcaklığın bağlayıcı miktarından ziyade betonun yerleştirme sıcaklığından etkilendiği belirlenmiştir.

© 2022 Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi. Dergi Park tarafından yayınlanmaktadır. Tüm Hakları Saklıdır.

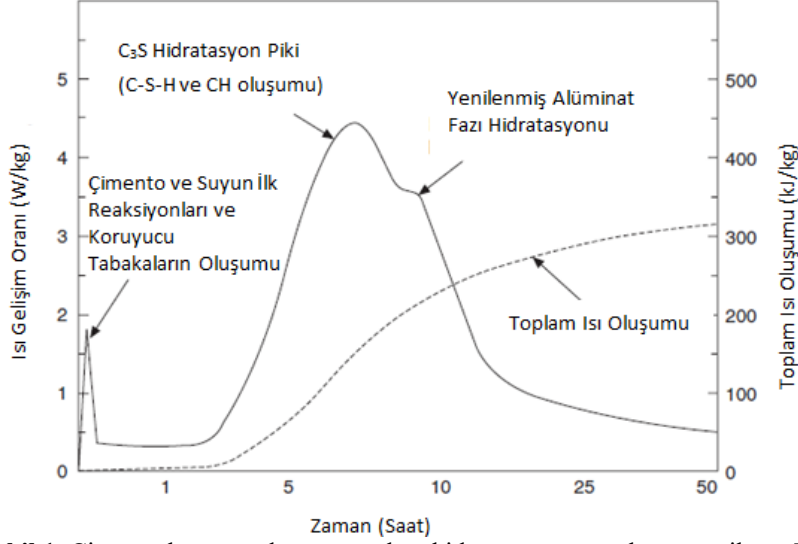
ORCID ID: ¹0000-0003-2200-2691

²0000-0003-1410-9245

³0000-0002-5974-718X

1. GİRİŞ

Portland çimentosunun bileşenleri, döner fırında yüksek sıcaklıkta oluşan reaksiyonların dengede olmayan ürünleri olduğundan yüksek enerjili konumdadır. Hidratasyon esnasında bileşenler, kararlı ve düşük enerji konumuna geçmek için su ile reaksiyona girmektedir. Bu reaksiyonun sonucunda yarısı ilk 1-3 günde olmak üzere 120 cal/g (~500 kJ/kg)'a varan ısı açığa çıkmaktadır (Şekil 1). 1 m³ betondaki her 100 kg'lık çimento artışının, sertleşmekte olan betonun dökümden 18-72 saat sonraki sıcaklığını 10-15°C arttırdığı bilinmektedir. Bu sıcaklık artışının mertebesi döküm anındaki sıcaklığa, çimento inceliğine ve çimentonun kimyasal bileşimine bağlı olarak değişmektedir [1].



Şekil 1. Çimento hamurunda ortaya çıkan hidratasyon ısısının hızı ve miktarı [2].

Katı maddeler genelde ısıtıldığında genişmekte, soğutulduğunda ise büzülmemektedir. Sıcaklıktan kaynaklanan deformasyonlar malzemenin ısıl genişleme katsayısına ve sıcaklık değişimi seviyesine bağlıdır. Aşırı koşullar dışında, geleneksel betonarme elemanlar ilk günlerde hidratasyon ısısından kayda değer oranda etkilenmemektedir. Ancak, hidratasyon ısısının hızlı şekilde sönmelenemediği kütle betonlarında oluşan sıcaklık oldukça yüksek seviyelere ulaşabilmektedir. Isının yayılmasıyla, betonun kolayca ısı kaybeden yüzeyi ile iç bölümleri arasında oluşabilecek büyük sıcaklık farkları, betonda çekme gerilmeleri ve ısıl büzülme çatlaklarının oluşmasına yol açabilmektedir. Bu çatlakların yapısal bütünlük ve monolitik davranışın kaybolmasına, geçirgenliğin artmasına, estetik açıdan olumsuzluğa ve yapının işletme ömrünün kısalmasına neden olmaması için betonun tasarımı ve uygulamasında gereken önlemler alınmalıdır. Isıl büzülme çatlakları, elemandaki en düşük ve en yüksek sıcaklık değerleri arasındaki fark, betonun ısıl genişleme katsayısı, çekme dayanımı ve elastisite modülüne bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Beton elemandaki en düşük ve en yüksek sıcaklık farkının belirli değerler altında olmasını sağlayan önlemlerden biri/birkaçı veya tamamının bir arada etkili bir şekilde kullanılmasıyla kütle betonlarında sıcaklık farkından kaynaklanan çatlak riskinin azaltılması veya ortadan kaldırılması mümkündür [3].

Betonun elastisite modülü, kısıtlanma durumu ve gerilme gevşemesi seviyesine bağlı olarak soğuma esnasındaki büzülmeden kaynaklanan çekme gerilmesi, düşük çekme dayanımına sahip genç betonun çatlamasına yetecek seviyede olabilmektedir. Örneğin, betonun genişleme katsayısının (α) $8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, sıcaklık artışının (ΔT) ise 30°C olduğu varsayılırsa, betonun ortam sıcaklığına soğumasıyla oluşacak ısıl büzülme $\epsilon = \alpha \Delta T$ yani 240×10^{-6} mm/mm olacaktır. Betonun erken yaşlardaki elastisite modülünün 15000 MPa olduğu ve elemanın tam olarak kısıtlandığı kabul edilirse, soğumanın yol açacağı çekme gerilmesi $\epsilon \cdot E = 240 \times 10^{-6} (15000) = 3.6$ MPa hesaplanacaktır. Betonun o andaki çekme dayanımının hesaplanan bu değerden düşük olması durumunda betonun çatlaması kaçınılmazdır. Ancak, betonda oluşan gerilme gevşemesi nedeniyle toplam çekme gerilmesinin hesaplanan değerden bir miktar daha düşük olacağı unutulmamalıdır.

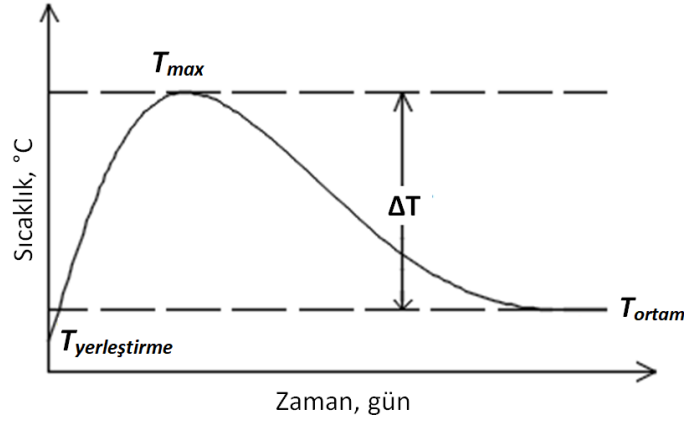
Kütle beton yapıların tasarımı ve yapımında, yapının çatlaksız ve monolitik olması birincil hedef olduğundan betonun sıcaklığını kontrol etmek için malzeme seçimi, karışım oranları, uygulama ve kürleme koşullarına dikkat edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, kütle betonlarında betonun yerleştirme sıcaklığının düşük tutulması ve hidratasyon ısısının açığa çıkma hızının yavaş olması sağlanmalıdır.

2. BETONDAKİ ISIL GERİLMELERİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

2.1. Sıcaklık Farkı

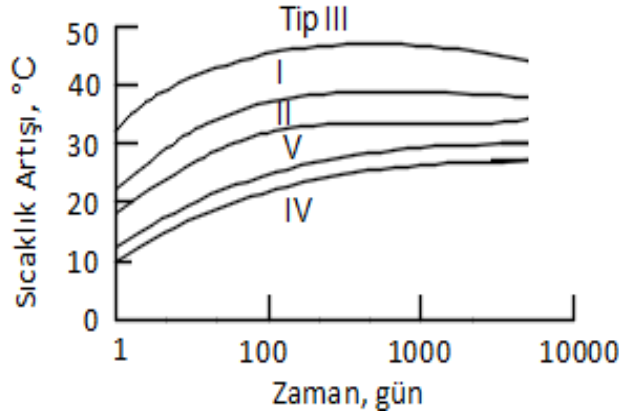
Sıcaklık farkı (ΔT), betonda ölçülecek en yüksek sıcaklık ile ortam sıcaklığı (yapının bulunacağı sıcaklık) arasındaki fark olarak ifade edilmekte olup Şekil 2'de de gösterildiği üzere "betonun yerleştirme sıcaklığı + adyabatik sıcaklık artışı - ortam sıcaklığı" olarak hesaplanabilir. Buna göre yerleştirme sıcaklığının azaltılması betonda oluşacak ısıl

çatlakların önlenmesi için kullanılabilir en etkili yollardan biri olmaktadır. Taze betonun soğutulması, oluşacak sıcaklık farkını azaltmaktadır. Sıcaklığı 10°C veya altına sınırlanan kütle betonlarında, çoğu zaman soğutulmuş agrega ve/veya buz kullanılmaktadır. Karıştırma sırasında buzun erimesi için gereken ısı, betonun diğer bileşenlerinin etkili bir şekilde soğumasını sağlamaktadır.



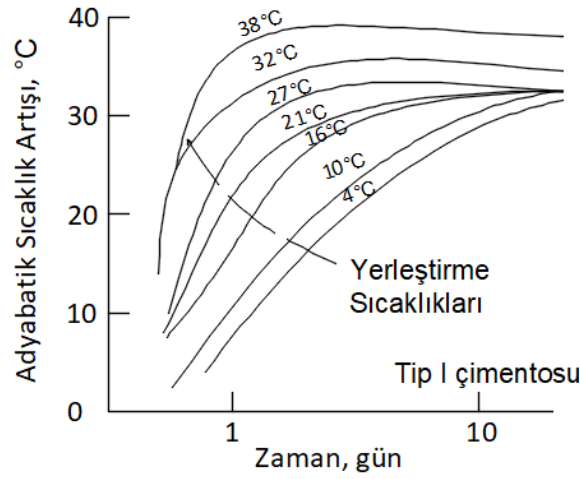
Şekil 2. Sertleşmekte olan betonda zamanla oluşan sıcaklık değişimi [4].

Betondaki adyabatik sıcaklık artışı, çimentonun miktarı, bileşen kompozisyonu ve inceliği ile hidrasyon esnasındaki sıcaklığa bağlıdır. Çimento inceliğinin ve C₃A - C₃S bileşenlerinin artışının, hidrasyon ısısını arttırdığı bilinmektedir. 220 kg/m³ çimento içeren betonda, inceliği fazla ve nispeten yüksek oranda C₃A - C₃S içeren çimentonun yol açacağı sıcaklık artışının, inceliği daha az ve düşük seviyede C₃A - C₃S içeren çimentoya göre 22°C daha yüksek olduğu açıklanmıştır. 220 kg/m³ dozajında beş farklı ASTM portland çimentosu içeren kütle betonlarının adyabatik sıcaklık artışı eğrileri Şekil 3'te gösterilmiştir. Görüldüğü gibi, Tip I portland çimentosu veya %5'in altında C₃A içeren sülfata dirençli çimento (Tip V) ile üretilen betonun ilk yaşlardaki adyabatik sıcaklık artışları arasında yaklaşık 10-12°C fark bulunmaktadır [4, 5].



Şekil 3. 220 kg/m³ çeşitli ASTM tipi portland çimentosu içeren betonların adyabatik sıcaklık artışı [4].

Şekil 4'te görüldüğü gibi betonun yerleşirme sıcaklığı oluşan toplam sıcaklık artışından ziyade, esas olarak ısının açığa çıkma hızını etkilemektedir. Buna göre örneğin, yerleşirme sıcaklığı 10 ve 21°C olan betonların 1 günlük adyabatik sıcaklık artışları sırasıyla 10 ve 22°C iken ilerleyen zamanlardaki adyabatik sıcaklık artışları benzerdir. Bu da yerleşirme sıcaklığı 21°C olan betonda ısının ortaya çıkışının, 10°C yerleşirme sıcaklığına sahip betonunkinden çok daha hızlı olduğunu göstermektedir.



Şekil 4. 220 kg/m³ normal çimento içeren kütle betonunun yerleştirme sıcaklığının adyabatik sıcaklık artışına etkisi [4].

2.2. Mineral Katkı Kullanımı

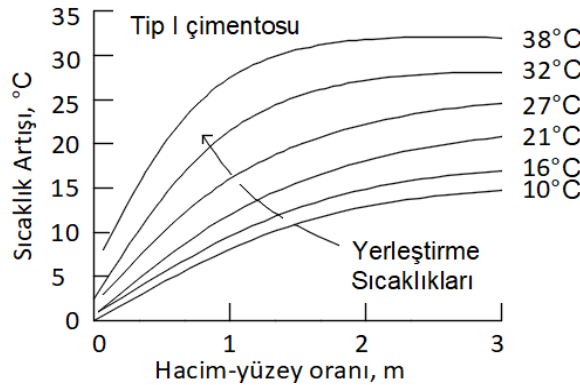
Adyabatik sıcaklık artışının kontrol altına alınması için etkili diğer bir yöntem portland çimentosunun bir bölümünün yerine uygun bir mineral katkı kullanılmasıdır. Bu amaçla doğal puzolanlar kullanılabileceği gibi, taş kömürü yakılan termik santral atığı uçucu kül veya ham demir üretimi yan ürünü olarak ortaya çıkan yüksek fırın cürufu (YFC) gibi mineral katkılar da tercih edilmektedir. 220 kg/m³ ASTM Tip II (C₃A oranı < %8) çimentosu içeren betonda, çimentonun ağırlıkça %25'i yerine doğal puzolan kullanılması durumunda 3 günlük sıcaklık artışının 23°C'den 18°C'ye düştüğü bildirilmiştir [3]. Benzer şekilde cürufu çimento kullanımı ile hidrasyon ısısının azaltılmasıyla hem betonda oluşacak maksimum sıcaklığın düşürülmesi, hem de maksimum sıcaklığa erişme süresinin uzatılması mümkündür [6, 7]. Ayrıca mineral katkıların, betonun sülfat ve klorür gibi zararlı kimyasallara veya betonda oluşabilecek alkali-silis reaksiyonuna karşı direncini artırdığı da bilinmektedir [8, 9].

Yukarıda sıralanan teknik avantajlara ek olarak mineral katkıların çimentoya ikame edilmesinin katkı fiyatına da bağlı olarak, betonun maliyetini azaltma potansiyeli bulunmaktadır. Ayrıca 1 ton çimentonun üretimi esnasında yaklaşık 1400 kg hammadde (kireçtaşı, kil ve alçıtaşı) kullanılmakta ve daha önemlisi atmosfere yaklaşık 850 kg CO₂ salınmaktadır. Bu bakımdan daha çevreci bir beton elde edilebilmesi için sanayi atığı mineral katkıların mümkün olduğu kadar yüksek oranlarda çimento yerine değerlendirilmesi önem arz etmektedir.

Son yıllarda yüksek fırın cürufunun aktivitesini artırmak amacıyla katkıya kalsiyum sülfat gibi çeşitli malzemeler katılabilmektedir. Bu tip cürufular, kütle betonunda kullanılmaya elverişli değildir. Çimentonun kısmi olarak bu tip cürufu ile ikame edilmesinin betonun adyabatik sıcaklığını azaltmak yerine arttırabileceğini gösteren araştırmalar bulunmaktadır. Bu nedenle kütle betonunda kullanılacak cürufun incelenerek seçilmesi önem arz etmektedir [10].

2.3. Elemanın Hacim/Yüzey Alanı (V/A) Oranı

Betonarme temelerde temel yüksekliğini ifade eden bu oranın artışıyla adyabatik sıcaklık yükselmektedir. Örneğin, 220 kg/m³ normal portland çimentosu içeren betonarme bir yapıda V/A oranının 0.5 m'den 2 m'ye çıkması sıcaklık artışını, yerleştirme sıcaklığına da bağlı olarak, 8-15°C aralığında arttırmaktadır. Betonun V/A oranı ve yerleştirme sıcaklığının adyabatik sıcaklık artışına etkisi Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. 220 kg/m³ normal portland çimentosu içeren kütle betonunun yerleştirme sıcaklığı ile V/A oranının sıcaklık artışına etkisi [4].

2.4. Isı Kaybı

Betonun ısı kaybı ısıl özelliklerine ve yapım teknolojisine bağlıdır. Yüzeyinden soğumaya başlayan bir yapıda ısı kaybı, beton yüzeyinin temas ettiği ortamdaki büyük ölçüde etkilenmektedir. Tablo 1’de görüldüğü gibi beton yüzeyinin hava yerine kür suyu ile temasta olması, yüzey iletim katsayısını yaklaşık 30 kat artırmaktadır.

Tablo 1. Farklı ortamların yüzey iletim katsayıları [4].

Yalıtımın türü	Yüzey iletim katsayısı (kcal/m ² .h.°C)
Beton-hava	11.6
Beton-kür suyu	300.0
Beton-ahşap-hava	2.6
Beton-metal-hava	11.6
Beton-izolasyon malzemesi-hava	2.0

Kütle betonunda ısıl deformasyondan kaynaklı çatlakları önlemek için betonun çekirdeği ile yüzeyi arasındaki sıcaklık farkının 20-25°C’yi aşmaması tavsiye edilmektedir [3, 11]. Bu amaçla çekirdekteki maksimum sıcaklığı azaltmak için hidrasyon ısısı düşük bağlayıcının tercih edilmesi, bağlayıcı içeriğinin ve yerleştirme sıcaklığının mümkün oldukça azaltılması gibi önlemler alınmalı, beton ısıl çatlaklara karşı yeterli dirence ulaşmaya kadar yüzeyi uygun bir kaplama malzemesi ile kapatılmalıdır. Kaplama malzemesinin türü ve kalınlığı, betonda oluşacak sıcaklık ile ortam sıcaklığı dikkate alınarak mock-up numunelerinde yapılan deneme çalışması ile belirlenmelidir.

Sertleşmekte olan betonda oluşan maksimum sıcaklık betonun kalıcılığı bakımından da hayati öneme sahiptir. Bu durum zaman zaman dış etkenlerden kaynaklanan zaman zaman da betonun kendi bünyesindeki malzemelerin neden olduğu durabilite sorunlarını beraberinde getirmektedir. Betonu yıpratıcı sülfatlar, genelde dış kaynaklıdır. Betona dışarıdan sızan sülfatlar nedeniyle oluşan etrenjit, “ikincil etrenjit” olarak adlandırılmaktadır. Ancak, bazı durumlarda sülfat kaynağı dışsal olmayıp betonun kendi bünyesinde bulunmaktadır. Bu durumda oluşan ve betona zarar veren etrenjit “gecikmiş etrenjit” olarak tanımlanır. Uzun süredir bilinen bu olaya, genelde alçıya bulaşmış agrega veya yüksek sülfat içerikli çimento yol açmaktadır. Yakın geçmişte buhar kürü uygulanan beton ürünlerde de gecikmiş etrenjit oluşumu görülmüştür. 65°C’nin üzerinde kararlı olmayan etrenjit (C₃A.3C \bar{S} H₂.26H), ortama sülfat iyonu salarak monosülfata (C₃A.C \bar{S} H₂.16H) dönüşür. Söz konusu sülfat iyonları C-S-H tarafından emilir ve zaman içinde C-S-H bünyesinden boşluk çözeltilisine bu sülfat iyonları sızarak betonda yeniden etrenjit oluşmasına, genleşmeye ve çatlama neden olur [1, 4]. Benzer durum, hidrasyon ısısı nedeniyle sıcaklığı 65°C’nin üzerine çıkan ve yüksek sülfat içerikli çimento içeren kütle betonlarında da görülebilir.

Son yıllarda yüksek kıvam ve yüksek dayanıma sahip betona olan talebin artmasıyla, betonda kullanılması gereken bağlayıcı malzeme oranının kayda değer mertebede arttığı ayrıca vurgulanmalıdır. Buna ek olarak hidrasyon ısısı gelişimine büyük etkisi olan, çimento inceliği ile C₃S ve alkali içeriği, klinker üretimi ve öğütme teknolojisindeki gelişmelerle artmıştır. Buna göre kütle betonunda hidrasyon ısısının kontrol altına alınabilmesi için geçmişte başarıyla uygulanan bazı yöntemler günümüzde üretilen betonlar için yetersiz kalabilmektedir.

Bu araştırmada İzmir’de devam etmekte olan Allsancak, Evora ve Güçsan gibi projelerde yer alan çok katlı yapıların 2-3 m’ye varan kalınlıktaki temellerinde kullanılan cürüflü betonlar adyabatik sıcaklık artışı ve dayanım gelişmesi açısından incelenmiştir. Söz konusu projelerdeki yapıların temellerinde dayanım sınıfı C30/37 ile C45/55 arasında değişen ve S4/S5 çökme sınıfına sahip toplam 94000 m³ beton kullanılacaktır.

3. DENEYSEL ÇALIŞMADA KULLANILAN MALZEMELER

3.1. Çimento ve Yüksek Fırın Cürufu

Araştırmada TS EN 197-1 standardına uygun [12] CEM II/B-M(W-L) 42.5R tipi çimento kullanılmıştır. Üretici firma verilerine göre kullanılan portland kompoze çimentosunda yaklaşık %15-17 kalkerli uçucu kül ve %8-10 kalker tozu bulunmaktadır. Çalışmanın devam ettiği 6 ay boyunca çimentonun üretiminde kullanılan klinker, uçucu kül ve kalkerin özelliklerinin Tablo 2’de gösterilen biçimde değiştiği tespit edilmiştir. Bu analizlerin yapılmasında farklı tarihlerde rastgele alınan en az 12 numunenin sonuçları kullanılmıştır.

Tablo 2’de görüldüğü gibi çimento üretiminde kullanılan hammaddelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri aynı kaynaklardan temin edilmelerine rağmen 6 ay zarfında kayda değer değişiklikler göstermiştir. Bu bağlamda çimento özellikleri üzerinde önemli etkisi olan bileşen kompozisyonu ve inceliği ile uçucu kül davranışına etkisi olan incelik, SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ içeriği ve serbest kireç miktarındaki değişkenlik dikkate değerdir. Bu gibi değişikliklerin, üretilecek çimentonun özelliklerine olan kaçınılmaz etkisi beton karışım oranlarının belirlenmesinde dikkate alınmalıdır. Hammaddedeki bu değişiklikler çimentonun kimyasal bileşimi, fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde Tablo 3’te gösterilen değişikliklere neden olmuştur.

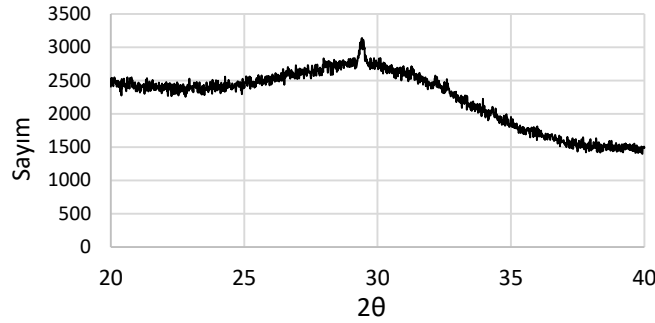
Tablo 4. Yüksek fırın cürufunun özellikleri.

Oksit kompozisyonu (%)		Fiziksel ve mekanik özellikler	
CaO	32.28	Blaine özgül yüzeyi (cm ² /g)	4650
Si ₂ O	38.93	Özgül ağırlığı	2.80
Al ₂ O ₃	12.32	45 mikron elek bakiyesi (%)	0.1
Fe ₂ O ₃	1.23	Priz başlangıcı (dakika)	Referans
MgO	6.94		Karışım*
SO ₃	1.00	Hacim sabitliği (mm)	0
Na ₂ O	0.68	Dayanım aktivitesi (%)	7 - günlük
K ₂ O	0.80		28 - günlük
Kızdırma kaybı	0.15	* %50 CEM I 42.5 R + %50 öğütülmüş cüruf karışımı	

Tablo 5. Cürufun bazik indisleri/hidrolik modülleri [9].

İndis veya modül	%	Önerilen sınırlar
CaO / SiO ₂	0.83	0.3 - 1.4
(CaO+MgO) / SiO ₂	1.52	> 1.4
(CaO+MgO+0.67 Al ₂ O ₃) / (SiO ₂ +0.33 Al ₂ O ₃)	1.10	>1.0
(CaO+MgO+Al ₂ O ₃) / SiO ₂	1.32	>1.0
(CaO+MgO) / (SiO ₂ +Al ₂ O ₃)	0.77	1.0 - 1.3
(CaO+1.40 MgO+0.56 Al ₂ O ₃) / SiO ₂	1.27	>1.65

Şekil 6'da sunulan cürufun X-ışını difraktogramı, yaklaşık 29-2θ (Cu Kα) derecesinde pik noktası olan geniş bir kambur göstermektedir. Buradan malzemenin tamamına yakınının camsı yapıda olduğu anlaşılmaktadır. Görülen bariz pikin, cürufu az miktarda bulunan kalsit kristalinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

**Şekil 6.** Cürufun X-ışını difraktogramı.

3.2. Kimyasal Katkı

Beton karışımlarında polikarboksilat kopolimer tipi yüksek oranda su azaltıcı katkı kullanılmıştır. Kullanılan katkının pH'nın 5.34, yoğunluğunun 1.05, eşdeğer Na₂O içeriğinin %0.8 ve katı madde içeriğinin %55 olduğu üreticisi tarafından bildirilmiştir.

3.3. Agrega

Üretilen betonlarda 0/4, 4/11.2 ve 11.2/22.4 mm aralıklarında kırma kireçtaşı agrega kullanılmıştır. Karışık agreganın gradasyon eğrisinin TS 802 standardında [14] sınırları içinde yer alması için bu agregalar çeşitli beton karışımlarında sırasıyla %45-53, %16-22 ve %31-33 ağırlık oranlarında kullanılmıştır. Agreganın bazı fiziksel özellikleri Tablo 6'da verilmiştir. 6 aya yayılan çalışma esnasında kullanılan ince agreganın metilen mavisi değerinin 0.50 veya 0.75 olduğu, 0.125 mm elekten geçen yüzdesinin ise %11-14 aralığında olduğu belirlenmiştir.

Tablo 6. Agreganın bazı özellikleri.

Özellik	0/4 mm	4/11.2 mm	11.2/22.4 mm
KYD* Özgül ağırlık	2.68	2.70	2.70
Su emme kapasitesi (%)	1.1	0.64	0.35
Nem içeriği (%)	0.9	0.4	0.4

* Kuru yüzey doygun

4. BETON KARIŞIMLARI VE ÖZELİKLERİ

4.1. Taze Beton Özellikleri

Çalışma kapsamında 28 günlük silindirik karakteristik basınç dayanımı 30 ile 50 MPa arasında değişen 5 farklı sınıftaki yüksek fırın cürüflü beton tasarlanmıştır. Bu karışımlar C30, C35, C40, C45 ve C50 olarak adlandırılmış olup betonların karışım oranları Tablo 7’de verilmiştir. Tabloda KC40 olarak gösterilen kontrol karışımı, C40 karışımına yakın oranlar kullanılarak, cüruf içermeyecek şekilde (sadece CEM II/B-M 42.5R çimentosu ile) üretilmiştir. Betonlar karıldıktan 45-60 dakika sonrasında bile küçük (2/4 cm) çökme/çökme yayılma kaybıyla işlenebilirliğini korumuştur. Karışımların su/bağlayıcı oranının hesaplanmasında cürufa herhangi bir “k” katsayısı uygulanmamış, kullanılan su azaltıcı katkı miktarının %50’si ise karışım suyuna ilave edilmiştir.

Tablo 7. Betonların karışım oranları (kg/m³) ve bazı özellikleri.

Malzeme	C50	C45	C40	C35	C30	KC40
Çimento	200	190	180	160	160	360
Yüksek fırın cürufu	200	190	180	160	140	-
Su	168	165	160	155	155	163
Su azaltıcı katkı	5.0	5.8	6.3	6.2	6.0	5.8
DYK 0/4 mm	814	835	869	970	1020	868
DYK 4/11 mm	399	390	391	306	310	390
DYK 11/22 mm	587	580	596	615	600	592
BHA (teorik)	2373	2356	2382	2382	2391	2379
BHA (ölçülen)	2355	2360	2385	2368	2388	2385
Çökme (cm)	22	22	21*	21	22*	23
Çökme yayılma (cm)	48	44	40*	42	42*	40
Su /bağlayıcı oranı	0.43	0.44	0.45	0.49	0.52	0.46

*Değerler şantiyede model numune dökümü esnasında betonun üretiminden yaklaşık 1 saat sonra ölçülmüştür.

4.2. Basınç Dayanımı

Tablo 7’de verilen karışımlardan hazırlanan 100x200 mm silindirik numunelerin basınç dayanımı TS EN 12390-3 standardına [15] uygun olarak belirlenmiştir. Numunelerin alt ve üst yüzeyleri deneyden hemen önce, 1-2 mm aşındırmak suretiyle deneye hazır hale getirilmiştir. Sonuçların sunulduğu Tablo 8’de görüldüğü gibi farklı dayanım seviyesinde olan cürüflü betonların su/bağlayıcı oranları 0.43 ile 0.52 arasında değişmektedir. TS 802 standardında [14] 28 günlük, 30, 35, 40 ve 45 MPa silindirik (150x300 mm) basınç dayanımları için, hava sürüklenmemiş betonun su/çimento oranının sırasıyla 0.54, 0.47, 0.42 ve 0.37 olması ön görülmüştür. Bu değerler C30 karışımı dışında, araştırmada üretilen (aynı dayanım sınıfındaki) betonların su/bağlayıcı oranlarından 0.02 ile 0.07 arasında daha düşüktür. Bu fark C45 karışımında daha çarpıcıdır. Benzer şekilde cüruf içermeyen ve yaklaşık 47 MPa 28 günlük basınç dayanıma sahip olan KC40 karışımının da su bağlayıcı oranı (0.46), standartta 40 MPa dayanıma sahip beton için belirtilen değer (0.42) üstündedir. Bu sonuçlardan standartta, beton sınıfları için verilen su/bağlayıcı oranlarının genelde konservatif olduğu görülmüştür. Beklendiği gibi araştırılan C40 ve C45 betonlarında, su/bağlayıcı oranında 0.01 gibi küçük bir değişiklik, dayanımda 5 MPa gibi nispeten büyük değişikliğe yol açmış fakat dayanım sınıfı azaldıkça bu etki azalmıştır. C40 karışımı mock-up (model) numunesinden 31. günde altı adet 100x200 mm karot numunesi alınmıştır. Betonun bu yaştaki ortalama karot basınç dayanımının 42 MPa olduğu tespit edilmiştir. Tablodaki cüruf içermeyen KC40 karışımının sonuçları ilgi çekicidir. Bu karışım 28 günlük dayanımının %70 ve %83’ünü ilk 3 ve 7 günde kazanmıştır. Benzer oranlar cürüflü betonlarda ilk 3 günde %24-34 arasında iken ilk 7 günde %45-50 arasındadır. Ancak cürüflü betonların 7. günden sonra dayanım kazanma hızları büyük oranda artarak 28 günde kontrol karışımı dayanımına (hemen hemen) eşit olmuştur. Dahası bu karışımlarda dayanım kazanımı ikinci 28 günde de (%18’e varan oranlarda) devam etmiştir. Portland kompoze çimentosu ile üretilen betonun 56 günlük basınç dayanımının 28 günlük basınç dayanımından sadece %3.8 oranında daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu betonun üretiminde kullanılan çimento uçucu kül içermesine rağmen betonda 28. günden sonra kayda değer bir dayanım artışı görülmüştür. Bu nedenle standartta belirtilen aşırı miktarda mineral katkı içeren kütle betonlarında (gerekirse) dayanım değerlendirilmesinin 56 veya 90 günlük numunelerde yapılmasının mümkün olduğu bilgisi kullanılarak dayanım değerlendirmesi 56 günde yapılmıştır [3].

Tablo 8. Beton karışımlarının 100x200 mm silindir basınç dayanımları (MPa) ve dayanım oranları.

Karışım	C50	C45	C40	C35	C30	KC40
3-Gün	15.5	12.5	15.0	13.5	11.8	33.1
7-Gün	26.3	25.7	22.1	20.5	19.4	38.8
14-Gün	47.4	42.5	34.1	31.2	25.6	44.3
21-Gün	54.4	49.5	38.7	35.1	27.3	45.5
28-Gün	58.8	53.4	44.0	42.1	32.6	46.9
56-Gün	64.7	62.9	50.6	48.7	38.1	48.7
3/28*	0.26	0.24	0.34	0.32	0.36	0.70
7/28	0.45	0.48	0.50	0.49	0.59	0.83
14/28	0.81	0.80	0.78	0.74	0.78	0.94
21/28	0.93	0.93	0.88	0.83	0.84	0.97
56/28	1.10	1.18	1.15	1.16	1.17	1.04

*3 günlük/28 günlük dayanım oranı

4.3. Sıcaklık Gelişmesi

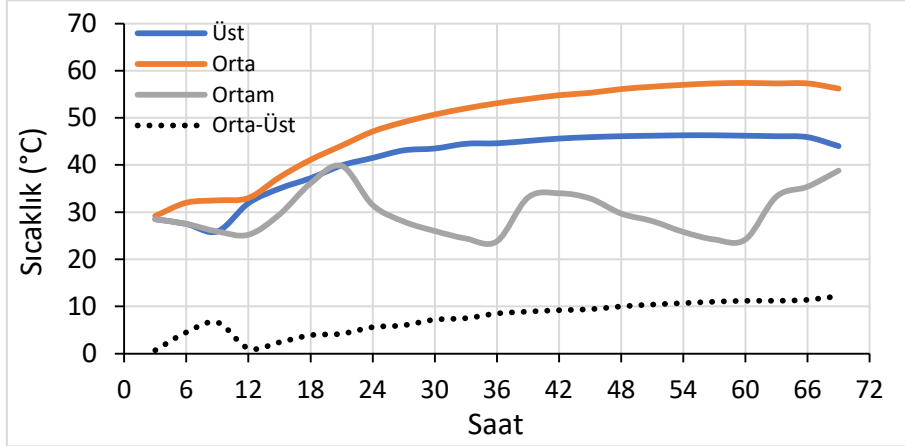
Basınç dayanımı gelişmesine ek olarak model numunelerde ve temellerde, temel uygulaması olmayan C50 dışındaki betonların hidrasyon ısısından kaynaklanan sıcaklık artışı ölçülmüştür. Bu amaçla çevresi 5 cm kalınlıkta XPS malzeme ile izole edilen 1.5-2 m ayrıtlı küp model numunelerin ve temel betonlarının çekirdeği (ortası) ile yüzeyinin 3 cm altına sıcaklık sensörü (termokupl) yerleştirilerek sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Numunenin yüzeyi ölçüm süresince bir kat naylon örtü ile kapatılmıştır. Kontrol amacıyla bazı mock-up örneklerinde naylon örtü kullanılmamıştır. Temel betonları, betonun priz almasından hemen sonra Şekil 7’de görüldüğü gibi naylon örtü ile kaplanmıştır. Seçilen bazı model numuneler ve/veya temellerin çekirdeği ile yüzeyinde ölçülen sıcaklıklar Şekil 8-14’te ortam sıcaklığı ve çekirdek-yüzey sıcaklık farkı ile birlikte gösterilmiştir. Grafiklerdeki üst ifadesi yüzeyden 3 cm derinlikteki sıcaklığı, orta ifadesi çekirdek sıcaklığını, ortam ifadesi ise ölçüm alınan andaki hava sıcaklığını, orta-üst ifadesi ise yüzey ve çekirdek arasındaki sıcaklık farkını belirtmektedir.



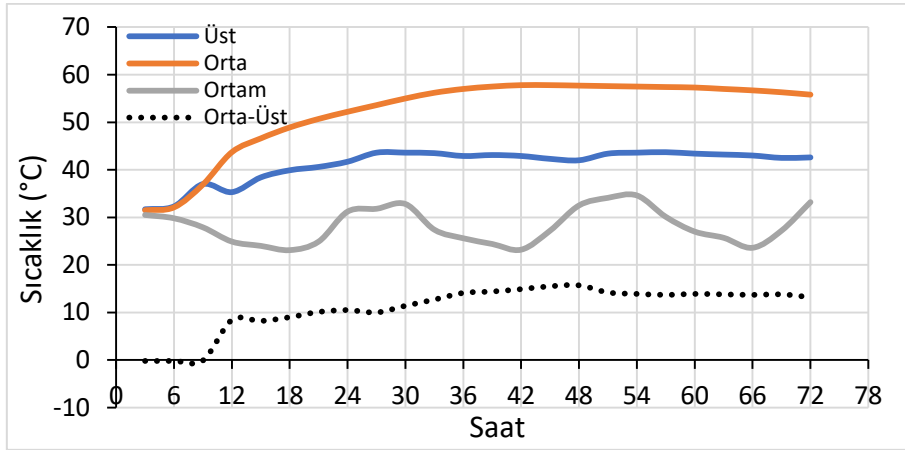
Şekil 7. Sertleşmekte olan temel betonuna örtülen naylon.

Şekil 8-14 ve Tablo 9 incelendiğinde araştırma kapsamında kullanılan cürüflü betonların 300 kg/m^3 (C30)- 380 kg/m^3 (C45) arasında değişen bağlayıcı içeriği ile betonun adyabatik sıcaklığı arasında herhangi bir ilişki bulunamamıştır. Bu durumun 6 aya yayılan sürede dökülen betonlarda kullanılan çimento ve/veya cürufun özelliklerinden ve betonun yerleştirme sıcaklığındaki farktan kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Ancak cürüflü betonlarda görülen adyabatik sıcaklık artışının 26.8 ile 31.4°C arasında değiştiği, bu değer cürufsuz KC40 betonunda 48.5°C ’ye yükseldiği görülmüştür. Betondaki adyabatik sıcaklık artışına ve daha önemlisi, yerleştirme sıcaklığına bağlı olarak çekirdekteki pik sıcaklığın cürüflü betonlarda $57-64^\circ\text{C}$ arasında olduğu, bu sıcaklığa dökümden sonra 48-60 saatte varıldığı, cürufsuz kontrol betonunda da pik sıcaklığa yaklaşık aynı sürede varıldığı, ancak bu sıcaklığın 84°C ’ye ulaştığı tespit edilmiştir. Daha önce vurgulandığı gibi, 65°C ’nin üzerindeki sıcaklığa maruz kalan bazı betonlarda gecikmiş etrenjit oluşma riski bulunduğu, bu durumun da ilerideki yaşlarda genleşme ve çatlamaya yol açabileceği belirtilmiştir. Naylon örtünün betonun yüzey sıcaklığını korumada oldukça etkili olduğu, bu etkinin ortam sıcaklığının artmasıyla arttığı belirlenmiştir (Şekil 10 ve 11). Böylece, betonun yüzey bölgesindeki ara yüzlerde agrega ile matrisin ısıl genleşme katsayısının farkından kaynaklanan mikroçatlak oluşma riski ortadan kalkmıştır.

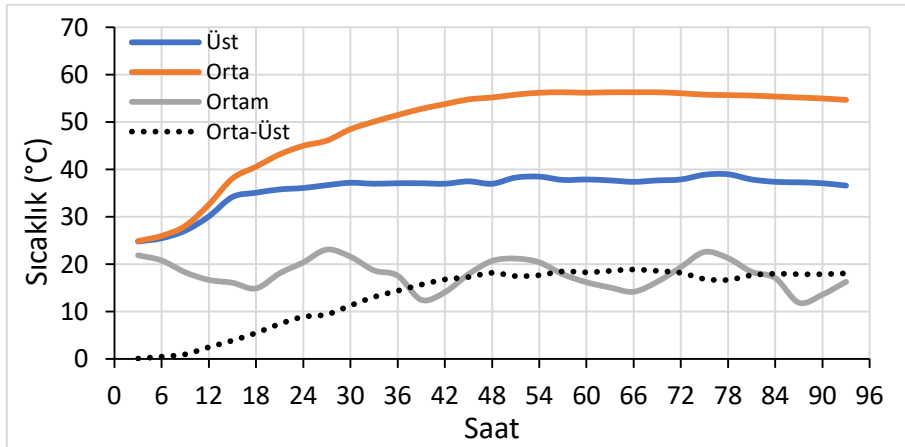
Kıyaslama amacıyla, betonların yerleştirme sıcaklığı, yerleştirme zamanındaki ortam sıcaklığı, çekirdekte oluşan pik sıcaklık (T_{orta}), bu sıcaklığa ulaşma süresi, betonun adyabatik sıcaklığı ve en yüksek çekirdek sıcaklığı-yüzey sıcaklığı farkı ($T_{orta} - T_{üst}$) Tablo 9'da verilmiştir.



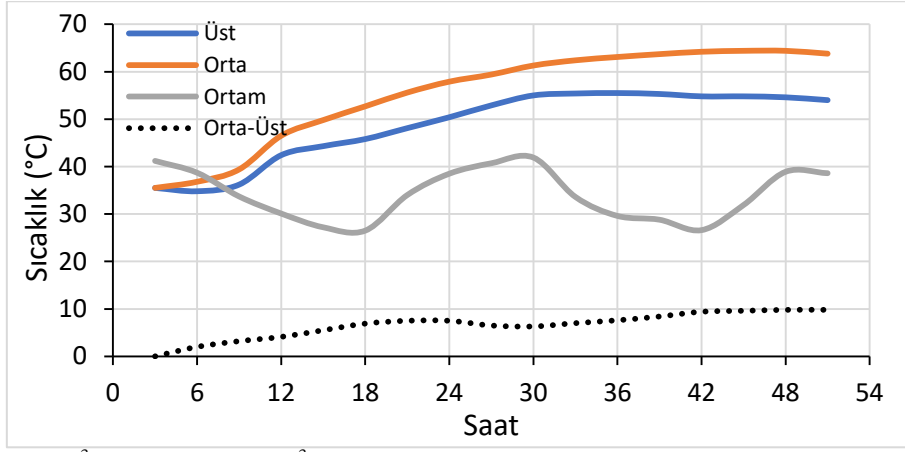
Şekil 8. 160 kg/m³ çimento+140 kg/m³ cüruf içeren C30 betonunun naylon örtü altındaki sıcaklık gelişmesi.



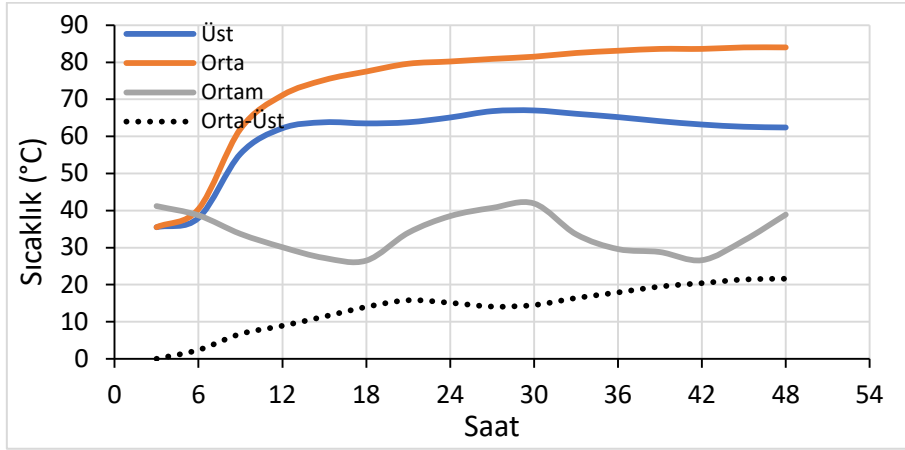
Şekil 9. 160 kg/m³ çimento+160 kg/m³ cüruf içeren C35 betonunun naylon örtü altındaki sıcaklık gelişmesi.



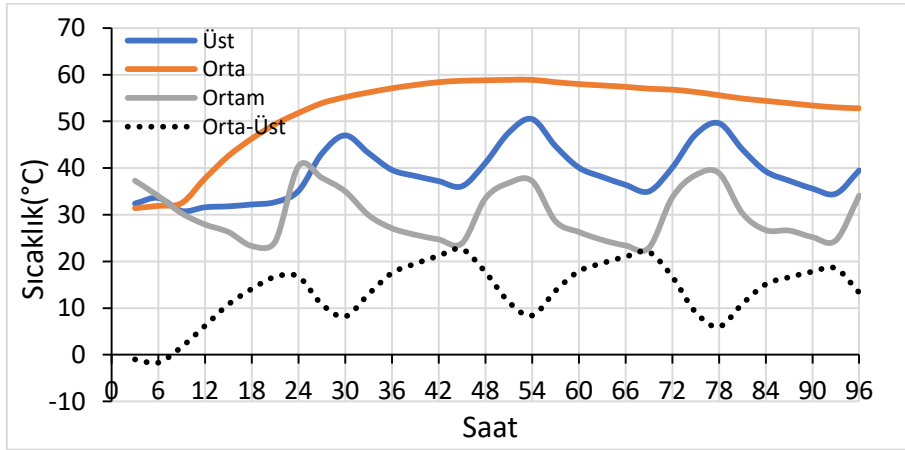
Şekil 10. Yerleştirme sıcaklığı (Şekil 9'dakine göre) daha düşük olan C35 betonunun sıcaklık gelişimi.



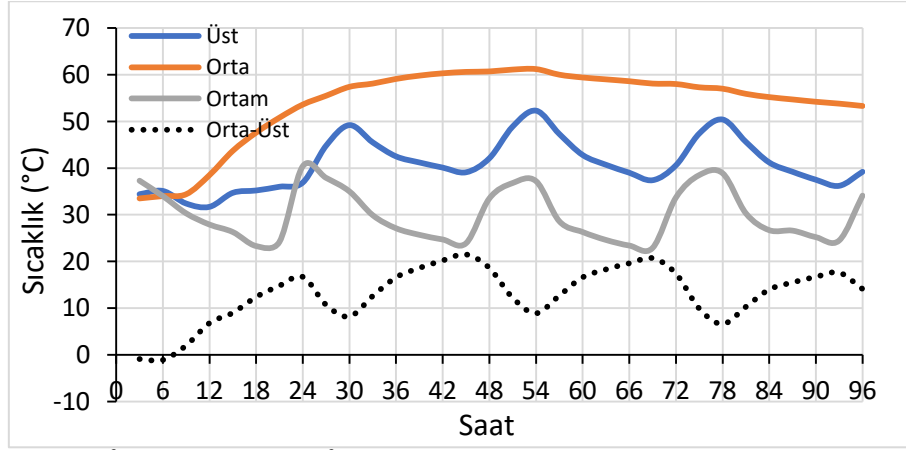
Şekil 11. 180 kg/m³ çimento+180 kg/m³ cüruf içeren C40 betonunun naylon örtü altındaki sıcaklık gelişmesi.



Şekil 12. 360 m³/kg CEM II/B-M çimentosu içeren KC40 betonunun naylon örtü altındaki sıcaklık gelişmesi.



Şekil 13. Naylon örtüsüz cürufllu C40 betonundaki sıcaklık gelişimi.



Şekil 14. 190 kg/m³ çimento+190 kg/m³ cüruf içeren, naylon örtüsüz C45 betonundaki sıcaklık gelişimi.

Tablo 9’da görüldüğü gibi farklı tarihlerde dökülen C40 karışımında, döküm sıcaklığındaki 3.6°C artış betonun maksimum adyabatik sıcaklığı ve çekirdekdeki pik sıcaklığında sırasıyla 1.9°C ve 5.5°C artışa yol açmıştır. Ayrıca aynı karışıma ait mock-up örneği yüzeyinin naylon ile kaplanması betonun çekirdeği ile yüzeyi arasındaki sıcaklık farkını 22°C’den 9.8°C’ye düşürmüştür. Kütle betonun soğumaya başladığı ilk günlerde betonun yüzey bölgesinde kayda değer oranda çekme gerilmesi ve çatlak oluşmasına neden olan bu sıcaklık farkı, TS 13815 [3] standardında donatılı betonlarda 25°C, donatısız betonlarda ise 20°C’yle sınırlandırmıştır. Başka bir araştırmada da çimentonun büyük bir bölümünün yerine yüksek fırın cürufu kullanımının nihai dayanımdan ödün vermeden, hidrasyon sonucu kütle betonunda oluşacak maksimum sıcaklığı 11.3°C, betonun çekirdeği ve yüzeyi arasındaki sıcaklık farkını ise 5.3°C azaltabileceği rapor edilmiştir [16].

Tablo 9. Betonlardaki sıcaklık gelişmesi ile ilgili bazı veriler.

Karışım	Yerleştirme sıcaklığı (°C)		Mak. çekirdek sıcaklığı T _{Orta} (°C)	T _{Orta} oluşma süresi (Saat)	Maksimum T _{Orta} -T _{Üst}	Adyabatik sıcaklık (°C)
	Beton	Ortam				
C30	28.5	27.5	57.4	54	21.6	28.9
C35	31.2	30.5	58.0	42	15.7	26.8
C35	24.9	21.9	56.3	60	15.7	31.4
C40	35.0	41.2	64.4	48	9.8	29.4
C40*	31.4	37.3	58.9	54	22.0	27.5
KC40♦	35.0	41.2	84.0	42	21.0	48.5
C45*	33.5	37.0	61.2	48	21.5	30.7

*Naylon örtüsüz. ♦Cürufsuz kontrol KC40 karışımı

5. SONUÇLAR

Çalışmada kullanılan malzeme ve uygulanan deneyler ile aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- Su/bağlayıcı malzeme oranının 0.43’ten 0.52’ye yükseltilmesiyle 28 günlük ortalama silindir basınç dayanımı 32.6 ile 58.8 MPa arasında olan yüksek fırın cürufu (YFC) betonlar üretilmiştir. Söz konusu dayanım değerleri (genelde) TS EN 206 standardında benzer su/çimento oranına sahip betonlar için önerilen değerlerin üstündedir.
- Yüksek fırın cürufu betonlarda dayanım kazanma hızı, ilk bir-iki hafta, CEM II/(B-M) 42.5R tipi çimento içeren betondan oldukça düşüktür. Ancak iki beton türü arasındaki dayanım farkı 28. günde kapanmıştır. İkinci 28 günde cürufu betonların basınç dayanımında ilk 28 güne kıyasla %18’lere varan oranlarda artış gözlemlenmiştir. Ancak çimentoda bulunan %25 uçucu küle rağmen CEM II tipi çimentosu ile üretilen ve cüruf içermeyen betonlarda ikinci 28 günde dayanım artışının %3.8 ile sınırlı kaldığı tespit edilmiştir. Bunlar göz önüne alınarak TS 13815’de de değinildiği şekilde, yüksek oranda mineral katkı içeren kütle betonlarındaki dayanım değerlendirmesinin 56 veya 90 günlük numunelerde yapılmasının mantıklı bir uygulama olacağı belirlenmiştir.
- Betondaki bağlayıcı malzemenin %50 oranında YF cürufundan oluşması, kütle betonun adyabatik sıcaklık artışı ve çekirdeğindeki pik sıcaklığı önemli ölçüde (ve istenilen seviyeye <65°C) azaltmıştır. Bu bağlamda betonun bağlayıcı (cüruf+çimento) içeriğinden ziyade, yerleştirme sıcaklığının daha etkili olduğu saptanmıştır.
- Cürufu betonların yerleştirme sıcaklığından önemli ölçüde etkilenen adyabatik sıcaklık artışı 26.8 ile 31.4 °C arasında değişmiştir. Bu sıcaklık ile betonun bağlayıcı içeriği arasında herhangi bir ilişki kurulamamıştır.
- Hava sıcaklığının 14 ile 43°C arasında değiştiği ortamlarda betonun çekirdeği ile yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı, bir kat naylon örtü ile 20°C’nin altında tutulabilmektedir. Örtünün etkisi hava sıcaklığının artışı ile artmıştır. Örtü aynı zamanda hava sıcaklığına bağlı olarak beton yüzeyinin ısınma-soğuma döngülerine maruz kalmasını engellemiştir.

- Çimentonun dayanım kazanma hızının ve 28 günlük basınç dayanımının, betonun dayanım kazanma hızına, betondaki sıcaklık artışına ve nihai dayanıma etkisinin incelemeye değer bir konu olduğu düşünülmektedir.

Yazar Katkıları

Kambiz Ramyar: Deneysel çalışmanın planlanması-koordinasyonu, makale yazımı ve düzenleme; Nuri Harta: Deneysel çalışmanın planlanması-gerçekleştirilmesi; Berna Kolukısa: Deneysel çalışmanın planlanması-gerçekleştirilmesi.

Çıkar çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Teşekkür

Ege Üniversitesi Ar-Ge projeleri kapsamında yapılan çalışmaya katkılarından dolayı, Pekintaş Yapı-Burakcan İnşaat Ortaklığı (İzmir Allsancak Projesi), Teknik Yapı-Halk GYO Ortaklığı (İzmir Evora Projesi) ve Güçsan Yapı (İzmir Güçsan Projesi) yetkililerine teşekkür edilmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] T. Erdoğan, "Beton", ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim (1. Baskı), 2003.
- [2] G. Moir, "Cements-Advanced Concrete Technology", Elsevier Butterworth Heinemann, 2003.
- [3] Kütle Betonunu Tasarımı, TS 13815, 2018.
- [4] P. K. Mehta, P. J. M Monteiro, "Concrete: microstructure, properties, and materials", McGraw Hill (3rd edition), 2006.
- [5] W. H. Price, "Temperature-rise in mass concrete", Concrete International, vol. 4, no. 10, 1982.
- [6] P. B. Bamforth, "In situ measurement of the effect of partial portland cement replacement using either fly ash or ground granulated blast furnace slag on the performance of mass concrete", Proceedings of Institute of Civil Engineers, vol. 69, pp. 777-800, 1980.
- [7] M. Tokyay, K. Erdoğan, "Cürüfler ve cürüflü çimentolar", TÇMB AR-GE, Y 97.2 raporu, p. 48, 2011
- [8] K. Ramyar, "Effects of Turkish fly ashes on portland cement-fly ash systems", Ph.D. Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 1993.
- [9] M. Tokyay, "Cement and concrete mineral admixtures", CRC Press, 2016.
- [10] H. Moon, S. Ramanathan, P. Suraneni, C.S. Shon, C.J. Lee, C.W. Chung, "Revisiting the effect of slag in reducing heat of hydration in concrete in comparison to other supplementary cementitious materials", Materials (Basel), vol. 11, no. 10, p. 1847, 2018.
- [11] K. Ramyar, A.A. Üte, "Controlling temperature rise in mass concrete foundation of folkart towers", Cement and Concrete World, vol. 17, no. 100, pp. 83-97, 2012.
- [12] Çimento - Bölüm 1: Genel Çimentolar - Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, TS EN 197-1, 2012.
- [13] Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu - Beton, Harç ve Şerbette Kullanım İçin - Bölüm 1: Tarifler, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, TS EN 15167-1, 2006.
- [14] Beton Karışım Tasarımı Hesap Esasları, TS 802, 2016.
- [15] Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 3: Deney Numunelerinin Basınç Dayanımının Tayini, TS EN 12390-3, 2019.
- [16] H.M. Woo, C.Y. Kim, H.H. Yean, "Heat of hydration and mechanical properties of mass concrete with high-volume GGBFS replacements", Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, vol. 132, no. 3, pp. 599-609, 2017.



Hava Kirliliğinin Makine Öğrenmesi Tabanlı Tahmini: Başakşehir Örneği

Prediction of Air Pollution based on Machine Learning Methods: A Case Study for Başakşehir, İstanbul

¹Sibel ÜNALDI , ²Nesibe YALÇIN 

¹Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, 11230, Bilecik, Türkiye

²Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, 38280, Kayseri, Türkiye

¹sibelunaldi@bilecik.edu.tr, ²nesibeyalcin@erciyes.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

ARTICLE INFO

Article history

Received : 10 January 2022

Accepted : 28 February 2022

Keywords:

Air pollution, Artificial Neural Networks, Machine Learning, Multiple Linear Regression, Random Forest

ABSTRACT

Regular measurement and monitoring of pollutant parameters, prediction of air pollution, and early assessment of its effects on human health are very important to provide a healthier living environment for the city's residents, and to minimize exposure to air pollution. This study aims to predict air pollution by using machine learning methods. The daily average concentrations of various air pollutants, as well as wind direction, wind speed and air pressure values measured between 2016 and 2021 in Başakşehir are used. PM10, CO, SO₂, NO₂, and O₃ concentrations are predicted using Multiple Linear Regression, Support Vector Machine, K Nearest Neighbor, Decision Tree, Random Forest, and Multi-layer Perceptron Neural Network methods. The obtained results are compared in terms of some performance metrics. The Random Forest method has the minimum error values in the prediction of PM10, CO, SO₂, and O₃ concentrations, and Multiple Linear Regression shows the better prediction performance for NO₂ concentration.

© 2022 Bandırma Onyedi Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Science. Published by Dergi Park. All rights reserved.

MAKALE BİLGİSİ

Makale Tarihleri

Gönderim : 10 Ocak 2022

Kabul : 28 Şubat 2022

Anahtar Kelimeler:

Çoklu Doğrusal Regresyon, Hava kirliliği, Makine Öğrenmesi, Rastgele Orman, Yapay Sinir Ağları

ÖZET

Şehir sakinleri için daha sağlıklı bir yaşam ortamının sağlanması ve onların hava kirliliğine maruziyetinin en aza indirilmesi oldukça önemlidir. Bunun için yapılabilecek çalışmalar arasında kirletici parametrelerine ilişkin ölçümlerin düzenli olarak yapılması ve izlenmesi, hava kirliliğinin tahmin edilmesi ve insan sağlığı üzerindeki etkilerinin erken değerlendirilmesi yer almaktadır. Bu çalışmada, makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak hava kirliliği tahmini gerçekleştirilmiştir. İstanbul ili Başakşehir ilçesinde 2016-2021 yılları arasında ölçülen çeşitli hava kirleticilerine ilişkin günlük ortalama konsantrasyonları ile rüzgar yönü, rüzgar hızı ve hava basıncı değerleri kullanılmıştır. PM10, CO, SO₂, O₂ ve O₃ kirleticilerin konsantrasyonları, Çoklu Doğrusal Regresyon, Destek Vektör Makinaları, K En Yakın Komşu, Karar Ağaçları, Rastgele Orman ve Çok Katmanlı Algılayıcı Sinir Ağı yöntemleri ile tahmin edilmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında PM10, CO, SO₂ ve O₃ konsantrasyonları tahmininde Rastgele Orman yöntemi, NO₂ tahmininde ise Çoklu Doğrusal Regresyon, en iyi sonuçları sunmuştur.

© 2022 Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi. Dergi Park tarafından yayınlanmaktadır. Tüm Hakları Saklıdır.

1. GİRİŞ

Hava kirliliği, dünya çapında ölümler için dördüncü önde gelen risk faktörüdür ve bu nedenle insan sağlığına yönelik en büyük çevresel tehdit olarak kabul edilmiştir. Dünya nüfusunun yaklaşık %91'i, Dünya Sağlık Örgütü (World Health Organization, WHO) tarafından belirlenen hava kalitesi limitlerini aştığı yerlerde yaşamaktadır. Hava kirliliğine maruz kalmanın ciddi sağlık sonuçları vardır. WHO'ya göre kalp hastalığı, felç, akciğer kanseri ve kronik solunum yolu hastalıklarına bağlı olarak yılda tahmini 4,2 milyon ölüm hava kirliliği nedenidir [1]. Hava kirliliği, insan sağlığına zarar vermenin yanı sıra insan hayatını da olumsuz yönde etkilemektedir. Şiddetli hava kirliliği, atmosferin görünürlüğünü azaltarak trafik kazası olasılığını artırmakta ve pus oluşumuna neden olarak insanların normal seyahatlerini geciktirebilmektedir. Ayrıca ekosistemlerin yapısına çökeltmeler ile dâhil olarak toprağın yapısını değiştirmektedir [2]. Hava kirliliğinin bir başka olumsuz etkisi ise üzerinde biriken partikül maddeler nedeniyle güneş enerjisi sistemlerinin enerji üretim verimini düşürmesidir [3].

Hava kirliliği, iklim değişikliğine katkıda bulunan önemli bir faktördür ve hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkeleri etkilemektedir. Endüstriyel faaliyetler, trafik yoğunluğu gibi nedenlerle şehirlerde her geçen gün hava kirliliği artmakta, hava kalitesi bozulmakta ve dolayısıyla bu durum sağlık ve iklim için büyük bir tehdit oluşturmaktadır. Şehirlerde çeşitli noktalarda, hava kalitesinin izlenmesi amaçlı hava kalitesi izleme istasyonları bulunmaktadır. Bu istasyonların kurulması yüksek maliyetlidir ve sonrasında pahalı bakım gerektirebilmektedir [4]. Bu nedenle, hava kirliliği tahmin çalışmalarının önemi artmıştır. Hava kirliliğinin tahminine yönelik literatürde yer alan çalışmalarda, makine öğrenmesi [4-9], derin öğrenme [10-12] ve veri madenciliği [13,14] algoritmaları kullanılmış ve boyutu 2,5 µm ile 10 µm arasında olan partikül madde (PM₁₀), azot monoksit (NO), kükürt dioksit (SO₂) gibi önemli hava kirlleticilerinin konsantrasyonları üzerinden başarılı tahmin sonuçları elde edilmiştir. [7]'de Adana ili için azot dioksit (NO₂), SO₂, ozon (O₃), karbon monoksit (CO) ve PM₁₀ gibi hava kirleticiler gazların ölçüm verileri ele alınmış ve çeşitli makine öğrenmesi algoritmaları ile hava kalite indeksi elde edilmiştir. Erzincan ili için yapılan hava kirlilik tahmin çalışmasında [9], PM₁₀ ve SO₂ kirleticilerinin 2016-2018 yılları arasındaki günlük kayıtları kullanılmış ve makine öğrenmesi yöntemlerinden KNN ile tahmin gerçekleştirilmiştir İç Anadolu Bölgesi ve çevresine ait ölçüm verilerinin ele alındığı çalışmada [11], uzun-kısa süreli bellek (Long - Short Term Memory, LSTM) ağı ve klasik derin öğrenme yöntemi kullanılarak PM₁₀ için tahmin çalışması yapılmıştır. [10]'da ise hava kalitesi tahmini için derin öğrenme ve görüntü tabanlı bir model önerilmiştir. Ayrıca, çalışma kapsamında derlenen yüksek kaliteli bir dış hava kalitesi veri seti NWN- AQI üzerinde AQC-Net, Destek Vektör Makinesi (Support Vector Machine, SVM) ve Derin Kalıntı Ağı (ResNet) karşılaştırılmış ve AQC-Net'in hava kalitesi sınıflandırması için diğer yöntemlere kıyasla daha doğru sonuçlar verdiğini belirtilmiştir. Milano'nun kentsel bölgesindeki hava kalitesi tahminine yönelik önerilen çalışmada [8], farklı makine öğrenimi yaklaşımları kullanılmış, meteorolojik ve toplu taşımayla ilgili özellikler ele alınmıştır. [15] çalışması ise hava kalitesinin iyileştirilmesi için hangi parametreler ve hangi yöntemler kullanılarak nasıl bir analiz ile incelenmesine yönelik bir fikir sunmaktadır.

Hava kirliliği ve sağlık problemleri (özellikle kronik hastalıklar) arasındaki ilişkiyi gösteren çok sayıda çalışma vardır. [16]'da WHO kılavuz değerlerinin [17] altındaki düşük kirlilik seviyelerinde bile dış hava kirliliğinin ölüm oranıyla ilişkili olduğuna dair kanıtlar sunulmuş ve boyutu 2,5 µm' den küçük olan partikül madde (PM_{2.5}), NO₂ ve siyah karbona daha fazla maruz kalma, önemli ölçüde artan ölüm riski ile ilişkilendirilmiştir. Azot oksitler (NO_x) olarak adlandırılan azot oksitler 6 farklı gaz (NO, NO₂, diazot oksit (N₂O), diazot trioksit (N₂O₃), diazot tetraoksit (N₂O₄) ve diazot pentaoksit (N₂O₅)) karışımından oluşmaktadır. NO ve NO₂ önemli hava kirleticileri olarak kabul edilmekte ve atmosferde kalış süreleri yaklaşık 2-5 gün arasında değişmektedir [18]. NO_x'ler, troposferde O₃ oluşumuna ve atmosferde nitrik asit oluşturarak asit yağmurlarına neden oldukları için dikkat edilmesi gereken önemli hava kirleticilerindedir [15, 19]. Ayrıca, yüksek konsantrasyonlarda NO₂ gazı bulunması ciddi düzeyde solunum yolu tahribatına yol açabilmektedir. Bu nedenle, NO_x' in insan sağlığına zarar vermeyecek şekilde dönüşümleri yapılarak giderilmesi gerekmektedir [15]. Hava kalitesinin sürekli olarak izlenmesi ve kirlilik seviyesinin tahmin edilmesi, gerek hava kalitesini kabul edilebilir seviyede tutmak gerekse hava kirleticilerinin kronik solunum yolu hastalıkları gibi sağlığa olumsuz etkilerini azaltmak için hava kirliliğine yönelik önleyici tedbirlerin alınabilmesi oldukça önemlidir.

Hava kalitesinin iyileştirilmesi, hava kirliliğinin neden olduğu potansiyel sağlık etkilerinin azaltılması, iklim değişikliği ile mücadelenin sürdürülebilmesi gibi amaçlarla hava kalitesi/kirliliği tahmin çalışmalarına olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Bu çalışmada, hava kirliliğini analiz etmek ve tahmin etmek için Çoklu Doğrusal Regresyon (Multiple Linear Regression, MLR), SVM, K En Yakın Komşu (K Nearest Neighbor, KNN), Karar Ağacı, Rastgele Orman ve Çok Katmanlı Algılayıcı Sinir Ağı (Multi-Layer Perceptron Neural Network, MLPNN) makine öğrenmesi yöntemleri kullanılmıştır. Günlük ortalama PM₁₀, CO, SO₂, NO₂ ve O₃ konsantrasyonları hava kirliliği parametreleri olarak ele alınmış ve tahmin sonuçları en yüksek öngörüye sahip yöntemlerin belirlenmesi için çeşitli değerlendirme metrikleri kullanılarak karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmanın ilk bölümünde, hava kirliliği konusuna giriş yapılmış ve makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak hava kirliliğinin tahminine ilişkin literatür araştırmasına yer verilmiştir. İkinci bölümde, kullanılan veri seti ve makine öğrenme yöntemleri detaylı olarak incelenmiş ve performans değerlendirme metrikleri hakkında bilgi verilmiştir. Araştırma sonuçları ve tartışma bölümünde, elde edilen uygulama sonuçları karşılaştırmalı olarak sunulmuş ve değerlendirilmiştir. Dördüncü bölümde ise çalışma yorumlanarak sonuçlandırılmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEMLER

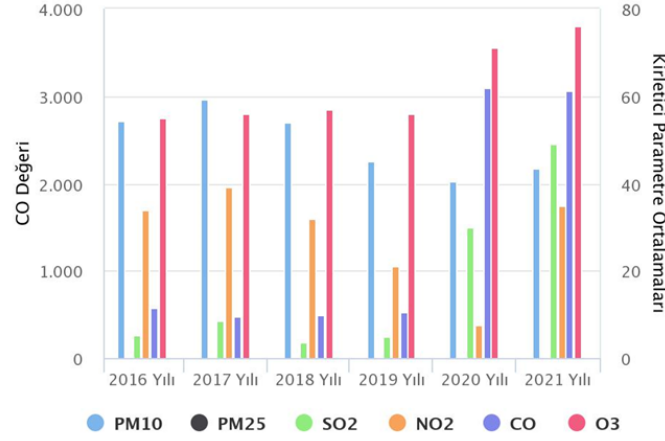
2.1. Veri Seti

Türkiye, Avrupa Birliği (AB) üyelik sürecinde bulunması nedeniyle mevzuatlarını AB ile uyumlu hale getirmek için hava kirleticilerinin sınır değerlerini kademeli olarak hedef değerlere getirmeyi planlamıştır [2]. Kirletici parametrelerinin uyumlu olması için istenen hedef sınır değerlerinin ülkemizde yürürlüğe girme tarihleri: CO için 1 Ocak 2017, PM₁₀ ve SO₂ için 1 Ocak 2019, O₃ için 1 Ocak 2022 ve NO₂ için de 1 Ocak 2024. En son olarak NO₂ için sınır değeri uyumlanacak ve 2024'ten itibaren tüm kirletici parametreler için Türkiye, AB mevzuatını uygulayacaktır. Tablo 1'de Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği [20] kirletici sınır değerleri (2022 yılı için Türkiye sınır değerleri) verilmektedir. Ayrıca bahsi geçen kirleticilerin dış ortam kaynakları [21] ve bu kirleticilere maruz kalma sonucu insan sağlığına etkileri [17,21,22] Tablo 1'de yer almaktadır.

Tablo 1. Hava kirleticileri, sınır değerleri [20], kaynakları [21] ve sağlığa etkileri [17,21,22].

Kirletici	Hava kalite seviyesi (µg/m ³)	Kaynakları	Sağlığa Etkileri
PM ₁₀	50 (24 saatlik)	Sanayi, yakıt yanması, tarım ve ikincil kimyasal reaksiyonlar	KOAH, akut alt solunum yolu enfeksiyonları, kalp hastalıkları, akciğer kanseri, kardiyovasküler mortalite, solunum mortalitesi
SO ₂	125 (24 saatlik)	Fosil yakıt yanması	Astımla ilgili hastane başvuruları ve acil servis ziyaretleri, solunum mortalitesi
CO	10.000 (8 saatlik)	Eksik yanma ürünü, taşıt emisyonları	İskemik kalp hastalığı ile ilgili hastane başvuruları ve acil servis ziyaretleri
NO ₂	40+4 (saatlik) 200+20 (yıllık)	Taşıt emisyonları, yüksek sıcaklıkta yakma prosesleri	Astımla ilgili hastane başvuruları ve acil servis ziyaretleri, solunum mortalitesi
NO _x	30 (yıllık)	Taşıt emisyonları, yüksek sıcaklıkta yakma prosesleri	Göz ve solunum yolu hastalıkları, asit yağmurları
O ₃	120 (8 saatlik)	Trafikten kaynaklanan azot oksitler ve uçucu organik bileşiklerin Güneş ışığıyla değişimi	Solunum sistemi problemleri, solunum mortalitesi, göz ve burunda iritasyon, astım, vücut direncinde azalma

Hava kirliliği tahmin çalışması için sanayi-kentsel bölge olarak tanımlanan İstanbul ili Başakşehir ilçesi seçilmiştir. Ayrıca ilçedeki hava kalitesi ölçüm istasyonu karayoluna yakın yerde (34 m) konumlandırılmıştır. Çalışmada kullanılan hava kalitesi ölçüm verileri, İstanbul Büyükşehir Belediyesi Çevre Koruma ve Kontrol Daire Başkanlığı Çevre Koruma Müdürlüğü Hava Kalitesi İzleme Merkezi'nden temin edilmiştir. Kullanılan veri seti, 2016-2021 periyodunu kapsayan 6 yıllık PM₁₀, CO, SO₂, NO, NO₂, NO_x ve O₃ kirleticileri ölçümlerine ilişkin günlük (24 saat) ortalama konsantrasyonları (µg/m³) ile rüzgar yönü (°), rüzgar hızı (km/h) ve hava basıncı (mbar) (toplamda 10 farklı özellik) değerlerini içermektedir. Başakşehir ilçesine ilişkin hava kirleticilerinin yıl bazlı ölçüm ortalamaları grafiği [23], Şekil 1' de sunulmuştur. Grafikte en dikkat çekici olan son iki yılda CO ve SO₂ konsantrasyonlarında gözlenen yüksek orandaki artıştır. Bununla birlikte O₃ miktarında da artış gözlenmiştir. COVID-19 pandemisi nedeniyle sokağa çıkma gibi kısıtlamaların daha çok uygulandığı 2019 ve 2020 yıllarında PM₁₀ ve NO₂ oranlarında düşüş görülse de 2021 yılında tekrar artışa geçmiştir. Kirleticilerin istatistiksel özellikleri (minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma) incelendiğinde 2020 COVID-19 pandemi sürecinde, diğer yıllara kıyasla maksimum NO, NO₂ ve NO_x kirletici değerleri daha düşük ölçülmüştür. Ters şekilde CO ve SO₂ gazları için maksimum kirletici konsantrasyonu 2020 ve 2021 yıllarında elde edilmiştir ve bu yıllarda ortalama SO₂ konsantrasyonu, önceki yıllarda ölçülen en yüksek ortalamasının en az 3,4 katına çıkmıştır. PM₁₀ kirletici konsantrasyonu ortalama olarak sağlık açısından memnun edici aralıklarda olsa da kabul edilebilir seviyenin (50 µg/m³) üzerinde PM₁₀ ölçümleri mevcuttur. Son olarak, O₃ gazı için hesaplanan maksimum ve ortalama değerlerde 2020 ve 2021 yıllarında artış göstermiştir.



Şekil 1. Kirleticilere ilişkin yıl bazlı ölçüm ortalama değerleri [23].

2.2. Makine Öğrenmesi Yöntemleri

Hava kirliliği tahmin çalışmasında MLR, SVM, KNN, karar ağaçları, rastgele orman ve MLPNN makine öğrenmesi yöntemleri kullanılmıştır. Makine öğrenme yöntemlerine dayalı hava kirliliği tahmin modelleri, Python dilinde geliştirilmiştir. NumPy, SciPy, Scikit-Learn ve Matplotlib kütüphaneleri kullanılmıştır. Denemeler sonucunda, makine öğrenme yöntemleri için en iyi sonucu veren parametreler seçilmiştir.

2.2.1. MLR

Doğrusal bir regresyon modeli, sürekli/nicel değerli ilişkileri modellemek için kullanılır. Bağımsız değişken (girdi) ile bağımlı değişken (regresyon fonksiyonu, çıktı) arasında doğrusal bir ilişki olduğunu varsayar. Bağımsız değişken yardımı ile bağımlı değişkenin değeri tahmin edilir. Birden fazla bağımsız değişkenin girdi olarak yer aldığı MLR yöntemi, bağımsız değişkenlerin bireysel ve toplu olarak bağımlı değişkeni nasıl etkilediğine dair yeterli ve yorumlanabilir bir açıklama sunar [24]. Çalışmada MLR yöntemi ile konsantrasyonu tahmin edilmek istenen kirlenme parametresi ile veri setindeki diğer değişkenler arasındaki matematiksel ilişkiyi gösteren bir model üretilmiş ve bu model yardımı ile kirlenme konsantrasyonu tahmini yapılmıştır.

2.2.2. SVM

SVM, sınıflandırma ve regresyon (doğrusal ve doğrusal olmayan) analizi için kullanılan danışmanlı (supervised) bir makine öğrenmesi yöntemidir. Destek vektörleri yardımı ile optimal ayrılabilir sınıflar oluşturmak amacıyla yaygın olarak kullanılır. Maksimum marj kavramını kullanır ve çekirdek (kernel) en önemli özelliğidir. Çekirdek fonksiyonlarına bağlı olarak düşük boyutlu girdi alanı daha yüksek boyutlu alana dönüştürülür [25]. Çalışmada SVM algoritmasında, "linear" çekirdek fonksiyonu ile en iyi sonuç elde edilmiştir. Regresyon amaçlı kullanılan SVM, çekirdek parametresine ek olarak iki hiperparametre daha içermektedir: C düzenleme (regularization) parametresi ve ϵ hata toleransı (error sensitivity) parametresi. Bu parametreler, eğitim verilerinin aşırı öğrenmesini önlemek için kullanılmaktadır [26]. Çalışmada, C sabiti 1 ve ϵ 0,1 seçilmiştir.

2.2.3. KNN

En basit makine öğrenmesi yöntemi olarak kabul edilen KNN, bellek tabanlıdır ve model oluşturmak için herhangi bir eğitim süreci gerektirmez. K adet en yakın (en benzer) komşu bilgisi üzerinden regresyon ve sınıflandırma işlemlerini gerçekleştirir. KNN algoritmasında, uzaklık ölçüğü olarak Öklid uzaklığı kullanılmıştır. Denemeler sonucunda en iyi sonucu veren en yakın komşu sayısı (K) ise 3 olarak belirlenmiştir.

2.2.4. Karar Ağaçları

Karar ağaçları, sınıflandırma ve regresyon problemlerinin çözümünde kullanılır. Ters ağaç görünümünde olup kök düğüm, dal ve yapraklardan oluşur. Kök düğüm daha fazla düğüme bölünebilir. Düğümlerde değişkenler, dallarda değişkenlerin aldığı değerler ve yapraklarda nihai sonuç temsil edilir. Kök düğümden yaprağa ulaşana dek ardışık düğümler takip edilerek karar alma işlemi gerçekleşir. Nihai sonucun sürekli değerler aldığı karar ağaçlarına regresyon ağaçları da denir.

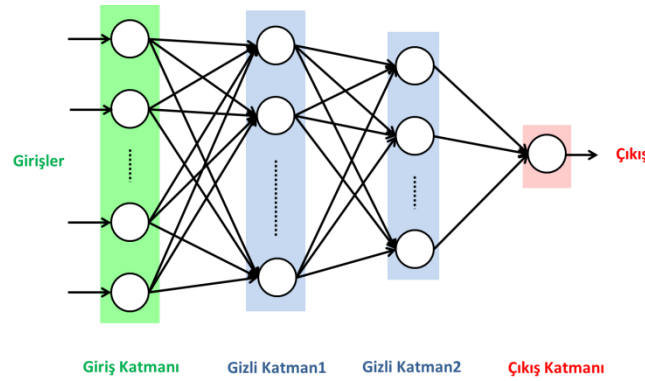
2.2.5. Rastgele Orman

Rastgele orman yöntemi, danışmanlı bir makine öğrenme yöntemidir. Sınıflandırma ve regresyon problemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Karar ağaçlarını temel alan bu yöntem, girdi parametreleri içinden rastgele seçtiği parametreler ile çok sayıda karar ağacı oluşturur [15], daha sonra karar ağaçlarının her birinden tahmin

alır ve oylama ile (sınıflandırma işlemi için) veya tahminlerin ortalamasını alarak (regresyon problemi için) en iyi sonucu üretir.

2.2.6. MLPNN

Yapay Sinir Ağları (YSA), insan beyninden esinlenerek geliştirilmiş bir makine öğrenmesi yöntemidir. Sinir hücrelerinin bağlantı şekline göre ileri ve geri beslemeli olarak sınıflandırılır. Ayrıca, öğrenme algoritmalarına göre danışmanlı, danışmansız (unsupervised) ve pekiştirmeli (reinforcement) öğrenmeye dayalı YSA çeşitleri bulunmaktadır. MLPNN, ileri beslemeli bir sinir ağı yapısındadır ve eğitim için danışmanlı bir öğretim algoritması olan geri yayılım (back-propagation) algoritmasını kullanır. Giriş, gizli (en az bir) ve çıkış katmanından oluşan MLPNN, ağırlık çıkışı ile istenen çıkış (hedef) arasındaki farkı minimuma getirmeyi amaçlar. Çalışma kapsamında, birçok deneme sonrası en iyi sonucu (minimum hatayı) veren MLPNN modeli, Şekil 2’de gösterildiği gibi elde edilmiştir. Modelde, 1 giriş katmanı, 2 gizli katman ve 1 çıkış katmanı yer almaktadır. Gizli katmanlarda ise sırasıyla 50 ve 10 sinir hücresi bulunmaktadır. Aktivasyon fonksiyonu olarak katmanlarda relu (rectified linear unit) fonksiyonu kullanılmıştır. Modelin eğitimi için kullanılan durdurma kriteri, 500 iterasyondur.



Şekil 2. Birden fazla gizli katman bulunan bir MLPNN mimarisi.

2.3. Performans Değerlendirme Metrikleri

Çalışma kapsamında elde edilen sonuçların değerlendirilmesinde kullanılan açıklayıcılık (belirtme) katsayısı R^2 , Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error, MAE), Ortalama Mutlak Yüzde Hata (Mean Absolute Percentage Error, MAPE), Ortalama Karesel Hata (Mean Square Error, MSE) ve Kök Ortalama Karesel Hata (Root MSE, RMSE) metriklerine ilişkin formüller [27] sırasıyla Eşitlik 1, Eşitlik 2, Eşitlik 3, Eşitlik 4 ve Eşitlik 5’te verilmiştir;

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (t_i - t_{ort})^2} \quad (1)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |t_i - y_i| \quad (2)$$

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|t_i - y_i|}{t_i} \quad (3)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - y_i)^2 \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{MSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - y_i)^2} \quad (5)$$

Burada n değeri, veri setinde kullanılan toplam örnek sayısını ve $i = 1, 2, 3, \dots, n$ olmak üzere örnek indisini ifade etmektedir. i . örnek için istenen (gerçek, hedef) çıkış değeri t_i ve makine öğrenme yöntemi kullanılarak elde edilen (tahmin edilen) çıkış değeri ise y_i ’dir. t_{ort} , hedef çıkış değerlerinin ortalamasıdır.

3. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Ulusal Hava Kalitesi İndeksi, Çevre Koruma Kurumu (Environmental Protection Agency, EPA) Hava Kalitesi İndeksini ulusal mevzuatımız ve sınır değerlerimize uyarlayarak oluşturulmuştur. 5 temel kirlenici (PM_{10} , CO, SO_2 , NO_2 ve O_3) için hava kalitesi indeksi hesaplanmaktadır [21]. Bu nedenle çalışmada, belirtilen gösterge kirlenicileri üzerinden günlük ortalama hava kirliliği miktarının tahminlenmesi değerlendirilmiştir.

3.1. Araştırma Sonuçları

2016-2021 yılları arasındaki ölçüm değerlerinin yer aldığı veri setindeki eksik değer bulunan örnekler çıkarılmış ve toplamda 2.031 örnek elde edilmiştir. Veri setinin %75'i (1.523 örnek) eğitim, %25'i (508 örnek) test için ayrılmıştır. Veri setindeki bileşenler arasındaki korelasyon incelendiğinde, PM₁₀ ile NO ve NO_x, CO ile SO₂, NO ile NO_x, NO₂ ile NO_x, O₃ ile CO ve SO₂ kirleticileri arasında güçlü bir ilişki olduğu söylenebilir.

Çalışmada kullanılan makine öğrenme yöntemlerinin tahmin performansını değerlendirmek için R², MAE, MSE, RMSE ve MAPE metrikleri kullanılmıştır. Kirletici konsantrasyonu tahmini için makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak elde edilen test sonuçları Tablo 2'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

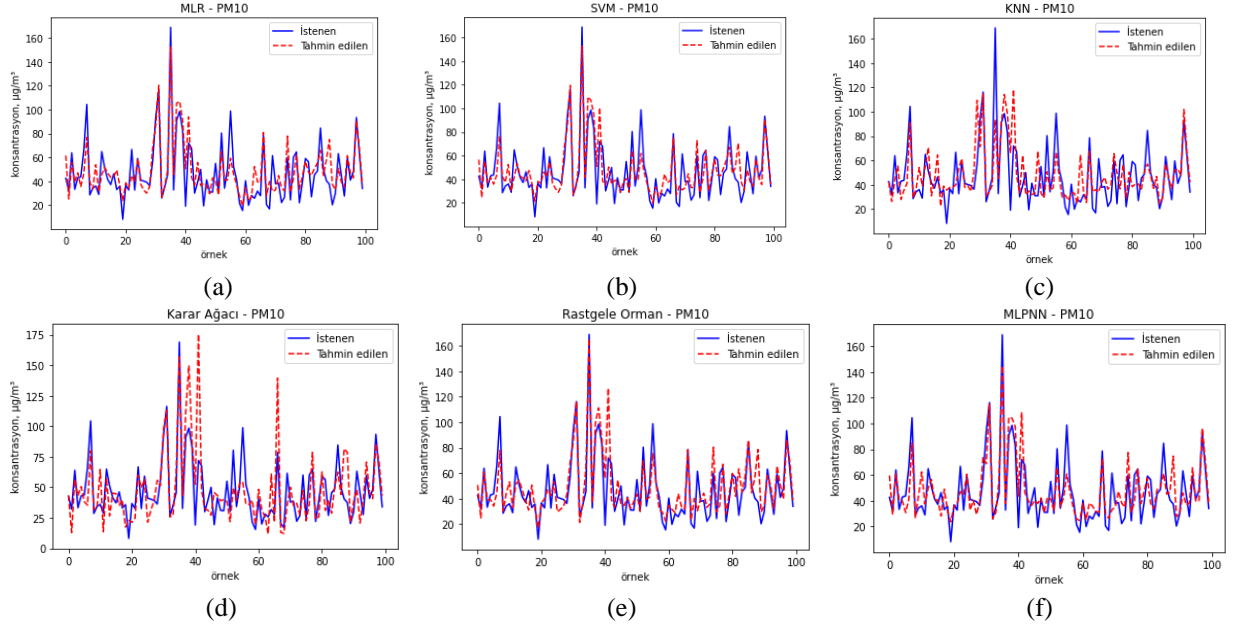
Tablo 2. Hava kirleticileri için elde edilen tahmin sonuçları.

Kirletici	Parametre	MLR	SVM	KNN	Karar Ağacı	Rastgele Orman	MLPNN
PM ₁₀	R ²	0,66	0,67	0,51	0,38	0,68	0,64
	MAE	11,694	11,28	13,733	14,822	10,996	12,145
	MSE	259,639	258,546	376,003	475,333	243,03	275,197
	RMSE	16,113	16,079	19,391	21,802	15,589	16,589
	MAPE	0,3	0,276	0,356	0,348	0,28	0,314
SO ₂	R ²	0,81	0,76	0,82	0,94	0,96	0,78
	MAE	5,679	5,347	4,648	3,021	2,41	5,472
	MSE	72,777	94,145	69,534	23,34	13,77	83,802
	RMSE	8,531	9,703	8,339	4,831	3,71	9,154
	MAPE	0,972	0,61	0,711	0,483	0,418	0,733
CO	R ²	0,76	0,72	0,85	0,91	0,97	0,80
	MAE	508,733	474,899	306,129	194,429	144,182	426,276
	MSE	719.058,05	839.362,45	445.431,6	261.012,5	89.035,92	603.456,39
	RMSE	847,972	916,167	667,407	510,894	298,388	776,825
	MAPE	0,626	0,59	0,359	0,282	0,2	0,525
NO ₂	R ²	0,999	0,995	0,73	0,96	0,97	0,98
	MAE	0,237	1,066	7,318	2,239	1,66	1,091
	MSE	0,172	2,131	121,29	18,636	14,906	7,517
	RMSE	0,414	1,46	11,013	4,317	3,861	2,742
	MAPE	0,016	0,144	0,527	0,139	0,128	0,187
O ₃	R ²	0,61	0,61	0,52	0,57	0,79	0,61
	MAE	11,679	11,728	12,723	11,54	8,444	11,441
	MSE	210,333	214,069	263,456	232,067	114,874	212,389
	RMSE	14,503	14,631	16,231	15,234	10,718	14,574
	MAPE	0,246	0,253	0,256	0,223	0,169	0,244

Tabloda görüldüğü üzere, PM₁₀ tahmini için en iyi sonuçları, Rastgele Orman ve MLR yöntemi sunmuştur. Karar Ağacı ile PM₁₀ tahmininde en düşük R² değeri elde edilmiştir. SO₂ konsantrasyonu, Rastgele Orman ve Karar Ağacı yöntemi kullanılarak diğer yöntemlere kıyasla daha az hata ile tahmin edilmiştir. CO ve O₃ konsantrasyonları için elde edilen tahmin sonuçlarına göre Rastgele Orman yöntemi daha etkin bir performans göstermiş, tahminlerinde kullanılan parametreler tarafından daha yüksek bir oranda açıklanabilmektedir. Çalışmada NO₂ için en düşük hata ile tahmin gerçekleştirilmiş ve MLR yöntemi yüksek bir öngörü sağlamıştır. Ancak KNN, diğer makine öğrenmesi yöntemlerine kıyasla çok daha yüksek hata değerleri ile NO₂ konsantrasyonu tahmini gerçekleştirmiştir. Her bir kirletici konsantrasyonu tahmininde, her bir yöntem için aynı parametreler kullanılmıştır. Bu parametreler her bir kirletici tahmini için farklı seçilerek yöntemlerin daha düşük hata ile tahmin gerçekleştirmesi sağlanabilir. MLPNN yönteminde giriş parametreleri normalize edilerek tahmin başarısı artırılabilir. Ayrıca eğitim ve test işlemleri için ayrılan veri yüzdesi, yöntemlere göre tahmin başarısını etkilemektedir.

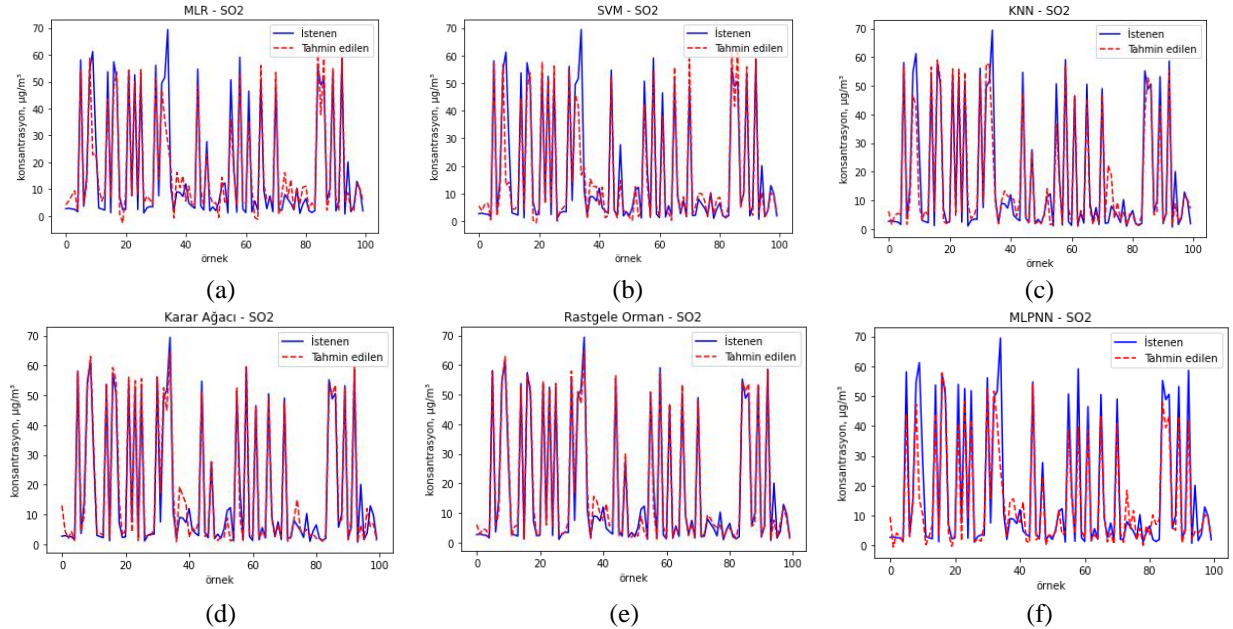
3.2. Tartışma

MLR, SVM, KNN, Karar Ağacı, Rastgele Orman ve MLPNN makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak elde edilen PM_{10} konsantrasyonu tahminine ilişkin kıyaslama grafikleri Şekil 3'te verilmiştir. Elde edilen tahmin sonuçları ve istenen değerler karşılaştırıldığında, MLR, SVM ve Rastgele Orman yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilen tahminin, daha yüksek başarıma sahip olduğu görülmektedir.



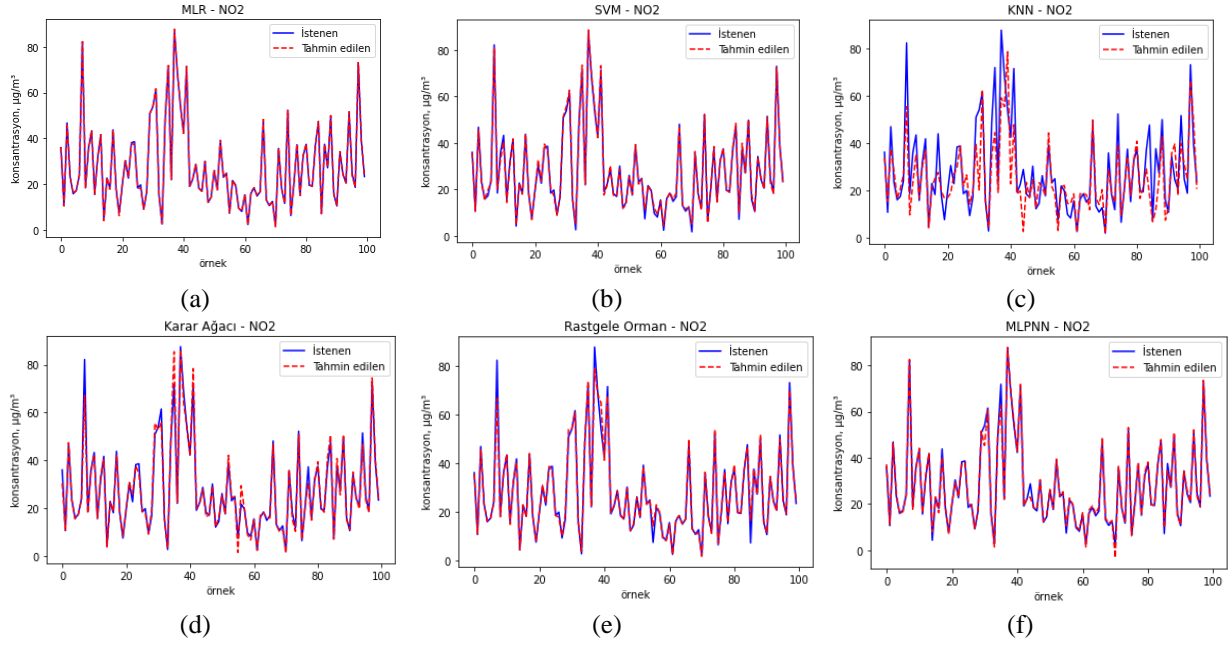
Şekil 3. PM_{10} kirleticisi tahmini için (a) MLR, (b) SVM, (c) KNN, (d) Karar ağacı, (e) Rastgele orman ve (f) MLPNN yöntemleri kullanılarak elde edilen grafikler.

SO_2 kirleticisine ilişkin tahmin edilen ve istenen veriler karşılaştırılmalı olarak Şekil 4' te verilmiştir. Rastgele Orman ve Karar Ağacı yöntemleri ile yapılan tahminlerin MLR, KNN ve SVM yöntemlerine kıyasla istenen değerlerle daha iyi örtüştüğü görülmektedir.



Şekil 4. (a) MLR, (b) SVM, (c) KNN, (d) Karar ağacı, (e) Rastgele orman ve (f) MLPNN yöntemleri ile SO_2 kirleticisi tahmini için elde edilen grafikler.

Çeşitli makine öğrenme yöntemleri ile gerçekleştirilen NO_2 tahminine ilişkin grafikler, Şekil 5' te istenen değerlerle birlikte sunulmuştur. Şekil 5 (a) ve (b)'den görüldüğü üzere, MLR ve SVM kullanılarak istenen değerlere oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir. KNN yöntemi diğer yöntemlere kıyasla daha düşük başarı göstermiştir.



Şekil 5. NO₂ kirlenici tahmini için (a) MLR, (b) SVM, (c) KNN, (d) Karar ağacı, (e) Rastgele orman ve (f) MLPNN yöntemleri kullanılarak elde edilen grafikler.

Kastamonu için yapılan SO₂ hava kirlenici tahmin çalışmasında [5], YSA, Rastgele Orman, KNN, Lojistik Regresyon, Lineer Regresyon, Karar Ağacı ve Basit Bayes yöntemleri kullanılmış ve Karar Ağacı ve Rastgele Orman yöntemleri ile en yüksek performans ($R^2 = 0.97$) ve Lineer Regresyon ile en düşük performans ($R^2 = 0.30$) elde edilmiştir. Bu çalışmada SO₂ için, Rastgele Orman en yüksek performansı ($R^2 = 0.96$) ve SVM en düşük performansı ($R^2 = 0.76$) sunmuştur. [5] çalışmasına kıyasla çok daha fazla giriş parametresi kullanılmıştır. Çalışma [28]'de PM₁₀ kirlenicisine dayalı olarak hava kirliliği tahmini yapılmış, 4 ve 5 değişken için Regresyon ve YSA yöntemleri kullanılmıştır. Regresyon analizi ile elde edilen MSE değerleri 4 değişken için 297,784 ve 5 değişken için 384,584' tür. 4 ve 5 değişken için YSA kullanılarak sırasıyla 511,167 ve 480,603 MSE değerleri elde edilmiştir. Bu çalışmada ise PM₁₀ için daha yüksek bir öngörü sağlanmış, MLR yöntemi kullanıldığında elde edilen MSE = 259,639 ve MLPNN kullanıldığında ise MSE = 275,197 olarak elde edilmiştir.

Atina (Yunanistan) için yapılan hava kirliliği tahmin çalışmasında [29], NO₂, NO, O₃, CO ve SO₂ kirlenicilerine odaklanılmıştır. MLR ve ileri beslemeli YSA yöntemleri kullanılarak bu 5 atmosferik kirleniciye ilişkin konsantrasyon tahmini yapılmıştır. NO₂ ve O₃ kirlenicileri ele alındığında R^2 değeri her iki yöntem için sırasıyla 0,69 ve 0,8 olarak hesaplanmıştır. CO kirlenicisine ait veriler için MLR yöntemi kullanıldığında elde edilen R^2 değeri 0,73 ve ileri beslemeli YSA yöntemi kullanıldığında ise elde edilen R^2 değeri 0,76 olmaktadır. Son olarak SO₂ kirlenicisi göz önüne alınarak yapılan tahminde, MLR yöntemi kullanılarak bulunan R^2 0,31 ve ileri beslemeli YSA kullanılarak bulunan R^2 0,29' dur. Bu çalışmada, [29] çalışması ile benzer şekilde MLR ve MLPNN yöntemleri de kullanılmıştır. NO₂, O₃, CO ve SO₂ kirlenicilerine ilişkin kirlenici konsantrasyonu tahmini sonrası elde edilen R^2 değerleri sırasıyla Tablo 2' den de görüleceği üzere 0,999 (MLR) ve 0,98 (MLPNN); 0,61 (MLR ve MLPNN); 0,76 (MLR) ve 0,80 (MLPNN); 0,81 (MLR) ve 0,78 (MLPNN)'dir.

Bu çalışmada, tek bir hava kirlenicisi değil önemli hava kirlenicilerinden PM₁₀, CO, SO₂, NO₂ ve O₃ dikkate alınarak bu kirlenicilerin konsantrasyonlarına dayalı olarak etkili bir hava kirliliği tahmini sunulmuştur. Ayrıca birçok makine öğrenmesi yönteminin (MLR, SVM, KNN, Karar Ağaçları, Rastgele Orman ve MLPNN) kullanılması çalışmayı daha kapsamlı kılmıştır.

Literatürdeki benzer çalışmalardan da görüleceği üzere giriş parametreleri seçimi, kullanılan yöntemlerin performansı üzerinde etkilidir. Giriş ve çıkış parametrelerine ilişkin korelasyon tablosu dikkate alınarak sadece aralarında güçlü bir ilişki bulunan parametreler tahmin işleminde giriş olarak kullanılabilir. Bu durum, yöntemlerin performansını iyileştirerek yüksek öngörülü tahminler gerçekleştirilmesine yardımcı olabilir.

4. SONUÇ

Günümüzde çeşitli nedenlerle şehirlerde artan nüfus yoğunluğu, beraberinde endüstriyel faaliyetler ve karayolu trafiğinde artış getirmiştir. Bu durum, şehirlerin hava kalitesinin her geçen gün bozulmasında önemli rol oynamaktadır. Bu etkilerin görüldüğü yerlerden biri, İstanbul ili Başakşehir ilçesidir. Çalışma kapsamında Başakşehir için hava kirliliği tahmini, MLR, SVM, KNN, Karar Ağaçları, Rastgele Orman ve MLPNN yöntemleri ile PM₁₀, CO, SO₂, NO₂ ve O₃ konsantrasyonlarına dayalı olarak tahmin edilmiştir. Kullanılan yöntemler arasında PM₁₀, CO, SO₂ ve O₃ için Rastgele Orman ve NO₂ için MLR yöntemi, en az hata ile daha başarılı kirlenici konsantrasyonu tahmini gerçekleştirmiştir.

Hava kirliliğine etki eden kirlenicilerin yüksek başarımla tahmini, günlük ortalama kirlenici konsantrasyonlarının sağlık açısından limitleri aşması durumunda, yetkililerin önleyici adımlar atmasına imkan tanıyacaktır. Bu çalışma, gerek İstanbul' un diğer ilçeleri eklenerek tüm şehirdeki gerekse diğer büyük şehirlerdeki hava kirliliğini tahmin etmek ve analiz etmek amacıyla kapsamı genişletilip kullanılabilir. Ayrıca hava kirliliğinin ve dolayısıyla iklim değişikliğinin şehir sakinleri üzerindeki etkisini daha iyi anlamada ve sağlığa olumsuz etkileriyle mücadelede ilgili kurum ve kuruluşlara yardımcı olabilir. Çalışmada kullanılan hava kirlenici verileri, daha fazla çevresel veri (örneğin, meteoroloji ve trafik verileri) ile birleştirilerek makine öğrenimi gerçekleştirilebilir, böylece tahmin doğruluğu artırılabilir ve kirlilik seviyesinin gerçek zamanlı tahmini yapılabilir.

Teşekkür

Yazarlar, İstanbul Büyükşehir Belediyesi Çevre Koruma ve Kontrol Daire Başkanlığı Çevre Koruma Müdürlüğü Hava Kalitesi İzleme Merkezi'ne, bu araştırma çalışmasını gerçekleştirmemizi sağlamak için hava kalitesi verilerini kullanıma sundukları için teşekkür eder.

Yazar Katkıları

Yazarlar çalışmaya eşit oranlı katkı sunmuşlardır.

Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler

KAYNAKÇA

- [1] WHO.(2021,20 Aralık). Ambient air pollution [Çevrimiçi].Erişim:https://www.who.int/teams/envir onment-climate-change-and-health/air-quality-and-health/ambient-air-pollution.
- [2] Ö. Zeydan, "2019 yılında Türkiye'deki partikül madde (PM10) kirliliğinin değerlendirilmesi", Journal of the Institute of Science and Technology, vol. 11, no.1, pp. 106-118, 2021.
- [3] T. Sarver, A. Al-Qaraghuli, and L. L. Kazmerski, "A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 22, pp. 698-733, 2013.
- [4] D. Sanjeev, "Implementation of machine learning algorithms for analysis and prediction of air quality", International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), vol. 10, no. 3, pp. 533-538, 2021.
- [5] Y. Gültepe, "Makine öğrenmesi algoritmaları ile hava kirliliği tahmini üzerine karşılaştırmalı bir değerlendirme", Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, vol. 16, pp. 8-15, 2019.
- [6] M. E. Ekinçi, "Destek Vektör Regresyon ile hava kirliliği tahmini", Yüksek lisans tezi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, 2017.
- [7] M. E. Irmak, and İ. B. Aydılek, "Hava kalite indeksinin tahmin başarısının artırılması için topluluk regresyon algoritmalarının kullanılması", Academic Platform Journal of Engineering and Science, vol. 7, no. 3, pp. 507-514, 2019.
- [8] E. Arnaudo, A. Farasin, and C. Rossi, "A Comparative analysis for air quality estimation from traffic and meteorological data", Applied Science, vol. 10, no. 13, pp. 4587(1-20), 2020.
- [9] A. Altunkaynak, E. E. Başakın, and E. Kartal, "Dalgacık K-en yakın komşuluk yöntemi ile hava kirliliği tahmini", Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering, vol. 25, no. 3, pp. 1547-1556, 2020.
- [10] Q. Zhang, F. Fu, and R. Tian, "A deep learning and image-based model for air quality estimation", Science of The Total Environment, vol. 724, pp. 138178 (1-11), 2020.
- [11] S. Aydın, M. Taşyürek, and C. Öztürk, "Derin Öğrenme Yöntemi ile İç Anadolu Bölgesi ve Çevresi Hava Kirliliği Tahmini", Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, pp. 168-173, 2021.
- [12] M. Alghith, R. Alawaji, S. H. Saleh, and S. Alh, "Air pollution forecasting using deep learning", International Journal of Online & Biomedical Engineering, vol. 17, no. 14, pp. 50-64, 2021.

- [13] K. Kaya, "Veri madenciliği yöntemleri kullanarak hava kirliliği tahmini", Yüksek lisans tezi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2019.
- [14] M. Gayathri, R. Shankar, and S. Duraisamy, "Air pollution prediction using data mining technique", International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), vol. 7, no. 8, pp. 4292-4297, 2020.
- [15] Y. Dokuz, A. Bozdağ, and B Gökçek, "Hava kalitesi parametrelerinin tahmini ve mekansal dağılımı için makine öğrenmesi yöntemlerinin kullanılması", Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, vol. 9, no. 1, pp. 37-47, 2020.
- [16] M. Strak, G. Weinmayr, S. Rodopoulou, J. Chen, K. de Hoogh, Z. J. Andersen et al., "Long term exposure to low level air pollution and mortality in eight European cohorts within the ELAPSE project: pooled analysis", BMJ 2021, vol. 374, no. 1904, pp. 1-11, 2021.
- [17] WHO global air quality guidelines, "Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide", Geneva: World Health Organization, 2021, p. 17.
- [18] S. Cindoruk, "Havadaki NO ve NO₂ parametrelerinin Marmara Temiz Hava Merkezi ölçümleri kapsamında incelenmesi", Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, vol. 7, no. 2, pp. 600-611, 2018.
- [19] D. Grano, "Clean Air Act requirements: Effect on Emissions of NO, from stationary sources. In: Ozkan, U.S., Agarwal, SK. And Marcelin, G. (Eds.), Reduction of Nitrogen Oxide Emissions, ACS Symposium Series 587", American Chemical Society, Washington, DC, pp. 14-31, 1995.
- [20] Resmi Gazete (Sayı: 26898). (2021, 20 Aralık). Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği [Çevrimiçi]. Erişim: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2008/06/20080606-6.htm>.
- [21] T. C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2021, 29 Aralık). Hava kalitesi izleme sistemi [Çevrimiçi]. Erişim: <https://sim.csb.gov.tr/Home/HKI?baslik=HAVZA%20%C4%B0ZLEME%20S%C4%B0STEM%C4%B0>.
- [22] UK AIR Air Information Resource. (2021, 29 Dec). Effects of air pollution [Online]. Available: <https://uk-air.defra.gov.uk/air-pollution/effects>.
- [23] İstanbul Büyükşehir Belediyesi Çevre Koruma ve Kontrol Daire Başkanlığı Çevre Koruma Müdürlüğü Hava Kalitesi İzleme Merkezi. (2021, 31 Aralık). Başakşehir (Sanayi-Kentsel) [Çevrimiçi]. Erişim: <https://havakalitesi.ibb.istanbul/Pages/AirQualityDetails/6d169752-eabc-4f7e-87ea-6cf10b452486>.
- [24] T. Hastie, R. Tibshirani, J. H. Friedman, and J. H. Friedman, "The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction", Springer, vol. 2, pp. 1-758, 2009.
- [25] S. Tolun, "Destek vektör makineleri: Banka başarısızlığının tahmini üzerine bir uygulama", İktisadî Araştırmalar Vakfı, 2008.
- [26] J. Y. Hsia, and C. J. Lin, "Parameter Selection for Linear Support Vector Regression", IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, vol. 31, no. 12, pp. 5639-5644, 2020.
- [27] D. Chicco, M. J. Warrens, and G. Jurman, "The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation", PeerJ Computer Science, vol. 7, pp. 1-24, 2021.
- [28] İ. Akbulut, and B. Özcan, "Hava Kirliliği Tahmini: Yapay Sinir Ağları ve Regresyon Yöntemleriyle Bir Karşılaştırma", Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi vol. 3, no. 1, pp. 12-22, 2020.
- [29] A. Alimissis, K. Philippopoulos, C.G. Tzani, and D. Deligiorgi, "Spatial estimation of urban air pollution with the use of artificial neural network models", Atmospheric Environment, vol. 191, pp. 205-213, 2018.



Modelling and Control of Single-Phase Bidirectional AC/DC Converter Used in Microgrid Energy Systems

Mikroşebeke Enerji Sistemlerinde Kullanılan Tek Fazlı İki Yönlü AC/DC Dönüştürücünün Modellenmesi ve Kontrolü

¹Evren ISEN 

¹Bandırma Onyedil Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Electrical Engineering, Bandırma/Balıkesir, Turkey

eisen@bandirma.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

ARTICLE INFO

Article history

Received : 2 March 2022

Accepted : 25 March 2022

Keywords:

Converter Modelling,
Hysteresis Current Control,
Inverter, Microgrid, PWM
Rectifier

ABSTRACT

In this study, bidirectional single-phase PWM AC/DC converter that is used in microgrid systems at connection point to the grid, is modelled and controlled. PWM signals of the converter is generated with hysteresis current control technique. The mathematical model is developed in Matlab/Simulink. The converter with 5 kW active power capability is examined in rectifier and inverter mode for steady-state and transient response. Two operation modes of the converter is existed by changing power of the DC load and source. The converter transfers the energy from grid to DC bus in rectifier mode while the energy in the DC bus is transferred to grid in inverter mode. The grid current THD% values meet IEEE 1547 and IEEE 519 standards in both modes with 1.52%. The reactive power support of the converter with phase angle control of the grid current is presented. In both modes, reactive power of 500-900 VAR are provided. The obtained results show the availability of the modelling and control of the converter for active and reactive power generating.

© 2022 Bandırma Onyedil Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Science. Published by Dergi Park. All rights reserved.

MAKALE BİLGİSİ

Makale Tarihleri

Gönderim : 2 Mart 2022

Kabul : 25 Mart 2022

Anahtar Kelimeler:

Dönüştürücü Modelleme,
Histerezis Akım Kontrol,
İnverter, Mikroşebeke, PWM
Doğrultucu

ÖZET

Bu çalışmada mikroşebeke sistemlerde şebeke bağlantı noktasında kullanılan iki yönlü tek fazlı PWM AC/DC dönüştürücünün modellenmesi ve kontrolü yapılmıştır. Dönüştürücü kontrolü PWM sinyalleri histerezis akım kontrolü ile elde edilmiştir. Matlab/Simulink ortamında sistemin matematiksel modeli geliştirilmiştir. Dönüştürücü inverter ve doğrultucu modunda 5 kW aktif güç kapasitesinde kararlı hal ve geçici durum cevabı incelenmiştir. Sistemde yeralan DC yük ve kaynağın gücü değiştirilerek dönüştürücünün çalışma modunda değişiklik sağlanmıştır. Dönüştürücü doğrultucu modunda enerjiyi şebekeden DC baraya doğru gönderirken inverter modunda DC baradan şebekeye enerji transferi gerçekleşmiştir. Şebeke akımı %THD değeri incelendiğinde IEEE 1547 ve IEEE 519 standartları her iki çalışma modunda da %1,52 bozulma oranı karşılanmaktadır. Dönüştürücünün doğrultucu ve inverter modunda çalışmasında reaktif güç kontrolü şebeke akımı faz açısı kontrolüyle sağlanmıştır. İki çalışma modunda 500 ile 900 VAR arasında referans değerlerde reaktif güç üretimi ve tüketimi sağlanmıştır. Elde edilen sonuçlar geliştirilen dönüştürücü modelinin ve kontrolünün dönüştürücü aktif ve reaktif güç üretimindeki uygunluğunu göstermektedir.

© 2022 Bandırma Onyedil Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi. Dergi Park tarafından yayınlanmaktadır. Tüm Hakları Saklıdır.

1. INTRODUCTION

Due to the depletion of fossil fuels and environmental factors, the use of clean energy is increasing rapidly. With the technological developments in renewable energy systems, there is an increase in distributed power systems and microgrid systems. [1]. Microgrids are energy systems in which different energy sources such as wind turbines, solar panels, hydrogen fuel cells, diesel generators, and batteries are used as storage units, together with the AC grid. Since these systems are installed in areas close to the consumer, they also reduce the losses in energy transmission. They are advantageous systems in terms of efficiency as well as clean energy [2]. In recent years, studies on microgrid systems where renewable energy sources are used and loads can be fed without the need for a grid have become widespread. These systems are called AC microgrid [3], DC microgrid [4] and hybrid microgrid [5], [6] systems as seen in **Figure 1**. These systems include DC and/or AC power supplies. However, since it can be found in both sources in these systems, energy conversion is required. It is possible to convert AC voltage to DC voltage or from DC voltage to AC voltage. For this reason, power electronic converters such as inverter and rectifier circuits are used [7]. If bidirectional conversion is required depending on the operating mode at the same point, a bidirectional PWM AC/DC converter is used at this point. [8]. The converter gives the energy it receives from the grid to the DC bus. However, when the system operating mode changes, it can also give the energy in the DC bus to the grid. This is provided by the bidirectional operation feature. This type of converters are also used in electric vehicles, which are the automobile technology of the future, to transfer energy from the grid to the battery and from the battery to the grid if necessary [9]. It can be used as single-phase and three-phase depending on the power level. Control methods such as bipolar and unipolar PWM [10], hysteresis current control [11], space vector control [12] are used in this converter control. Space vector modulation method is used as an effective method especially in three-phase converter type [13]. The successful operation parameter of this converter in rectifier mode is a smooth DC link voltage regulation, high power factor and low harmonic grid current. It is also low harmonic grid current and high power factor in inverter mode. Basically, while the grid current is in phase with the voltage, that is, high active power transfer is expected, it is also desired to transfer reactive power in special cases [14].

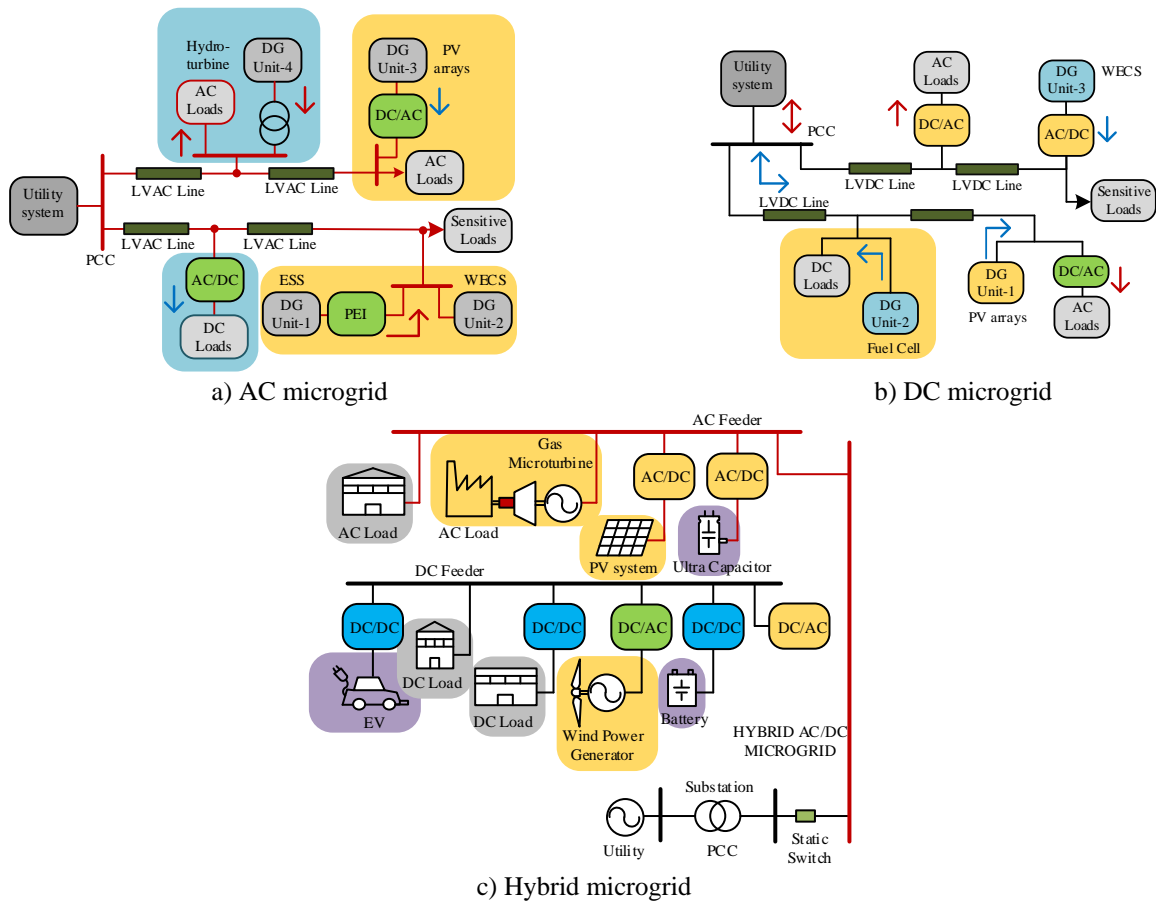


Figure 1. Microgrid systems [15, 16].

Microgrid networks can be high-powered as well as being realized in domestic dimensions. The energy produced in these systems, in which wind turbines, solar panels, batteries, and electric vehicles are used, is transmitted to the loads via the AC bus. Thus, there is no need to change the domestic electrical infrastructure [17]. In systems using photovoltaic panels as energy source and lithium-ion batteries as energy storage element, bidirectional

AC/DC converter is used to ensure that the energy transfer in both directions. Depending on the balance of power produced from solar panels and load demand, the flow of energy from the grid to the system or from the system to the grid is controlled [18]. Domestic microgrids can be set up individually as well as locally for more than one household load. A study was carried out on the microgrid modelling and control using photovoltaic panels and batteries for a region with 35 houses in Morocco [19]. Energy and cost savings can be achieved by controlling the individual load of each house in the microgrid designed for regional domestic load, where wind turbines are used as well as photovoltaic panels and batteries [20].

In this study, a single-phase bidirectional AC/DC converter circuit used at the AC grid connection point in microgrid network is simulated. The mathematical model simulation of the converter is carried out in Matlab/Simulink environment. Steady state and transient response are investigated by operating the converter designed with 5 kW power in rectifier and inverter modes. In addition to active power capability, reactive power capability of the converter is presented in both modes for 500-900 VAR reactive power. The mode transition is provided by changing the source and load power. The controller succeeds to transit between operation modes. The converter controlled by hysteresis current control (HCC) transfers the energy from the grid to the DC bus in the rectifier mode, while the energy in the DC bus is transferred to the grid in the inverter mode. As the converter is connected to the grid, required synchronization is provided by *dq-PLL* technique. The grid current total harmonic distortion value for both mode meets the standards that are IEEE 1547 and IEEE 519, with 1.52%. With control of the angle of grid current, it is provided to control reactive power.

2. SINGLE-PHASE GRID CONNECTED BIDIRECTIONAL AC/DC CONVERTER

In Figure 2, the circuit diagram of the single-phase bidirectional AC-DC rectifier is given. The converter is connected to the grid via inductance. This inductance is also used in current filtering. It is a filter type that should be used in order for the grid current to have the harmonic content determined in the standards. Although less effective than other filter types, it is preferred in terms of design and control algorithm simplicity. A full bridge converter is included to adjust the conversion and flow of energy. The converter, which contains four switches consisting of a fully controlled semiconductor and a diode connected in reverse parallel to it, can provide bidirectional power flow with PWM control. There is a capacitor at the converter output where the DC bus voltage is provided. The output contains the current source as a simple energy source modelling and the load. The converter power flow direction changes depending on the load's power demand, energy supply power and DC bus voltage value. In this study, the energy balance of the system is changed by changing the source and load current in order to examine the operation in the rectifier and inverter modes, and the mode change of the rectifier is provided.

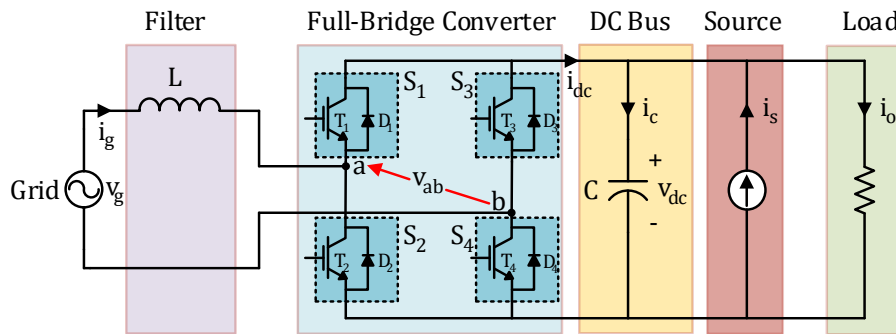


Figure 2. Single-phase grid-connected bidirectional AC-DC rectifier.

Mathematical model of the rectifier is given in (1)-(7). Depending on the voltage law, grid voltage is the sum of inductor voltage and rectifier terminal voltage (v_{ab}) as seen in (1). In the equation, r_L defines the equivalent resistor of the inductor. The differential equation is used to calculate the grid current. Rectifier terminal voltage is equal to voltage difference of terminal points as seen in (2). The voltages of terminals changes depending on the switching state. Equation (3) and (4) gives the voltages of terminal points. In the equations, S_1 and S_3 takes the same value with S function that takes value 1 and -1 . At the output of the rectifier, the flowing current (i_{dc}) depends on grid current. Equation (5) shows the relation between two currents. In the DC side of the rectifier, Equation (6) can be written based on current law. The calculated capacitor current in the equation is used in Equation (7) to calculate capacitor voltage. Using the equations below, a bidirectional rectifier can be derived and simulated.

$$\frac{di_g}{dt} = \frac{v_g - r_L i_g - v_{ab}}{L} \quad (1)$$

$$v_{ab} = v_a - v_b \quad (2)$$

$$v_a = S_1 v_{dc} \tag{3}$$

$$v_b = S_3 v_{dc} \tag{4}$$

$$i_{dc} = S i_g \tag{5}$$

$$i_c = i_{dc} + i_s - i_o \tag{6}$$

$$\frac{dv_c}{dt} = \frac{i_c}{C} \tag{7}$$

The converter operates in rectifier or inverter mode depending on the energy flow. The operating mode of converter changes with the change of grid current flow direction. The modes are examined below. T_x and D_x define transistor and diode of number x , respectively.

2.1. Rectifier Mode

In this mode, the converter works as a PWM rectifier. The energy flows from grid to the DC bus as shown in Figure 3. In the half-period when the grid voltage and current are positive, the T_2 and T_3 switches turn on, and the current drawn from the grid increases. The current passes through the switches and reaches the negative terminal of the DC bus. It causes the decreasing of DC bus voltage. In the same period, when the signals of T_2 and T_3 switches are cut, they turn off, and D_1 and D_4 diodes turn on. In this time interval, the current drawn from the grid decreases, and this current increases the DC bus voltage through the diodes. In the other half-period, when the grid current and voltage are negative, with the T_1 and T_4 switches turning on, the grid current increases in the negative direction, and DC bus discharges. D_2 and D_3 diodes turn on, and the grid current decreases in the negative direction when the T_1 and T_4 switches are off. The DC bus discharges, and thus voltage decreases. The changes in current and voltage depending on the switching signals are given in Table 1.

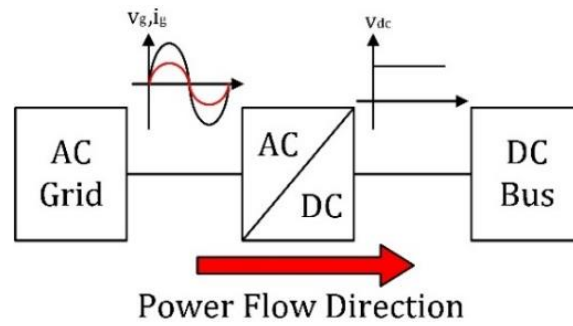


Figure 3. Power flow in rectifier mode.

Table 1. Switching states and electrical quantities.

Mode	Switching		Rectifier and Inverter Mode					Rectifier Mode		Inverter Mode	
	S_1, S_4	S_2, S_3	i_{T2}, i_{T3}	i_{D1}, i_{D4}	i_{T1}, i_{T4}	i_{D2}, i_{D3}	V_{dc}	i_g	v_g	i_g	v_g
1	1	0		↘			↘	↘+	+	↘+	-
2	0	1	↗				↘	↗+	+	↗+	-
3	1	0			↗		↘	↗-	-	↗-	+
4	0	1				↘	↗	↘-	-	↘-	+

2.2. Inverter Mode

The converter runs in inverter mode to convert DC to AC. The energy in DC bus is transferred to the grid by proper switching. The grid current flows in opposite direction according to the rectifier mode. As seen in the Figure 4, the grid current and voltage are in reverse polarity to each other. The change of electrical quantities depending on the switching states are seen Table 1. In the half cycle that voltage is positive and the current is negative, D_2 and D_3 diodes are on when the switching signals are off. The grid current increases in the negative direction, and DC bus voltage decreases. The DC bus voltage increases with D_2 and D_3 diodes are on after T_1 and T_4 switches turn off. The grid current decreases in this time interval. The changes for the other cycle that grid voltage is negative and current is positive, can be seen in Table 1.

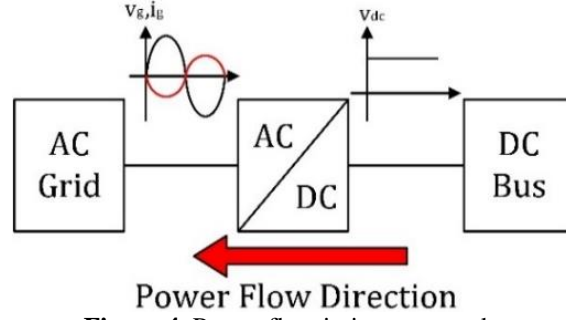


Figure 4. Power flow in inverter mode.

The operation modes of the converter that are explained before are seen in Figure 5. Figure 5a, Figure 5b, Figure 5c and Figure 5d show the topology in mode 1, mode 2, mode 3 and mode 4, respectively. As seen in Table 1, the current of solid-state switches, the grid current and DC bus voltage are affected the same in both inverter and rectifier mode. Therefore, the topologies that are given in Figure 5 is valid for both of them. The difference between rectifier and inverter modes is grid voltage sign. The variation of current and voltage is the same with different grid voltage sign. The same result is observed for the different half cycle of the grid voltage. It means that the same results are obtained in positive half cycle of the grid voltage in rectifier mode with the inverter mode for negative half cycle of the grid voltage.

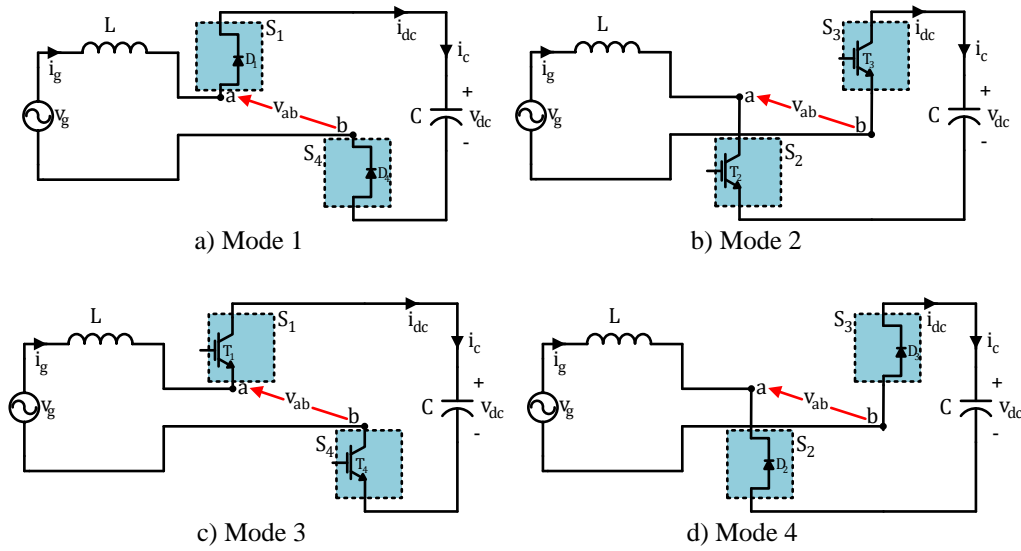


Figure 5. Operation modes of the converter.

3. SIMULATION STUDY

The single-phase bidirectional AC/DC converter is simulated in Matlab/Simulink using mathematical model derived in section 2. The model and control algorithm integrated into Simulink are seen Figure 6. In the model grid voltage is applied with a sinusoidal voltage source. The grid angle (*theta*) is obtained from *PLL*, and it is used in the control algorithm for synchronization. The grid current reference is generated using the DC bus voltage regulation and grid angle. In the control of the rectifier, *HCC* is used to shape the grid current.

In the control of the converter for two modes, the synchronization with the grid is required. Therefore, grid angle must be determined. There are different synchronization methods in the literature. In this study, single phase *PLL* method is used as seen in Figure 6 [21]. *PLL* method is widely used in three-phase systems [22]. Three-phase quantities are converted to two phase quantities in $\alpha\text{-}\beta$ coordinate system. However, there is only a phase in single-phase systems, the other component is obtained with shifting the grid voltage by 90° . $\alpha\text{-}\beta$ components are seen in Figure 7(a). β - component lags by 90° from α -component.

The equations of grid voltage components are given in Equation (8) and Equation (9).

$$v_{g\alpha} = V_{\max} \sin(\omega t) \tag{8}$$

$$v_{g\beta} = V_{\max} \sin(\omega t - 90^\circ) \tag{9}$$

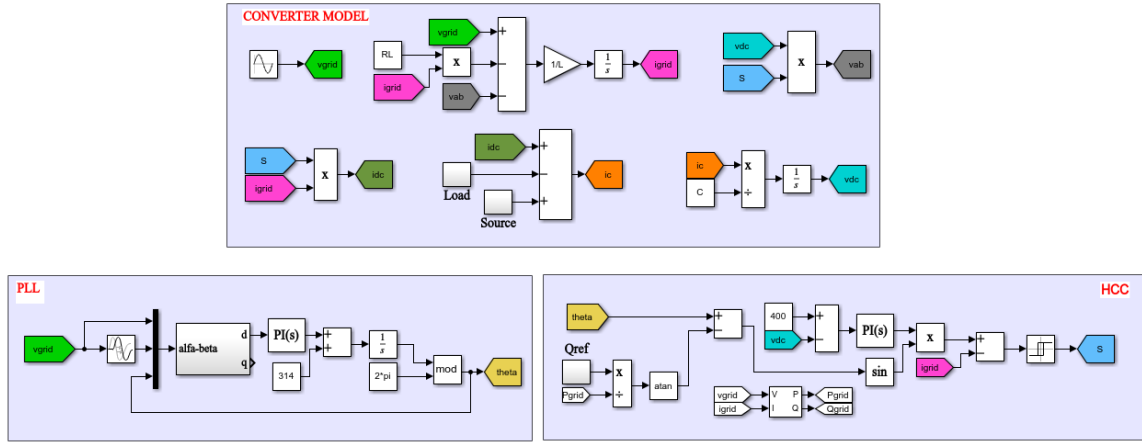


Figure 6. Mathematical model of the bidirectional PWM converter.

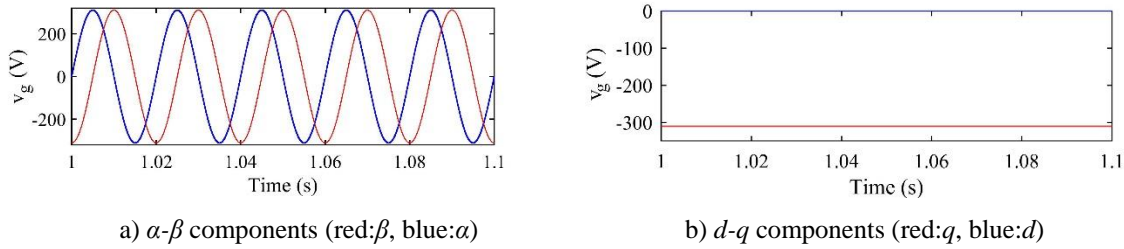


Figure 7. Grid voltage components in α - β and d - q coordinate systems.

As the α - β coordinate system components are sinusoidal, they are converted into d - q coordinate system by a transform matrix given in Equation (10). Thus, sinusoidal components are transformed to DC quantities. It makes the calculations easier. The d - q components are seen in Figure 7(b). d -component are used to determine the grid angle. The angle provides grid synchronization. If the grid angle is known, the active and reactive power could be controlled by changing the phase difference between grid voltage and current.

$$\begin{bmatrix} v_{gd} \\ v_{gq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{g\alpha} \\ v_{g\beta} \end{bmatrix} \quad (10)$$

The circuit parameters that are used in the simulation are given in Table 2. The load and source power is 5 kW, and DC bus voltage is 400 V. In the rectifier mode, the converter regulated the DC bus to 400 V. The grid voltage 220 V, 50 Hz. The filter inductor and capacitor values are 3 mH and 4700 μ F, respectively. Figure 8 shows the grid current and switching function. In HCC algorithm, current error is calculated with $i_{gref} - i_g$ equation, and switching function is generated depending on the error value. If the error goes down to negative hysteresis band value ($-\Delta i$), it means the grid current reaches to upper limit, and S function takes value 1. In the other state, S function is 0 when the grid current goes down to lower limit. The S function variation depending on the grid current is seen in Figure 8. The Figure 9 shows the grid current for nominal power and grid angle. As seen in Figure 9(a), grid current is synchronized with grid voltage because the grid angle determination algorithm detects the angle well as seen in Figure 9(b).

Table 2. Parameters of bidirectional AC/DC converter and control.

Parameters	Value
AC grid voltage (v_g)	220 V
DC bus voltage (v_{dc})	400 V
Maximum Load Power (P_{omax})	5 kW
Maximum Source Power (P_{smax})	5 kW
Capacitance (C)	4700 μ F
Filter inductance (L)	3 mH
Hysteresis band (Δi)	0.6 A
K_p, K_i in PLL	2, 1
K_p, K_i in HCC	0.2, 2

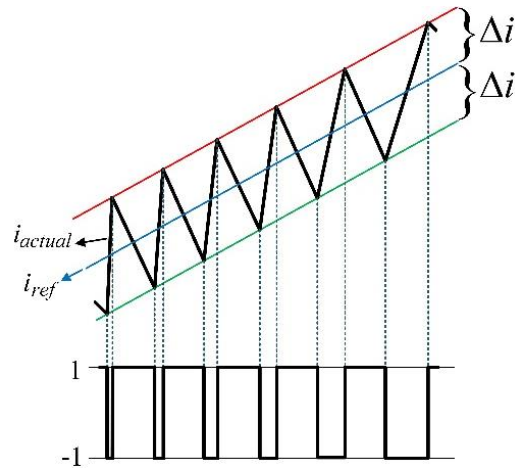


Figure 8. Switching function (S) pattern.

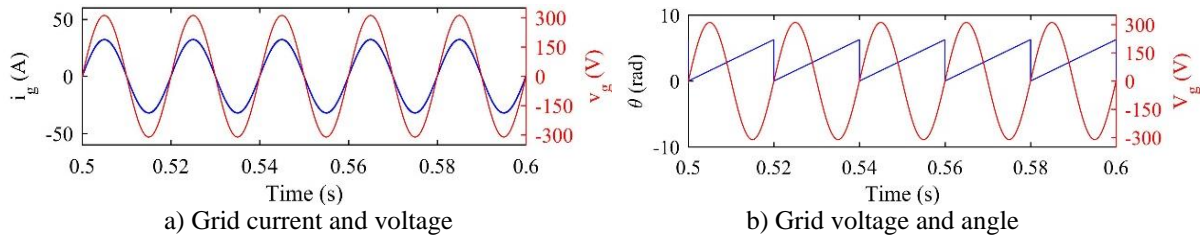


Figure 9. Steady-state grid synchronization.

The steady-state and dynamic response of the system are seen in Figure 10. While the converter operates at rectifier mode up to 1.2 seconds, the operation mode switches to inverter mode after that time as shown in the Figure 10. The harmonic content of the current for nominal power is $THD_i=1.52\%$ in both modes. Figure 11 shows the current waveform in the transition of the modes. As seen in Figure 11, the direction of the grid current changes after 1.2 seconds. The phase difference between the voltage and current becomes 180° . It means the power flow changes the direction. Before mode change, the power flows from the grid to the system, while it flows from the system to the grid after transition. The reason of the mode transition can be seen from Figure 12. The variations of load and source power and grid power are given in Figure 12(a) and Figure 12(b), respectively. At the transition moment, the load and source power are the same, and the grid power is zero. After that time, the grid power becomes negative because source power is higher than the load power. The excess of the generated power is transferred to the grid. In the steady-state and transient, the DC bus voltage is regulated by the controller. The reference DC bus voltage is set to 400 V_{dc} in the system, and it is regulated as seen in Figure 13.

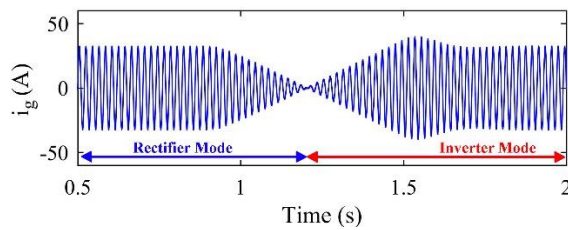


Figure 10. Grid current.

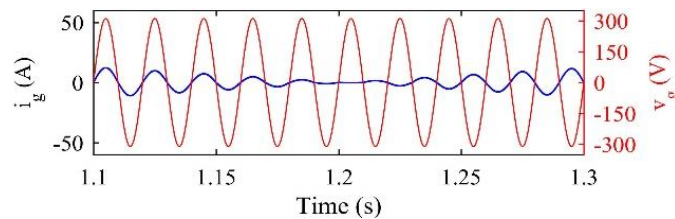


Figure 11. Grid current waveform with grid voltage in rectifier to inverter mode transition.

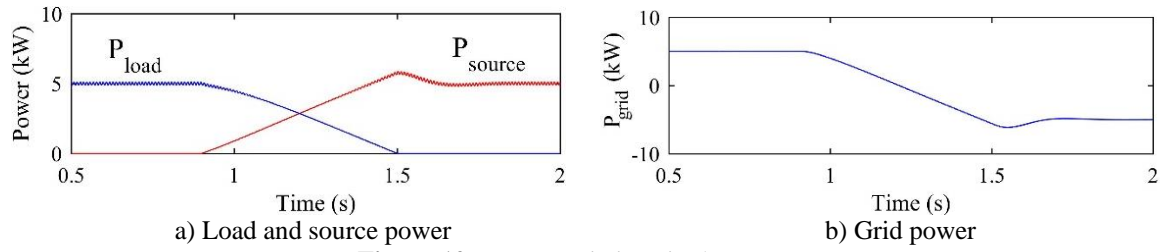


Figure 12. Power variations in the system.

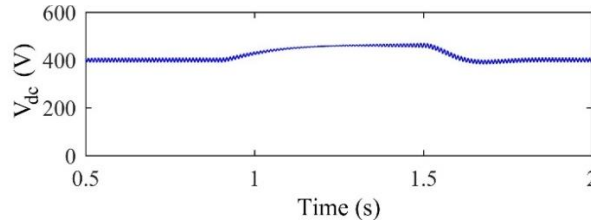


Figure 13. DC bus voltage waveform.

The grid connected systems have a reactive power compensation skill. It is modelled in the simulation to present the feature of reactive power compensation. As seen in Figure 14, different reference reactive power values are applied to the controller. 900, 500 and 750 VAR reactive power variation of grid is seen in Figure 14(a) for rectifier mode. Figure 14(b) shows the reactive power variation of 750, 500 and 800 VAR in inverter mode.

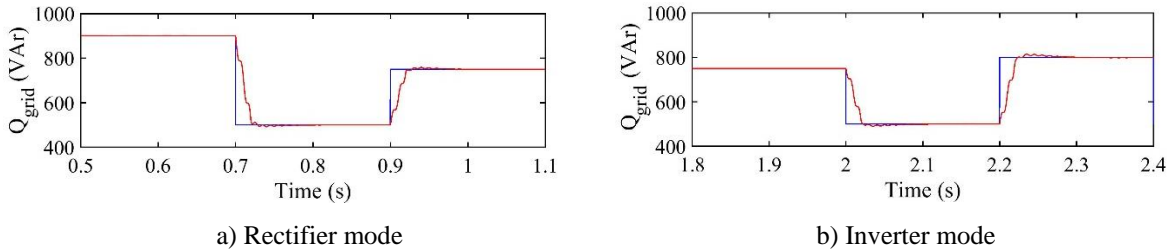


Figure 14. Reactive power variation (Blue: reference value, red: actual value).

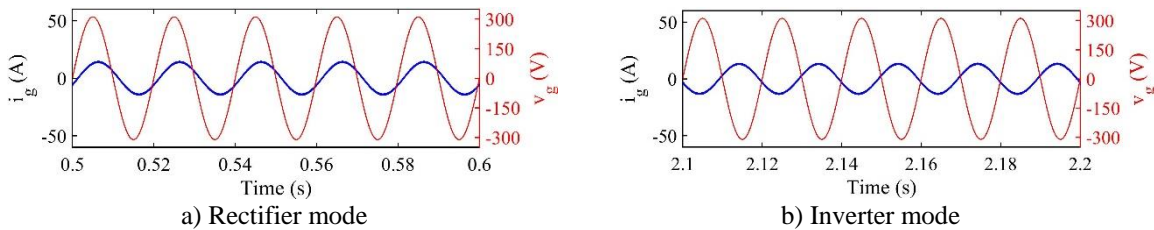


Figure 15. Grid current and voltage for reactive power.

4. CONCLUSION

In this study, a 5 kW single-phase bidirectional AC-DC converter is modelled and controlled in Matlab/Simulink. The converter is connected to the grid, and it is operated in rectifier and inverter modes. As the converter is grid connected, the synchronization is required, and the synchronization with the grid is achieved by phase-lock-loop in $d-q$ coordinate system. In both modes, the converter is controlled by hysteresis current control technique. In order to examine the operating performance of the converter in two modes, a DC load and a current source representing the renewable energy source are connected to the DC bus. Thus, the power balance of the system is changed, and the converter is enabled to operate in different modes. With the control of the converter, the grid current THD value for both operating modes meet the standards with 1.52%. The converter, which works synchronously with the grid, and works with a high power factor in normal operation. As reactive power compensation is required in microgrid systems, reactive power ability of the converter is simulated for 500-900 VAR reactive power. The simulation results shows the ability of reactive power capability of the converter in both modes, successfully.

Statement of Conflict of Interest:

Author has declared no conflict of interest.

Author's Contributions:

The contribution of the authors is equal.

REFERENCES

- [1] I. Cetinbas, B. Tamyurek, and M. Demirtas, "Optimal Design of a Microgrid with PV Generation and Energy Storage Unit to Reduce Electricity Cost in Eskisehir Osmangazi University Campus", *EMO Bilimsel Dergi*, vol. 8, no. 1, pp. 33-38, 2018.
- [2] A. S. Aziz, M. F. N. Tajuddin, M. R. Adzman, M. A. M. Ramli and S. Mekhilef, "Energy Management and Optimization of a PV/Diesel/Battery Hybrid Energy System Using a Combined Dispatch Strategy", *Sustainability*, vol. 11, no. 683, pp. 1-26, 2019.
- [3] D. Emara, M. Ezzat, A. Y. Abdelaziz, K. Mahmoud, M. Lehtonen and M.M.F. Darwish, "Novel Control Strategy for Enhancing Microgrid Operation Connected to Photovoltaic Generation and Energy Storage Systems", *Electronics*, vol. 10, no. 1261, pp. 1-17, 2021.
- [4] S. Vasantharaj, V. Indragandhi, V. Subramaniaswamy, Y. Teekaraman, R. Kuppasamy and S. Nikolovski, "Efficient Control of DC Microgrid with Hybrid PV-Fuel Cell and Energy Storage Systems", *Energies*, vol. 14, no. 3234, pp. 1-18, 2021.
- [5] J. Jiao, R. Meng, Z. Guan, C. Ren, L. Wang and B. Zhang, "Grid-connected Control Strategy for Bidirectional AC-DC Interlinking Converter in AC-DC Hybrid Microgrid", *IEEE 10th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, pp. 341-345, 2019.
- [6] F. Gao, X. Wang, P. Yang, S. Kou and M. Sun, "Research and Simulation of Hybrid AC/DC Microgrid", *4th International Conference on HVDC*, pp. 1276-1280, 2020.
- [7] X. Wang, J.M. Guerrero, F. Blaabjerg and Z. Chen, "A Review of Power Electronics Based Microgrids", *International Journal of Power Electronics*, vol. 12, no. 1, pp. 181-192, 2012.
- [8] C. Kalavalli, K. ParkaviKathirvelu and R. Balasubramanian, "Single Phase Bidirectional PWM Converter for Microgrid System", *International Journal of Engineering and Technology*, vol. 5, no. 3, pp. 2436-2441, 2013.
- [9] C. K. Gowda, V. G. Khedekar, N. Anandh, L. R. S. Paragond and P. Kulkarni, "Bidirectional on-board EV battery charger with V2H application", *2019 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*, pp.1-5, 2019.
- [10] V. Vivek and V. A. Manjusha, "Bidirectional AC/DC Converter Using Simplified PWM with Feed-Forward Control", *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, vol. 5, no. 7, pp. 12426-12433, 2016.
- [11] E. Isen, "Modeling and Simulation of Hysteresis Current Controlled Single-Phase Grid-Connected Inverter", *17th International Conference on Electrical and Power Engineering*, pp. 322-326, 2015.
- [12] A. Sangari, R. Umamaheswari, M. G. Umamaheswari and S. Lekshmi, "A novel SOSMC based SVPWM control of Z-source inverter for AC microgrid applications", *Microprocessors and Microsystems*, vol. 75, pp. 1-13, 2020.
- [13] E. Isen and A. F. Bakan, "10 kW grid-connected three-phase inverter system: Control, simulation and experimental results", *IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, pp. 836-840, 2012.
- [14] S. Paghdar, U. Sipai, K. Ambasana and P. J. Chauhan, "Active and reactive power control of grid connected distributed generation system", *Second International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)*, pp. 1-7, 2017.
- [15] J. J. Justo, F. Mwasilu, J. Lee and J. W. Jung, "AC-microgrids versus DC-microgrids with distributed energy resources: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 24, pp. 387-405, 2013.
- [16] A. M. R. Lede, M. G. Molina, M. Martinez and P. E. Mercado, "Microgrid Architectures for Distributed Generation: A Brief Review", *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference-Latin America (ISGT Latin America)*, pp. 1-7, 2017.
- [17] E. R. Diaz, E. J. P. Garcia, A. A. Moghaddam, J. C. Vasquez and J. Guerrero, "Real-Time Energy Management System for a Hybrid AC/DC Residential Microgrid", *IEEE Second International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*, pp. 256-261, 2017.
- [18] M. A. Alarcon, R. G. Alarcon, A. H. Gonzalez and A. Ferramosca, "Modeling a residential microgrid for energy management", *2020 Argentine Conference on Automatic Control (AADECA)*, pp. 1-6, 2020.
- [19] K. Tazi, F. Abdi, A. B. Chaka and F. M. Abbou, "Modeling and simulation of a residential microgrid supplied with PV/batteries in connected/disconnected modes-Case of Morocco", *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 9, no. 025503, pp. 1-15, 2017.
- [20] M. M. U. Rashid, M. A. Alotaibi, A. H. Chowdhury, M. Rahman, M. S. Alam, M. A. Hossain and M. A. Abido, "Home Energy Management for Community Microgrids Using Optimal Power Sharing Algorithm", *Energies*, vol. 14, no. 1060, pp. 1-21, 2021.
- [21] C. Picardi, D. Sgro and G. Gioffre, "A simple and low-cost PLL structure for single-phase grid-connected inverters", *SPEEDAM 2010*, pp. 358-362, 2010.
- [22] Z. Ali, N. Christofides, L. Hadjidemetriou, E. Kyriakides, Y. Yang and F. Blaabjerg, "Three-phase phase-locked loop synchronization algorithms for grid-connected renewable energy systems: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 90, pp. 434-452, 2018.



Performance Investigation of Bidirectional Hybrid Long-Haul Optical IM/DD OFDM WDM-PON Using OOK-RSOA Remodulation

OOK-RSOA Modülasyonunu Kullanan Çift Yönlü Karma Optik IM/DD OFDM WDM-PON Sisteminin Performansının İncelenmesi

¹Mahmoud ALHALABI , ²Necmi TAŞPINAR 

¹Institute of Natural and Applied Science, Erciyes University, Kayseri, Turkey,

²Department of Electrical and Electronics Engineering, Erciyes University, Kayseri, Turkey

¹eng.halabi@hotmail.com, ²taspinar@erciyes.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

ARTICLE INFO

Article history

Received : 4 March 2022

Accepted : 1 April 2022

Keywords:

Intensity Modulation and Direct Detection, Orthogonal Frequency Division Multiplexing, Wavelength Division Multiplexing, Passive Optical Network, Reflective Semiconductor Optical Amplifier

ABSTRACT

In this paper, we have studied and simulated bidirectional hybrid long reach Intensity Modulated and Direct Detected Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network (IM/DD-OFDM-WDM-PON) with 100 Gbps of various M-Quadrature Amplitude Modulation (M-QAM) in transmitted downstream signal and 2.5 Gbps On-Off keying (OOK) upstream signal using wavelength reused technique by Reflective Semiconductor Optical Amplifier (RSOA) at Optical Network Unit (ONU). The simple, low cost and colorless long-haul IM/DD-OFDM-WDM-PON based on RSOA is designed to support extreme data rate signal by utilizing Dispersion Compensating Fiber (DCF). All results prove that IM/DD-OFDM-WDM-PON can achieve good Bit Error Rate (BER) performance over propagation length of (300 km for 4-QAM), (200 km for 16-QAM) and (50 km for 64-QAM). For comparison, the performance of the network is studied in terms of BER, the effect of the propagation length on the constellation diagram, and the relation of BER versus bit energy and noise density ratio (Eb/No).

© 2022 Bandırma Onyedi Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Science. Published by Dergi Park. All rights reserved.

MAKALE BİLGİSİ

Makale Tarihleri

Gönderim : 4 Mart 2022

Kabul : 1 Nisan 2022

Anahtar Kelimeler:

Yoğunluk Modülasyonu ve Doğrudan Algılama, Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama, Dalga Boyu Bölmeli Çoğullama, Pasif Optik Ağ, Yansıtıcı Yarı İletken Optik Amplifikatör

ÖZET

Bu makalede, optik ağ birimindeki Yansıtıcı Yarı İletken Optik Amplifikatör (RSOA) ile 2.5 Gbps'lik Açık-Kapalı anahtarlama yukarı akış sinyali ve 100 Gbps'lik çeşitli M- Karesel Genlik Modülasyonu (QAM) aşağı akış sinyali kullanılarak Çift Yönlü Hibrit Uzun Erişim Yoğunluk Modülasyonlu ve Doğrudan Algılanan Optik Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama Dalga Boyu Bölmeli Çoğullamalı Pasif Optik Ağ (IM/DD-OFDM-WDM-PON) simüle edilip incelenmiştir. RSOA'ya dayalı basit, düşük maliyetli ve renksiz uzun mesafeli IM/DD-OFDM-WDM-PON, Dağılım Dengeleyici Fiber (DCF) kullanılarak yüksek veri hızı sinyalini desteklemek için tasarlanmıştır. Tüm sonuçlar, tasarlanan sisteme ait (4-QAM için 300 km), (16-QAM için 200 km) ve (64-QAM için 50 km)'lik yayılma uzunluğuna karşı düşük Bit Hata Oranı (BER) gerçekleştirilerek gösterilmiştir. Karşılaştırma için, bu sistemin performansı BER, yayılma uzunluğunun takımıyıldız diyagramı üzerindeki etkisi ve BER ile bit enerjisi ve gürültü yoğunluğu oranı (Eb/No) arasındaki ilişki açısından incelenmiştir.

© 2022 Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi. Dergi Park tarafından yayınlanmaktadır. Tüm Hakları Saklıdır.

ORCID ID: ¹0000-0002-6532-9881
²0000-0003-4689-4487

1. INTRODUCTION

Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network (WDM-PON) is considered to be a cost-effective solution in optical communication since it provides several advantages such as better performance, higher capacity and long reach of optical fiber [1-2]. Additionally, an Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) technique adds more advantages to WDM-PONs due to the fact that it provides a higher data rate and more flexible bandwidth allocation for Optical Network Units (ONUs) [3]. OFDM is a preferred solution for WDM-PON because it can provide high spectral efficiency, high tolerance to chromatic dispersion and extend the transmission distance. For reducing implementation cost of PONs, colorless optical sources at ONU are used to re-modulate downstream signal with lower upstream bit rate like Reflective Semiconductor Optical Amplifier (RSOA) and injection-locked Fabry–Perot laser diode (FP-LD) [4]. M-QAM in each subcarrier of OFDM signal is used to increase the capacity and efficiency of optical OFDM systems to provide low Bit Error Rate (BER) and high data rate transmission. Intensity modulated/direct detected (IM/DD) optical OFDM system is considered as simple and low cost optical OFDM communication system which can be found in a lot of optical applications [5-9]. Wavelength reused WDM-PONs do not need any extra and external light source in ONU but downstream signal is required. Wavelength reuse technique can improve and provide low cost and wavelength control functionalities of WDM-PONs. Dispersion Compensating Fiber (DCF) is one of the first dispersion compensation approaches to produce negative chromatic dispersion, which helps to improve the system's transmission performance [10].

1.1. Related Works

According to previous published articles that are related to the system, in [11], a bidirectional OFDM-WDM-PON system based on OFDM signal for 40 Gbps downstream transmission and wavelength reused RSOA with OFDM signal for 10 Gbps upstream transmission with direct detection was demonstrated. In [12], bidirectional long reach WDM-PON system delivering 20 Gbps downstream signal and 10 Gbps upstream signal on a same wavelength using locked laser and RSOA was presented and implemented over 45 km optical fiber. In [13], for the next-generation free space optics (FSO) network, a cost-effective RSOA-based bidirectional WDM-Ro-FSO-PON was established. Over a 500 m FSO-link, 10 Gbps downstream, 1.25 Gbps upstream, and 1.49 Gbps video signals were successfully sent. In [14], using Differential Phase Shift Keying (DPSK) downstream signals and OFDM modulated upstream signals, a 10 Gbps bidirectional WDM-PON with RSOA based colorless ONU was studied for Gigabit PON (GPON) up to 25 km fiber transmission. In [15], the utilization of incoherent light to illustrate a wavelength reuse WDM-PON technology was demonstrated. RSOA was employed as a colorless, low-cost optical source that could be reused. Bidirectional communication across 30 km was established at 1.25 Gbps with a BER of 10^{-9} using 100-GHz channel spacing and BER of 10^{-5} using 50-GHz channel spacing. In [16], over a 20-kilometer optical range, a bidirectional RSOA-based WDM-PON with high extinction ratio in both directions was demonstrated using a 10 Gbps DPSK signal for downstream and a 5 Gbps re-modulated OOK signal for upstream. In [17], EDFA-based 40 Gbps downstream and 10 Gbps upstream transmissions long-haul WDM-PON scheme was achieved by using QPSK downstream and fiber bragg grating (FBG) optical equalizer-based RSOA IM-DD for upstream signal over 40 km fiber transmission. In [18], a novel architecture of WDM OFDM-PON was demonstrated for sending 10 Gbps data in two directions over 50 km. Direct detected OFDM signal was used for downstream signal and simple OOK data was used for upstream transmission. In [19], on a single wavelength, a long-haul OFDM WDM-PON with 100 Gbps downstream and 2 Gbps upstream traffic was simulated. At the central office, a CW laser was used for downstream signal, and at each optical network unit, an RSOA was utilized for upstream signal. In [20], Optisystem software was used to simulate a 100 Gbps long haul IM/DD optical OFDM system with various M-QAM modulation schemes. Using dispersion compensation fiber (DCF) inside a fiber channel, simulated system was investigated to provide high data rate transmission for downstream signals. For long reach propagation length, 4-QAM OFDM system had the best BER performance when compared to other simulated systems.

1.2. The Paper's Contributions

The list of contributions confirmed by this paper are given below:

- Simulated system provides 100 Gbps OFDM downstream data rate and 2.5 Gbps OOK upstream data rate, additionally this system with using various M-QAM is designed and simulated by Optisystem software [21] and analyzed to achieve the lowest BER value.
- Transmission length is increased to study its effect on Q factor, BER, constellation diagram and signal spectrums.
- DCF method is provided to improve the system performance of simulated systems.
- RSOA is used as low cost, simple and colorless source in ONU to re-modulate downstream signal and achieve bidirectional optical network.
- As a result, 4 QAM system achieved the lowest BER value for long reach optical communication system.

Paper Organization: In Section 2, system model and description are given. In Section 3, the simulation results and discussion are given. Finally, the paper is completed with the conclusions in Section 4.

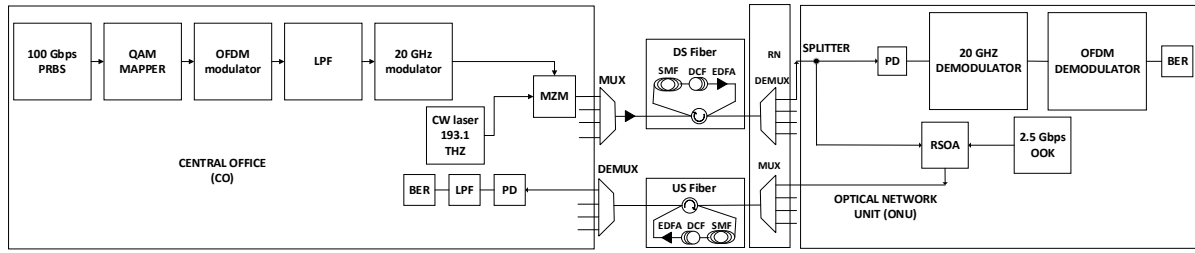


Figure 1. Bidirectional IM/DD OFDM WDM-PON based RSOA scheme.

2. SYSTEM MODEL AND DESCRIPTION

The scheme of our simulated bidirectional WDM-PON is illustrated in Figure 1. Scheme of simulated WDM-PON and simulation results were designed and explained by using OptiSystem. At CO, BER set test is used to both generate 100 Gbps downstream bits and obtain BER value. The transmitted bit rate is equal to 50 Gbps because the number of subcarriers and Fast Fourier Transform (FFT) points are equal to 512 and 1024, respectively. OFDM modulator values and global simulation parameters are given in Table 1. Cyclic prefix (CP) is chosen to be 100 due to Inter Symbol Interference (ISI) between OFDM symbols.

Table 1. Main parameters of simulation.

Global simulation layout parameters	
Bit rate	100 Gbps
Number of samples	65536 to 1048576
Sequence length	16384 to 65536
Samples per bit	4 to 16
OFDM modulator	
Number of subcarriers	512
FFT points	1024
Cyclic prefix	100
Training OFDM symbols	2
CW laser	
Center frequency	193.1 THz
Linewidth	0.1 MHz
Power	2 dBm
PIN Photodetector	
Dark current	10 nm
Responsivity type	InGaAs
RSOA	
Input Facet Reflectivity	50×10^{-6}
Output Facet Reflectivity	50×10^{-6}
Active Length	0.0006 m
Taper Length	0.0001 m
Width	0.4e-006
Height	0.4e-006

At CO, QAM sequence generator converts bit streams into different level value of symbols depending on number of bits per symbol. The transmitted symbols are converted to multilevel electrical pulses by M-ary sequence generator. OFDM modulator is used to modulate transmitted QAM symbols into multiple orthogonal subcarriers. However, FFT points should be doubled according to number of subcarriers. Frequency values are assigned to lower data rate subcarriers from 0 to 12.5 GHz. Modulated OFDM signals are transmitted to low

pass filter which has a cutoff frequency equal to (symbol rate*0.65). Then, these signals are transmitted to quadrature modulator which increases their frequency up to 20 GHz. Transmitted optical signal is generated by applying Continuous Wave (CW) laser at 193.1 THz to Mach-Zehnder Modulator (MZM) which modulates and converts transmitted RF electrical signal. CW laser and PIN photodetector parameters are summarized in Table 1. After MZM, the optical signal is multiplexed by WDM multiplexer which multiplexes a different wavelength downstream signal then the multiplexed signals are amplified by utilizing optical amplifier that has noise floor of 4 dB and gain of 10 dB as basic parameters. The multiplexed optical signal is delivered across (10*loops no. + 50) km SMF with a 0.2 dB/km attenuation, 16 ps/nm/km dispersion, 0.08 ps/nm²/km dispersion slope, and 2.610⁻²⁰ nonlinearity coefficient. DCF is used to overcome generated dispersion caused by the main optical fiber and to improve transmission performance. The DCF value is calculated at the channel based on the main fiber length. To compensate for channel loss and boost the optical signal, another optical amplifier is utilized. The amplified optical signal is demultiplexed at the Remote Node (RN) using a WDM demultiplexer with an 80 GHz bandwidth. At the ONU side, optical splitter which is considered as a passive component is used to split optical downstream signal into two parts. Part of the incoming optical signal is received by PIN photodetector that converts it to an electrical signal. Parameters of PIN photodetector are assigned as center frequency and dark current equal to 193.1 THz and 10 nA, respectively. Received electrical signal is amplified by passing through electrical amplifier. Amplified signal is down converted and recovered by applying to Quadrature demodulator. OFDM demodulator parameters are same to OFDM modulator for recovering QAM symbols to achieve low errors. The received QAM symbols are detected and converted to bit streams by QAM sequence detector. The portion of the optical signal is sent to RSOA for re-demodulation using the 2.5 Gbps OOK upstream signal. Main parameters of RSOA are mentioned in Table 1. RSOA re-modulate and amplifies incoming downstream signal to generate amplified and modulated upstream signal that will be sent to CO. Then modulated upstream signals which are generated by RSOAs are combined again by WDM multiplexer at RN as illustrated in Figure 1. These combined signals are sent back to upstream optical fiber (US fiber) that has the same parameters of downstream optical fiber (DS fiber). At CO, upstream signals are demultiplexed then they are detected by PD. Received upstream signal is transmitted through a low pass filter to convert it to baseband electrical signal. BER of upstream signals is observed and calculated after passing through low pass filter.

3. SIMULATION RESULTS

The network is designed and simulated for various M-QAM against optical fiber length by utilizing Optisystem as illustrated in Figure 1. QAM is considered as the best coding compared to others and it is used to convert bit streams into symbols. Different M-QAM's are used in IM/DD OFDM WDM-PON to study the BER performance and enhance transmission performance and it is used to compare the obtained results for simulated systems. For minimizing the effect of fiber nonlinearity, laser linewidth and power are chosen to be 0.1 MHz and 2 dBm, respectively. Firstly, simulation results of downstream OFDM signal are discussed and explained in this section. Figure 2 illustrates constellation diagram of received electrical OFDM signal for different M-QAM's at optical fiber length of 300 km, 200 km and 50 km, respectively. As long as optical fiber length increases, M-QAM order decreases to find both the lowest BER value and the constellation diagram as illustrated in Figure 2.

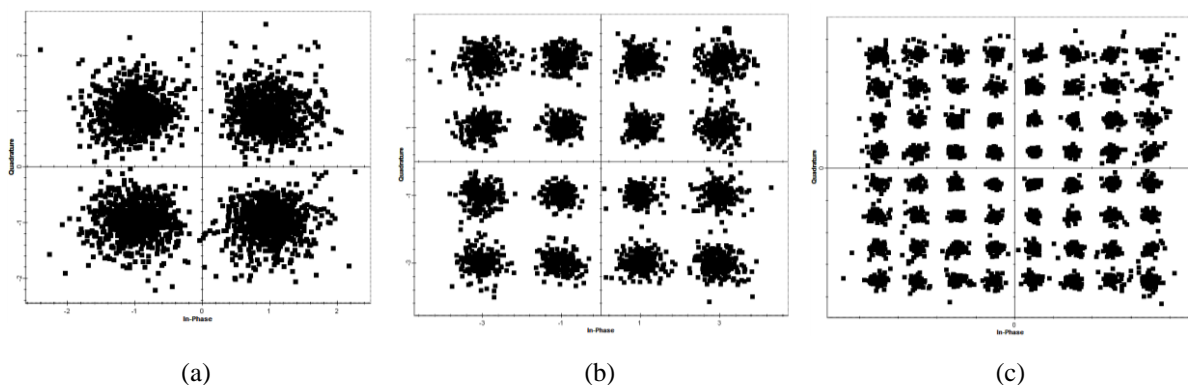


Figure 2. Constellation diagram of received downstream signal at ONU for a) 4-QAM, b) 16-QAM and c) 64-QAM, respectively.

Additionally, eye diagram is utilized to measure both ISI and noise of channel in optical communications. For minimum propagation length, Figure 3 illustrates the eye diagram of different M-QAM of downstream OFDM signal.

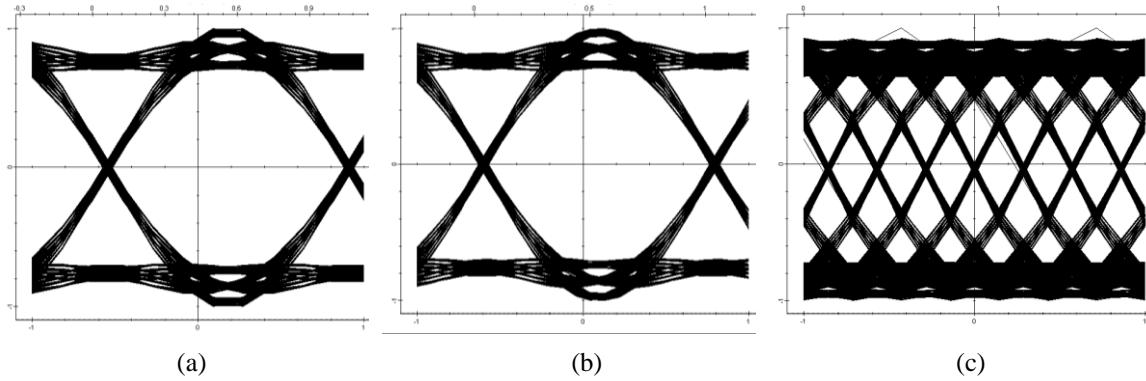


Figure 3. Eye diagram of received downstream OFDM signal for a) 4-QAM, b) 16-QAM and c) 64-QAM, respectively.

Figure 4 shows propagation length against Log of BER for making comparison between simulated systems. Using various M-QAM and at BER of 10^{-3} , maximum optical fiber length of each simulated system can be found as 300, 200 and 50 km as shown in Fig. 4. Fig. 4 illustrates that 4-QAM network has the lowest BER for long reach optical communication.

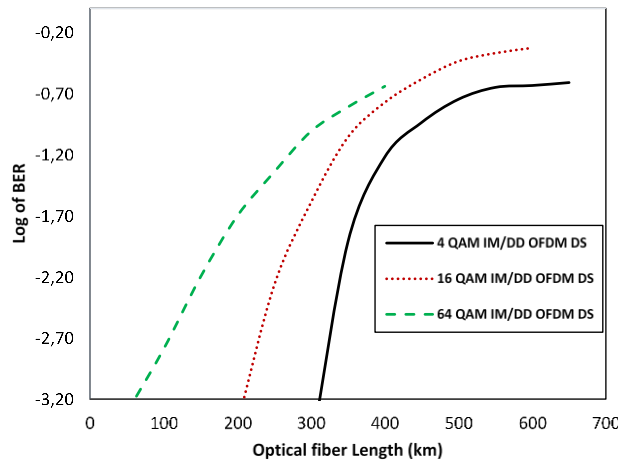


Figure 4. BER curves of various M-QAM OFDM DS.

Q factor curves versus optical fiber length for three different simulated networks are shown in Figure 5. At maximum optical fiber length, Q factor is obtained as 10.42, 10.81 and 11 dB at BER of 10^{-3} . Figure 5 shows that for long-range optical communication networks, the 4-QAM network has the highest Q factor value.

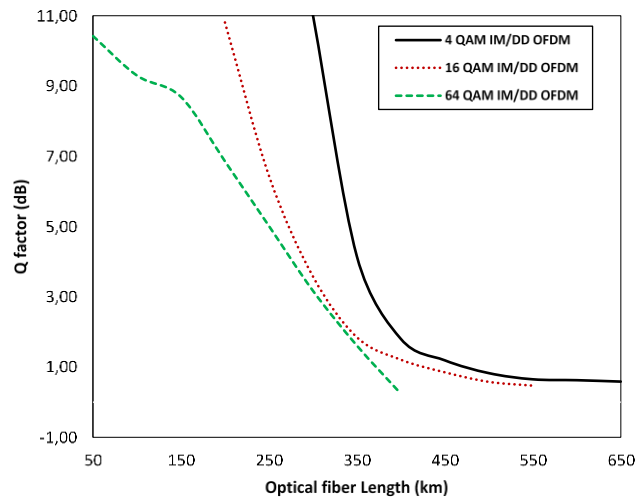


Figure 5. For simulated systems, the Q factor values are plotted against the length of the optical fiber.

BER values in terms of E_b/N_0 are provided in Figure 6 for all simulated networks. E_b/N_0 values for varied M-QAM rise by 18, 23, and 31 dB at BER of 10^{-3} , as seen in Figure 6.

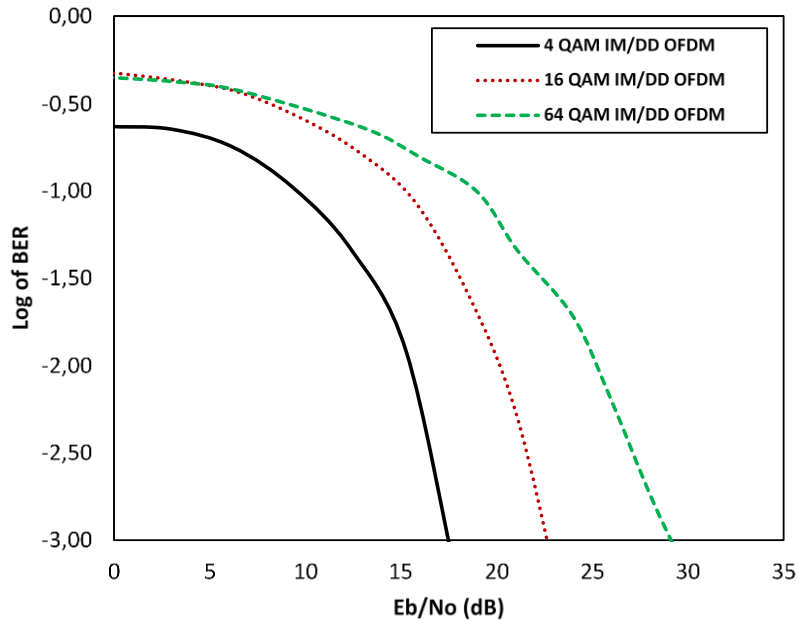


Figure 6. BER versus E_b/N_0 .

The results of simulation are explained in Table 2.

Table 2. Optical fiber length, Q factor, and E_b/N_0 for various M-QAM in 100-Gbps WDM-PON at BER = 10^{-3} .

M-QAM	Optical fiber length (km)	Q factor	E_b/N_0 (dB)
4-QAM	300	11	18
16-QAM	200	10.81	23
64-QAM	50	10.41	31

Secondly, simulation results for upstream RSOA signal are discussed as below. Figure 7 shows optical fiber length in term with log of BER values and eye diagram for every simulated system. Depending on Figure 7, 4-QAM proved to have the lowest BER for long reach optical communication compared to others.

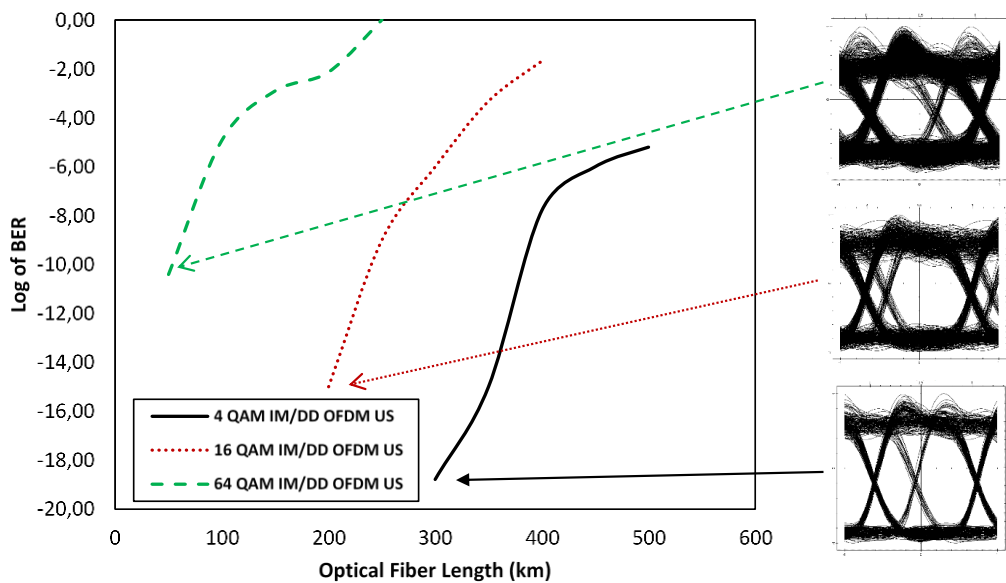


Figure 7. BER results for various M-QAM at different optical fiber length.

In Table 2, the ideal optical fiber length for obtaining BER of 10^{-3} for all of the networks is determined. The best simulation results for long-range transmission were achieved by 100 Gbps 4-QAM-WDM-PON. DCF is used to improve system performance, adjust for fiber channel dispersion, and enhance transmission bit rate. As a result, the simulation results in optical communication are generally reliable and acceptable.

4. CONCLUSION

We have simulated and studied bidirectional low-cost IM/DD OFDM WDM-PON based on RSOA by using different M-QAM's for 100 Gbps downstream signal and 2.5 Gbps upstream signal. IM/DD OFDM WDM-PONs do not need to another laser at ONU as CO-OFDM. A 100 Gbps 4-QAM IM/DD OFDM WDM-PON has been transmitted over 300 km. 16 and 64-QAM WDM-PONs satisfied the best results at optical fiber length of 200 and 50 km, respectively. DCF is considered to be a useful method to increase transmission performance. Eb/No results, Eye diagram and Q factor are obtained in term with optical fiber length for WDM-PON. Those WDM-PONs are simulated to achieve low BER and low cost long-reach 100-Gbps IM/DD-OFDM-WDM-PON.

Author Contributions

Mahmoud Alhalabi contributed to the design, implementation and simulation of the research and to the analysis of the results.

Mahmoud Alhalabi wrote the manuscript with support from Necmi Taşpınar who supervised the project.

Conflict of Interest

The authors of the article declare that there is no conflict of interest between them.

Acknowledgements

This work was supported by the Erciyes University Scientific Research Projects Coordination Unit (Project No: FDK-2019-8750).

REFERENCES

- [1] J. I. Kani, F. Bourgart, A. Cui, A. Rafel, M. Campbell, R. Davey and S. Rodrigues, "Next-generation PON Part I: technology roadmap and general requirements", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no.11, pp. 43–49, 2009.
- [2] L. Kazovsky, W. Shaw, D. Gutierrez, N. Cheng, and S. Wong, "Next-generation optical access networks", *J. Lightwave Technol.*, vol. 25, no. 11, pp. 3428-3442, 2007.
- [3] I. Djordjevic and B. Vasic, "Orthogonal frequency division multiplexing for high-speed optical transmission", *Opt. Exp.*, vol. 14, no. 9, pp. 3767-3775, 2006.
- [4] C. Chow, C. Yeh, C. Wang, F. Shih and S. Chi, "Signal remodulation of OFDM-QAM for long reach carrier distributed passive optical networks", *IEEE Photon. Tech. Lett.*, vol. 21, pp.715–717, 2009.
- [5] J. Dang, L. Wu and Z. Zhang, "OFDM systems for optical communication with intensity modulation and direct detection", *Optical Fiber and Wireless Commun.*, pp. 85-104, 2017.
- [6] T. Nguyen, S. Mhatli, E. Giacomidis, L. Compernelle, M. Wuilpart and P. Mégret, "Fiber nonlinearity equalizer based on support vector classification for coherent optical OFDM", *IEEE Photon. Jour.*, vol. 8, no. 2, 2016.
- [7] S. Selvendran, A. S. Raja, K. E. Muthu and A. Lakshmi, "Certain investigation on visible light communication with OFDM modulated white LED using optisystem simulation," *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 109, pp.1377-1394, 2019.
- [8] H. Oubei, C. Shen, A.Kammoun and E.Zedini, "Light based underwater wireless communications", *Jpn J Appl Phys*, vol. 57, pp. 1-18, 2018.
- [9] J. Dang, L. Wu and Z. Zhang, *Optical Fiber and Wireless Communications*, 2017.
- [10] I. Goyal, A. Ghatak and R. Varshney, "Dispersion Compensating Fibers", 2002.
- [11] T. Dong, Y. Bao, Y. Ji, A. Pak, T. Lau, Z. Li, and Chao Lu, "Bidirectional Hybrid OFDM-WDM-PON System for 40-Gb/s Downlink and 10-Gb/s Uplink Transmission Using RSOA Remodulation", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 24, no. 22, 2012.
- [12] L. Tawade, S. Mhatli and R. Attia, "Bidirectional long reach WDM-PON delivering downstream data 20 Gbps and upstream data 10 Gbps using mode locked laser and RSOA", *Opt. Quant. Electron.*, vol.47, pp.779-789, 2014.
- [13] G. Mandal, R. Mukherjee, B. Das and A. S. Patra, "Next-generation bidirectional Triple-play services using RSOA based WDM Radio on Free-Space Optics PON", *Opt. Commun.*, vol. 411, pp. 138–142, 2018.
- [14] P. Choudhury and T. Khan, "Symmetric 10 Gb/s wavelength reused bidirectional RSOA based WDM-PON with DPSK modulated downstream and OFDM modulated upstream signals", *Opt. Commun.*, vol. 372, pp. 180–184, 2016.
- [15] M. Sperm and D. Babic, "Wavelength reuse WDM-PON using RSOA and modulation averaging", *Opt. Commun.*, vol. 451, pp. 1–5, 2019.

- [16] J. Zhang, X. Yuan, Y. Gu, Y. Huang, M. Zhang and Y. Zhang, "A Novel Bidirectional RSOA Based WDM-PON with Downstream DPSK and Upstream Re-Modulated OOK Data", 11th International Conference on Transparent Optical Networks, pp. 1-5, Ponta Delgada, Portugal, 2009.
- [17] Z. Zhang, X. Chen, L. Wang and M. Zhang, "40-Gb/s QPSK Downstream and 10-Gb/s RSOA based Upstream Transmission in Long-Reach WDM PON Employing Remotely Pumped EDFA and FBG Optical Equalizer", 8th International Conference on Communications and Networking in China (CHINACOM), Guilin, China, pp. 788-791, 2013.
- [18] G. Pandey and A. Goel, "Long reach colorless WDM OFDM-PON using direct detection OFDM transmission for downstream and OOK for upstream", Opt. and Quant. Electron., vol. 46, no.12, pp. 1509-1518, 2014.
- [19] S. Mhatli, M. Ghanbarisabagh, L. Tawade, B. Nsiri, M.A. Jarajreh, M. Channoufi and R. Attia, "Long-reach OFDM WDM-PON delivering 100 Gb/s of data downstream and 2 Gb/s of data upstream using a continuous-wave laser and a reflective semiconductor optical amplifier", Opt. Lett., vol. 39, no. 23, pp. 6711-6714, 2014.
- [20] N. Taşpınar and M. Alhalabi, "Performance investigation of long-haul high data rate optical OFDM IM/DD system with different QAM modulations," J. Electr. Eng., vol. 72, no. 3, pp. 192-197, 2021
- [21] <https://optiwave.com/>



Kuru Üzüm Tanelerinin Sınıflandırılması için Hibrit Bir Yaklaşım

A Hybrid Approach for Raisin Grains Classification

¹Serhat KILIÇARSLAN 

¹Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bandırma/Balıkesir, Türkiye

¹skilicarslan@bandirma.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

ARTICLE INFO

Article history

Received : 8 March 2022

Accepted : 4 April 2022

Keywords:

Raisin Grains, Deep Learning, Classical Data Mining, Hybrid, Classification

ABSTRACT

Raisin grains are a very good source of energy and nutrients due to the minerals and vitamins they contain. Since raisins constitute 23% of the world in Turkey, it is important to determine the variety and quality. Traditionally, deciding on the type and quality of raisin grains is a long and costly process. In addition, experience and knowledge are important in determining the type of raisin grains. In addition, since each of the experts has different experience, knowledge and expertise, there is a difference in terms of classification of raisins. Therefore, it is important to develop a decision support system with data mining methods for the correct classification of raisin grains. In this study, we propose one hybrid model using rotation forest (RO) and deep learning algorithms of Stacked Autoencoder (SAE) for the prediction of the type of raisin grains. As a result of the experimental evaluation, the hybrid SAE-ROF method has achieved a high success rate of 91.50% in terms of performance from the classical data mining methods and deep learning methods used in the study.

© 2022 Bandırma Onyedi Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Science. Published by Dergi Park. All rights reserved.

MAKALE BİLGİSİ

Makale Tarihleri

Gönderim : 8 Mart 2022

Kabul : 4 Nisan 2022

Anahtar Kelimeler:

Kuru Üzüm Taneleri, Derin Öğrenme, Klasik Veri Madenciliği, Hibrit, Sınıflandırma

ÖZET

Kuru üzüm içeriğinde barındırdığı mineraller ve vitaminlerden kaynaklı çok iyi bir enerji ve besin kaynağı olarak karşımıza çıkmaktadır. Dünya genelindeki kuru üzümün %23'ü Türkiye'deki topraklardan elde edilmektedir. Geleneksel olarak, kuru üzümün cinsine ve kalitesine karar vermek uzun ve maliyetli bir süreçtir. Ayrıca, kuru üzümün cinsinin belirlenmesinde tecrübe ve bilgi birikimler önem arz etmektedir. Bu nedenle, kuru üzümün doğru sınıflandırılabilmesi açısından veri madenciliği yöntemleri ile karar destek sisteminin geliştirilmesi önemlidir. Bu çalışmada, kuru üzüm tanelerinin türünün tahmini için rotasyon orman (RO) ve yığılanmış otokodlayıcı (YOK) derin öğrenme algoritmalarını kullanan bir hibrit model öneriyoruz. Deneysel değerlendirme sonucunda, hibrit YOK-RO yöntemi çalışmada kullanılan klasik veri madenciliği yöntemleri ile derin öğrenme yöntemlerinden performans açısından %91.50 ile yüksek başarı elde edilmiştir.

© 2022 Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi. Dergi Park tarafından yayınlanmaktadır. Tüm Hakları Saklıdır.

1. GİRİŞ

Kuru üzüm, besin değerleri açısından kalsiyum, potasyum, demir, A ve C gibi çok önemli mineralleri ve vitaminleri bünyesinde barındırmaktadır. Kuru üzüm bünyesinde bol miktarda karbonhidrat bulunduğundan dolayı iyi bir enerji kaynağı olarak karşımıza çıkmaktadır [1]. Uluslararası sert kabuk ve kuru meyveler konseyi (INC) 2019-2020 yılları arasındaki verilere göre dünyada 1.34 milyon ton kuru üzüm üretilirken, Türkiye’de bu rakam 305 bin ton kuru üzüm üretimini temsil etmektedir.

Geleneksel olarak, kuru üzümün cinsine ve kalitesine karar vermek hem uzun hem de maliyetli bir süreçtir. Ayrıca, kuru üzümün cinsinin belirlenmesinde tecrübe ve bilgi birikimler önem arz etmektedir. Ek olarak, uzmanların her birinin farklı tecrübe, bilgi birikim ve uzmanlık dallarına sahip olmalarından dolayı kuru üzümlerin sınıflandırılması açısından farklılık meydana gelmektedir. Bu nedenle, kuru üzümün doğru sınıflandırılabilmesi için veri madenciliği yöntemleri ile karar destek sisteminin geliştirilmesi önem arz etmektedir. Çalışmada, kuru üzüm tanelerinin cinsini belirlemek üzere yığınlanmış oto kodlayıcı (YOK) algoritması ve klasik veri madenciliği algoritmasından rotasyon orman (RO) ile birleştirilerek hibrit YOK-RO algoritması önerilmiştir.

Literatürde, kuru üzümün sınıflandırılması üzerine sınırlı sayıda çalışma olup sırasıyla, yapay sinir ağları [2], destek vektör makinesi (DVM) [3], karar ağaçları (KA) [4] gibi klasik veri madenciliği algoritmaları kullanılmıştır. Okamura ve arkadaşlarının (1993) yaptıkları çalışmada, kuru üzüm tanelerinin sınıflandırmasını bayes algoritmasını kullanarak gerçekleştirdiklerini bildirmişlerdir. Wang ve arkadaşlarının (2012) yaptıkları çalışmada, kuru üzüm tanelerini doğru şekilde sınıflandırabilmek üzere beş farklı algoritma kullanılmıştır. En iyi sınıflandırma başarısı DVM ile elde ettiklerini bildirmişlerdir [5]. Yu ve arkadaşlarının (2012) yaptıkları çalışmada, üzüm kalitelerinin sınıflandırabilmek için en küçük kareler destek vektör makinesi (EKK-DVM) sınıflandırma algoritması kullanmışlardır. Önerdikleri yöntem EKK-DVM ile kuru üzümün kalitesinin yüksek performans ile sınıflandırıldığını bildirmişlerdir [6]. Karime ve arkadaşlarının (2017) yaptıkları çalışmada, kuru üzümlerin kalitesini belirlemek ve sınıflandırmak üzerine temel bileşen analizi (TBA) kullanılarak optimum özellikler elde edilmiştir. Elde edilen yeni özniteliklere YSA ve DVM algoritmalarını kullanarak sınıflandırma başarısını incelemişlerdir. En iyi sınıflandırma başarısının DVM ile elde ettiklerini bildirmişlerdir [2]. Çınar ve arkadaşlarının (2020) yaptıkları çalışmada, kuru üzümlerin kalitesini belirlemek ve sınıflandırmak üzerine lojistik regresyon (LR), YSA ve DVM algoritmaları kullanarak sınıflandırma işlemi gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri sınıflandırma sonuçlarında, DVM ile en iyi başarı oranı elde ettiklerini bildirmişleridir [3]. Tarakçı ve Özkan (2021) yaptıkları çalışmada, UCI’den elde ettiği kuru üzüm veri kümeleri üzerinde KNN ve ağırlıklandırılmış KNN ile deneysel değerlendirme gerçekleştirmiştir. Elde ettikleri değerlendirme sonuçlarında KNN algoritmasının en iyi başarı oranı elde ettiklerini bildirmişlerdir [30]. Köklu ve arkadaşlarının (2021) yaptıkları çalışmalarda, yedi farklı türdeki kuru meyvelerin tiplerinin sınıflandırılması için makine öğrenme yöntemlerinden lojistik regresyon ve yapay sinir ağı kullanılarak sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında en iyi başarılı sınıflandırmanın YSA ile olduğunu bildirmişlerdir [31]. Köklu ve arkadaşlarının (2021) yaptıkları çalışmada, kabak çekirdeklerini sınıflandırılması için makine öğrenmesi yöntemlerinden LR, DVM, ROF ve KNN algoritmalarını kullanmışlardır. Deneysel değerlendirmelerin sonucunda en iyi başarının DVM yöntemi ile olduğunu bildirmişlerdir [32].

Bu çalışmada, Türkiye’de elde edilmiş Besni ve Keçimen cinsi kuru üzümleri sınıflandırılması için hibrit yığınlanmış oto kodlayıcı (YOK) ve rotasyon orman (RO) algoritmasının (YOK-RO) önerilmektedir. Ayrıca kuru üzüm veri kümesi üzerine, önerilen YOK-RO’nın yanında sırasıyla YSA, DVM, LR, rastgele orman (RAO), rastgele ağaç (RA), RO ve derin sinir ağları (DSA) algoritmalarıyla analizler gerçekleştirilerek performansları karşılaştırılmıştır. Analizler sonucunda, hibrit YOK-RO yöntemi diğer veri madenciliği yöntemleri ve derin öğrenme yöntemine göre performans sonuçları açısından daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. YOK modelinde, veri kümesindeki gizli özelliklerin derinlemesine araştırılabilir. YOK, veri kümesi üzerinden özellik çıkartma konusunda iyi olmasına rağmen, sınıflandırma performansı istenilen düzeyde değildir. Bundan dolayı da YOK ile veri kümesinden derinlemesine gizli özellikler elde edildikten sonra, sınıflandırma algoritması için RO tercih edilmiştir. Böylece, kullanılan veri kümesi üzerinde derin öğrenme yöntemi YOK ile derinlemesine incelenerek yüksek başarılı sınıflandırma gerçekleştirmesi sağlanmaktadır.

Makalenin geri kalanında, ikinci bölümde çalışmada kullanılan kuru üzüm veri kümesi ve yöntemler verilmiştir. Üçüncü bölümde, deneysel değerlendirme sonuçları ve tartışma verilmiştir. Son bölümde, sonuçlar ve gelecekte yapılacak çalışma sunulmuştur.

2. MATERYAL VE METOD

2.1. Kuru Üzüm Veri Kümesi

Çalışmada, kuru üzüm veri kümesini sınıflandırılması için klasik veri madenciliği yöntemleri ve derin öğrenme yöntemleri uygulanmıştır. Deneylerde kullanılan veri kümesi Çınar ve arkadaşları (2020) tarafından 2020 yılında toplanmış olup 450 adet Besni ve 450 adette Keçimen cinsi üzümünden toplam 900 örnek ve 7 öznitelik bilgisine sahip kuru üzüm verisinden oluşmaktadır [3]. Tablo 1’de kuru üzümünden elde edilen veri kümesine ait özniteliklerin açıklamaları ve tanımlayıcı istatistiksel sonuçları gösterilmektedir.

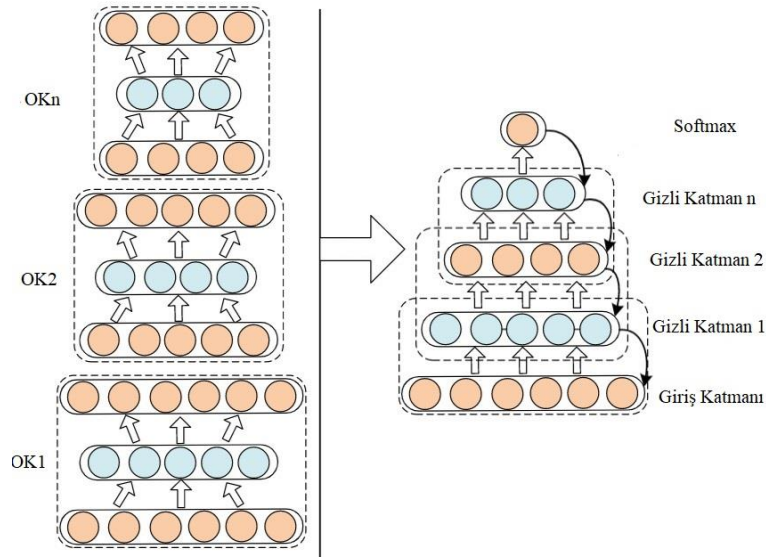
Tablo 1. Kuru üzüm veri kümesine ait özelliklerin tanımlayıcı istatistiksel sonuçları.

Öznitelikler	Açıklama	Mean	Std	Min	Max
Alan	Kuru üzümün sınırları içindeki piksel sayısı	79.659	35.314	25.387	235.047
Ana Eksen Uzunluğu	Üzüm üzerine çizilebilecek en uzun çizgi olan ana eksenin uzunluğu verir	405	106	226	997
Küçük Eksen Uzunluğu	Üzüm üzerine çizilebilecek en kısa çizgi olan ana eksenin uzunluğu verir	246	47	144	492
Eksantriklik	Kuru üzüm ile aynı momentlere sahip olan elipsin eksantrikliğinin bir ölçüsünü verir	0.77	0.086	0.34	0.96
Dış Bükey Alan	Kuru üzümün oluşturduğu bölgenin en küçük dışbükey kabuğunun piksel sayısını verir	82.621	36.877	26.139	278.217
Genişlik	Kuru üzümün oluşturduğu bölgenin sınırlayıcı kutudaki toplam piksel sayısına oranını verir	0.7	0.048	0.37	0.83
Çevre	Kuru üzümün oluşturduğu bölgenin sınırlayıcı kutudaki toplam piksel sayısı oranı	1104	251	619	2698
Sınıf	Besni ve Keçimen kuru üzüm sınıfı	0.33	0.47	0	1

Bu çalışmada, önerilen hibrit YOK-RO algoritması ile sırasıyla YSA, DVM, LR, RAO, RA, RO ve DSA algoritmalarıyla analizler gerçekleştirilerek performansları karşılaştırılmıştır.

2.2. Yığınlanmış Oto Kodlayıcı (YOK)

Otokodlayıcı (OK), yapay sinir ağlarının (YSA) bir çeşidi olup, giriş, gizli ve çıkış katmanlarından meydana gelmektedir. Eğitim sürecinde YSA gibi geri yayılım algoritmasını kullanan OK modeli, denetimsiz bir öğrenme gerçekleştirerek giriş verisini çıkış verisi olarak tanımlamamıza olanak tanıyan derin öğrenme yöntemidir. OK'lar çok karmaşık veri kümeleri üzerinde uygulanarak yüksek başarı performansı elde edilmesine imkan tanımaktadır. OK mimarisi, kodlayıcı ve kod çözücü olmak üzere iki birimden meydana gelmektedir. Ardı ardına OK'lar birbirine bağlanmasıyla, yani birinci OK'un gizli katmanı ikinci OK'un giriş katmanına bağlanarak yığınlanmış oto kodlayıcı (YOK) mimarisi Şekil 1'deki gibi ortaya çıkmaktadır [7-9]. Yığınlanmış oto kodlayıcıları denetimsiz yapıdan denetimli öğrenme yapısına geçişi için çıkış katmanına softmax fonksiyonu bağlanarak denetimli yapıya geçilerek sınıflandırma işlemini gerçekleştirebilmektedir [7]. Kullanılan YOK mimarisinin hiper-parametreleri Tablo 2'de gösterilmiştir. Kodlayıcı katmanından sıkıştırılmış olan veri kümesi kod çözücü katmanına ulaşırken Eşitlik 1'deki gibi hesaplanır. Kod çözücü katmanında, elde edilen gürültüden arındırılmış yeni giriş verileri elde edilebilmesi için Eşitlik 2'deki gibi hesaplama yapılarak gerçekleştirilir. Eşitlik 1 ve 2'de f aktivasyon fonksiyonunu, $\mathbf{x}_a - \mathbf{y}_b$ 'nin $\mathbf{a} - \mathbf{b}$ 'inci nöron değeri, gizli katmandaki \mathbf{y}_b 'nin \mathbf{b} 'inci nöronuna aktarılan değeri, \mathbf{n} nöron sayısı, girdi katmanındaki $\mathbf{w}_{ab} - \mathbf{w}_{ba}$ 'nın \mathbf{a} nöronundan \mathbf{b} nöronuna giden ağırlığı temsil etmektedir.



Şekil 1. Yığınlanmış oto-kodlayıcı mimarisi.

$$y_b = f(\sum_{a=1}^n x_a \times w_{ab}) + bias \quad (1)$$

$$x'_a = f(\sum_{b=1}^m y_b \times w_{ba}) + bias \quad (2)$$

Tablo 2. YOK hiper-parametreleri (SAE Hyper-Parameters).

Hiper-Parametreler	SAE Mimari
OK1 Gizli Nöron	8
OK2 Gizli Nöron	5
Kayıp fonksiyonu	Crossentropy
Optimizer	Adam
Aktivasyon fonksiyonu	ReLU
Öğrenme oranı	0.001
L2 Reg.	0.001
Eğitim-tekrar sayısı	100
Seyreklik oranı	0.15
Seyrek Reg.	10, 20

Tablo 2’de iki adet oto kodlayıcının art arda bağlanması sonucunda oluşan YOK mimarisinin hiper-parametreleri görülmektedir. Kurulan modelde birinci oto kodlayıcı 8 gizli nöron, ikinci oto kodlayıcı 5 gizli nörondan oluşturularak deneysel değerlendirme gerçekleştirilmiştir. Her bir oto kodlayıcı 100 tekrar ile çalıştırılmıştır. YOK’ün çalışmasında çapraz entropi maliyet fonksiyonu kullanılmıştır [8-13]. Seyreklik oranı (Sparsity Proportion) değeri 0.15 alınmıştır. Sparsity Proportion değeri, seyrek reg.’in bir parametresi olup çıktının seyrekliğini ayarlamak için kullanılmaktadır [14-17]. L2Reg., seyrek reg. değerleri eğitim aşamasında modelin ezberlemesini azaltmak ve daha iyi başarı sonucu vermek için kullanılmaktadır [18-21].

2.3. Rotasyon Orman Algoritması (RO)

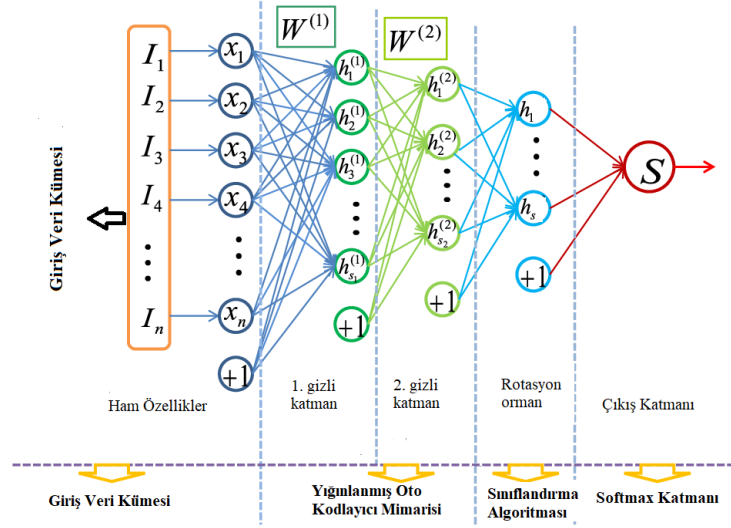
Rotasyon orman (RO) algoritması güçlü kolektif tabanlı yeni nesil algoritmadır. RO ile daha az ağaç yapısı kullanılarak daha yüksek başarı oranları elde etmek üzerine çalışmaktadır. Ayrıca, mimari olarak rastgele orman (RAO) algoritmasına benzemektedir. Algoritmada, mevcut veri kümesi içerisinde rastgele olarak veriler alınır ve alt gruplara ayrılır. Ayrılan alt grupların her birine ayrı ayrı temel bileşen analizi (TBA) uygulanarak yeni kovaryans değeri hesaplanmasıyla özellik çıkarımı gerçekleştirilir. Oluşturulan kovaryans değerlerine göre yeni rotasyon orman matrisi oluşturulur. Elde edilen yeni matrise, RO algoritması ile sınıflandırma işlemine tabi tutulmaktadır [22]. Böylelikle ortalama kombinasyon yöntemi ile her sınıfa ait veriler güven oyu alır ve sınıfı bilinmeyenlerden en yüksek güven değeri ile ilgili sınıfa ataması gerçekleştirmektedir [23-26]. TBA kullanılarak çalıştırılan RO yöntemi, özellikle seçilen tüm öznelilikler gerçek değerlere sahip olduğundan dolayı geleneksel yöntemlere göre daha güçlü bir yapı kılmaktadır. Algoritma aşağıdaki adımlarla gerçekleştirilmektedir.

1. Adım: Mevcut veri kümesinden rastgele F bağımsız değişken belirlenen K sayıda alt kümeye ayrılmaktadır. Böylece F_{ij} alt kümesi oluşmaktadır.
2. Adım: Oluşturulan F_{ij} alt kümesi *bootstrap* yaklaşımı ile eğitim ve test olarak sırasıyla %75-%25 olarak ayrılır. Elde edilen veri setlerine TBA uygulanarak kovaryans matris C_{ij} hesaplanmaktadır.
3. Adım: Elde edilen C_{ij} değerleri kullanılarak rotasyon matrisi R_i oluşturulur. Bu adımlar tüm sınıflandırıcılar için tekrar edilir. Sınıflandırma işlemi Eşitlik 3’de verilmiştir. Eşitlikteki L topluluktaki sınıflandırıcının sayısını temsil etmektedir. Çalışmada $K = 3$ ve $L = 10$ olarak kabul edilmiştir.

$$\mu_j(x) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L d_{i,j}(xR_i) \quad j = 1, \dots, c \quad (3)$$

2.4. Önerilen Hibrit Yığınlanmış Oto Kodlayıcılı Rotasyon Orman (YOKRO) Algoritması

Klasik veri madenciliğinde, veri kümesi üzerinde sınıflandırma işlemi gerçekleştiren modeller, yaygın olarak manuel özellik çıkarımı gerçekleştirerek sınıflandırma yapmaktadır. Elde edilen özelliklerin sınıflandırma üzerine pozitif etkisinin olmasıyla modelin dah iyi eğitilmesine yardımcı olacak Ancak, derin öğrenme algoritmaları sayesinde, özelliklerin manuel bir şekilde oluşturulması yerine, yinelemeli öğrenme özelliği ile veri kümesindeki gizli özelliklerin derinlemesine araştırılabilir. YOK, veri kümesi üzerinden özellik çıkartma konusunda iyi olmasına rağmen, sınıflandırma performansı istenilen düzeyde değildir. Bundan dolayı, YOK ile RO algoritmalarını Şekil 2’deki gibi hibrit bağlanmasıyla daha iyi sınıflandırma performansı elde edilebilmektedir. Bu işlemleri, birincisi denetimsiz öğrenme olan YOK ile özellik çıkartımı sağlanır ve ikinci adımda denetimli bir algoritma RO ile ince ayar sürecine girilerek sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmektedir [7].

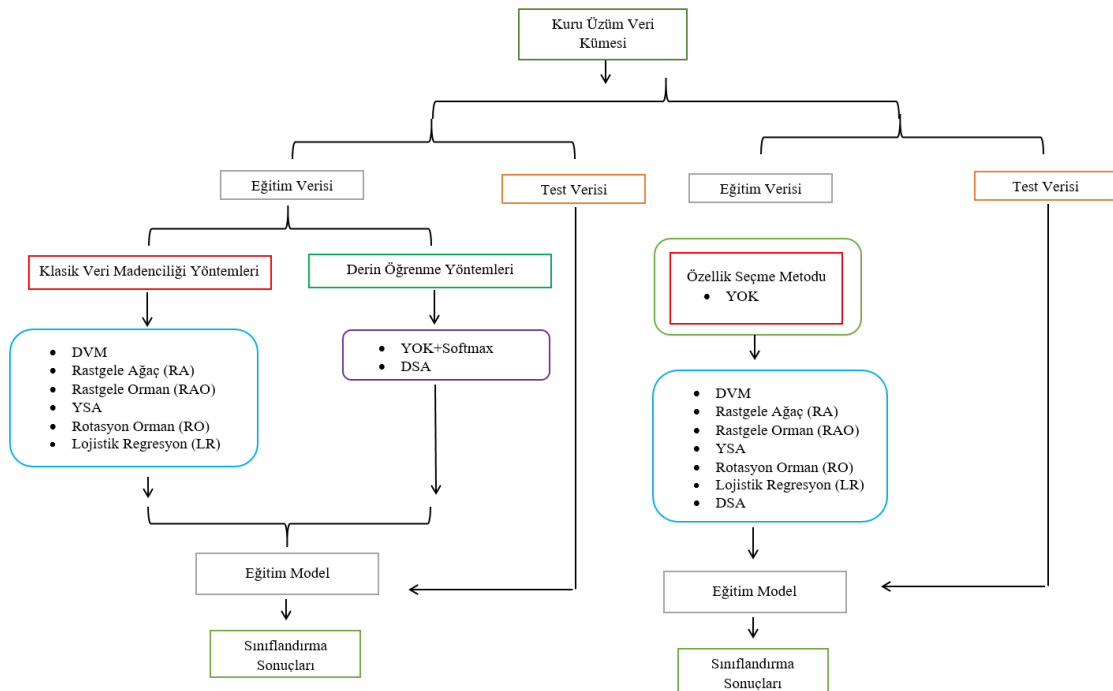


Şekil 2. Önerilen hibrit YOK-RO algoritması.

Bu çalışmada, kuru üzümde ait verilerinin sınıflandırılması için derin öğrenme algoritmalarında en iyi başarı oranına sahip YOK-RO modeli kullanılmıştır. Öncelikle, veri kümesinde anlamlı öznelikleri bulabilmek için YOK uygulanmıştır. Sınıflandırma sonuçlarının geliştirilmesi için bir sonraki aşamada da kolektif tabanlı RO algoritması kullanılmıştır. Önerilen modelin blok diyagramı Şekil 3'teki gibidir. Çalışmada kullanılan DSA mimarisi, Tablo 3'te görülmektedir. Diğer klasik veri madenciliği yöntemlerinin hiper-parametre değerleri default olarak seçilerek deneysel değerlendirmeler yapılmıştır. Deneysel değerlendirmeler python-keras kütüphanesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3. DSA mimarisi hiper-parametreleri.

DSA Mimari				
Gizli Katman Sayısı	50 Nöron	100 Nöron	200 Nöron	300 Nöron
Öğrenme Oranı	0.001			
Aktivasyon Fonk.	ReLU			
Kayıp Fonksiyon	categorical_crossentropy			
Optimizör	SGD			
Çıkış Activastion Function	Softmax			



Şekil 3. Önerilen modelin blok diyagramı.

2.5. Değerlendirme Kriterleri

Çalışmada kullanılan veri kümesindeki veriler kuru üzüm cinsine göre Besni ve Keçimen şeklinde iki farklı sınıf ile ifade edilmektedir. Çalışmada k-fold=10 çapraz doğrulama yöntemi kullanılarak veri kümesi deneysel değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir. 10 katlı çapraz doğrulama yönteminde veri seti 10 parçaya bölünür. Model eğitimi için 9 kısım kullanılırken, kalan 1 kısım model testi için kullanılmaktadır. Çalışmada çeşitli algoritmaların performansları karşılaştırılmıştır ve bu algoritmaların test doğrulukları verilmiştir. Çalışmada sınıflandırma algoritmalarının performansları test doğruluk, kesinlik, duyarlılık, f-skor kriterlerine göre karşılaştırılmıştır (sırasıyla Eşitlik 3, 4, 5, ve 6) [22]. Formüllerdeki TP gerçek pozitif, FP gerçek negatif, TN yanlış pozitif ve FN ise yanlış negatif ifade etmektedir [22].

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

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

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

$$F - \text{skor} = \frac{2 * \text{Kesinlik} * \text{Duyarlılık}}{\text{Kesinlik} + \text{Duyarlılık}} \quad (6)$$

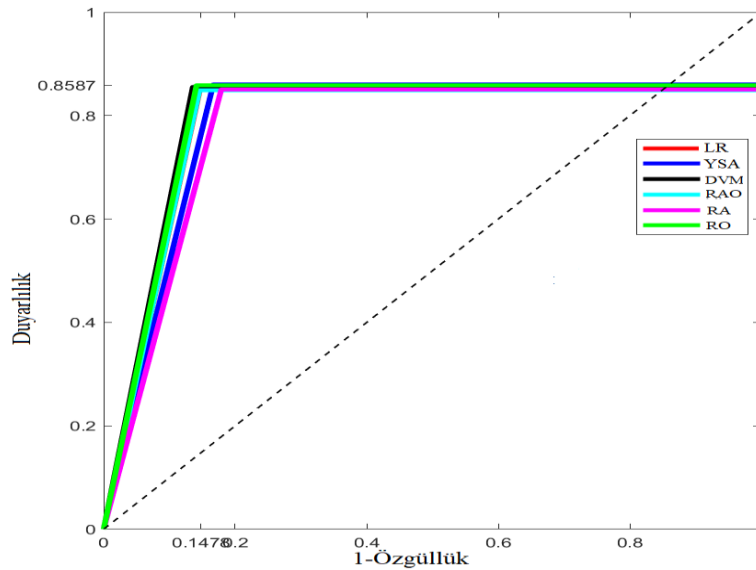
3. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Çalışmada derin öğrenme ve klasik veri madenciliği yöntemlerinden oluşan hibrit modeller ile deneysel analizler gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde, kuru üzüm veri kümesi üzerinden sınıflandırma işlemini gerçekleştirebilmek için hibrit yöntem YOK-RO kullanılarak elde edilen deneysel sonuçlar sunulmuştur. Çalışmada, YOK-softmax, DSA, RAO, YSA, LR ve RO algoritmalarının deneysel değerlendirmelerde Tablo 4 ve 5’de sunulmuştur. Ek olarak, YOK ile hibrit yapılmış RAO, YSA, LR, RO ve DSA algoritmalarının deneysel sonuçları Tablo 6’da sunulmuştur. Çalışmada kullanılan yöntemlere ait test modelleri ve parametreleri Tablo 4, 5 ve 6’da görülmektedir.

Çalışmada, başlangıçta klasik veri madenciliği yöntemleri kullanılarak kuru üzüm veri kümesinin sınıflandırılmasına bakılmıştır. Sınıflandırmaya ait sonuçlar Tablo 4’de gözlemlenmektedir. Şekil 3, 4 ve 5’de görüldüğü gibi deneysel değerlendirme amacıyla kullanılan yöntemlerine göre ortalama duyarlılık ve özgülük değerleriyle ROC eğrisi çizilmiştir.

Tablo 4. Kuru üzüm veri kümesine klasik veri madenciliği yöntemi ile değerlendirme.

Model	Doğruluk(%)	Kesinlik(%)	Duyarlılık(%)	F-Skor(%)	MSE
Lojistik Regresyon (LR)	85.22	84.10	86.90	85.50	0.2113
Yapay Sinir Ağı (YSA)	86.33	84.60	88.90	86.70	0.1954
Destek Vektör Makinesi (DVM)	86.44	84.20	89.80	86.90	0.1356
Rastgele Orman (RAO)	85.44	83.30	88.70	85.90	0.1954
Rastgele Ağaç (RA)	82.11	82.30	81.80	82.10	0.1789
Rotasyon Orman (RO)	85.88	84.30	88.20	86.20	0.2186

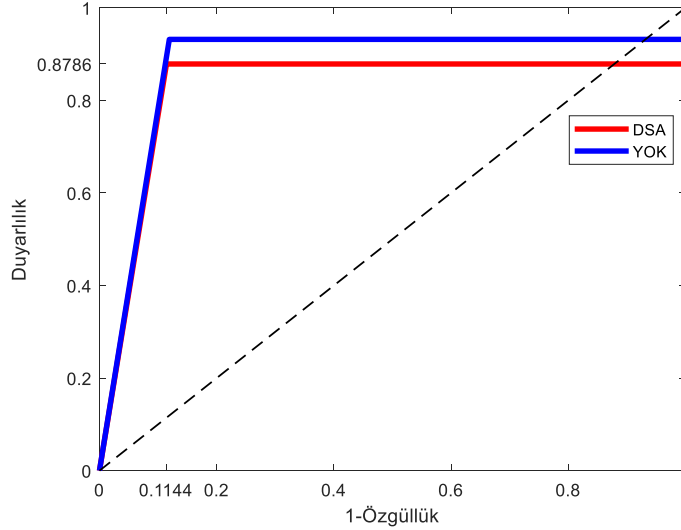


Şekil 3. Klasik veri madenciliği yöntemleriyle ilgili deneysel çalışmaların Roc eğrisi.

Tablo 4’de kuru üzüm veri kümesi üzerinde en iyi başarı oranı DVM algoritması ile doğruluk %86.44, kesinlik %84.60, duyarlılık %88.90, f-skor %86.70 ve MSE 0.1356 oranları elde edildiği görülmüştür. Şekil 3’de, ROC eğrisinde DVM’nin diğer algoritmalara göre daha başarılı bir sınıflandırma gerçekleştirdiği görülmüştür. Derin öğrenme yöntemlerinden DSA ve YOK-Softmax kullanılarak kuru üzüm veri kümesinin sınıflandırılmasına da bakılmıştır. Sınıflandırmaya ait sonuçlar Tablo 5’de sunulmuştur.

Tablo 5. Kuru üzüm veri kümesine derin öğrenme yöntemi ile değerlendirme.

Model	Doğruluk(%)	Kesinlik(%)	Duyarlılık(%)	F-Skor(%)	MSE
DSA	88.56	86.80	90.80	88.70	0.1854
Yığılmış Otokodlayıcı (YOK)	88.10	84.40	92.00	84.60	0.1269



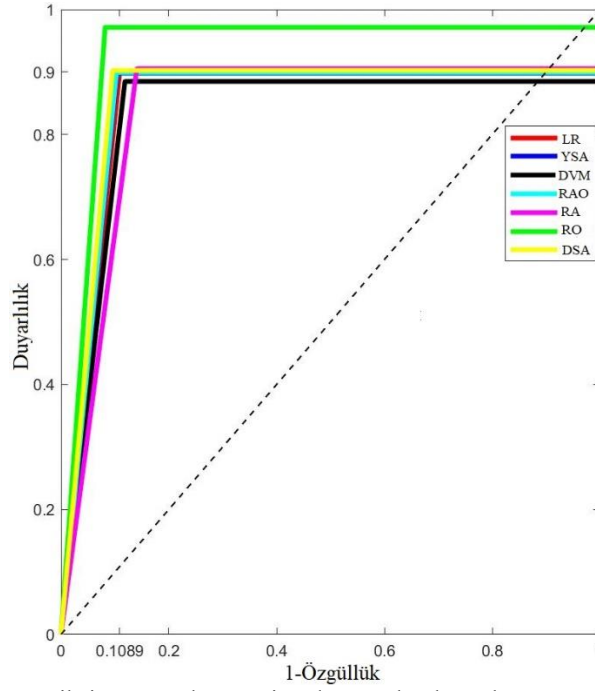
Şekil 4. Derin öğrenme yöntemleri üzerine deneysel çalışmaların Roc eğrisi.

Tablo 5’te kuru üzüm veri kümesi üzerinde k-fold=10 ile en iyi başarı oranı DSA algoritması ile doğruluk %88.56, kesinlik %86.80, duyarlılık %90.80, f-skor 0.8870 oranları elde edildiği görülmüştür. Şekil 4’te, ROC eğrisinde DSA’nın YOK’e göre daha başarılı bir sınıflandırma gerçekleştirdiği görülmüştür

Çalışmada, derin öğrenme yöntemlerinden YOK ile hibrit yapılmış RAO, YSA, LR, RO ve DSA algoritmalarının deneysel sonuçları sunulmuştur. Kuru üzüm veri kümesi üzerine uygulanan her bir algoritmanın sonuçları Tablo 6’da görülmektedir.

Tablo 6. Kuru üzüm veri kümesinin YOK ile hibrit yöntemlerin sonuçları.

Model	Doğruluk(%)	Kesinlik(%)	Duyarlılık(%)	F-Skor(%)	MSE
Lojistik Regresyon (LR)	89.11	87.60	88.40	82.80	0.1745
Yapay Sinir Ağı (YSA)	89.62	89.40	95.80	92.50	0.1482
Destek Vektör Makinesi (DVM)	88.14	88.00	95.20	91.50	0.1185
Rastgele Orman (RAO)	89.70	89.50	95.80	92.50	0.1481
Rastgele Ağaç (RA)	85.92	89.50	89.30	89.40	0.1407
Rotasyon Orman (RO)	91.50	91.80	93.70	91.23	0.1068
DSA	90.41	89.90	96.40	93.10	0.1197



Şekil 5. Hibrit yöntemler üzerine deneysel çalışmaların Roc eğrisi.

Çalışmada, Tablo 6'da YOK ile hibrit yapılmış RAO, YSA, LR, RO ve DSA algoritmalarının deneysel sonuçları görülmektedir. Eğitim sonucunda en iyi başarı oranı hibrit YOK-RO modelinden alınmıştır. YOK modelinde, veri kümesindeki gizli özelliklerin derinlemesine araştırılabilmektedir. YOK, veri kümesi üzerinden özellik çıkartma konusunda iyi olmasına rağmen, sınıflandırma performansı istenilen düzeyde değildir. Bundan dolayı da YOK ile veri kümesinden derinlemesine gizli özellikler elde edildikten sonra, sınıflandırma algoritması için RO tercih edilmiştir. Böylece, kullanılan veri kümesi üzerinde derin öğrenme yöntemi YOK ile derinlemesine incelenerek yüksek başarılı sınıflandırma gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Hibrit YOK-RO algoritması ile doğruluk %91.50, kesinlik %91.80, duyarlılık %90.70, f-skor %91.23 ve MSE 0.1068 oranları elde edildiği görülmüştür. Şekil 5'de, ROC eğrisinde YOK-RO yönteminin diğer yöntemlere göre daha başarılı bir sınıflandırma gerçekleştirdiği görülmüştür.

Yapılan tüm deneylerde en iyi başarı oranı YOK-RO ile elde edildiği görülmektedir. Önerilen hibrit modeller arasında ikinci en iyi başarı oranı YOK-DSA algoritmasından doğruluk %90.41, kesinlik %89.90, duyarlılık %96.40, f-skor %93.10 ve MSE 0.1197 oranları elde edildiği görülmüştür. YOK ile hibrit yapılan algoritmaların, normal hallerine göre daha iyi başarı oranları elde edildiği gözlemlenmektedir. Bunun en önemli sebebi, YOK algoritmasında, veri kümesindeki gizli özelliklerin derinlemesine araştırılması özelliği yatmaktadır. Böylece, YOK ile veri kümesindeki gizli özellikler gün yüzüne çıkartılarak sınıflandırma aşamasında da sınıflandırma algoritmalarının kullanılmasıyla başarının artırılacağı görülmüştür. Deneysel değerlendirmeler sonucunda, YOK-RO yüksek performanslı doğruluk oranı vermiş olması şartıdır değildir. Önerilen YOK-RO yöntemi diğer yöntemlere göre gizli kalmış özellikleri gün yüzüne çıkartarak sınıflama problemlerinde iyi performans verdiği görülmektedir [23, 27-29].

4. SONUÇ

Geleneksel olarak, kuru üzümün cinsine ve kalitesine karar vermek uzun ve maliyetli bir süreçtir. Bu nedenle, kuru üzümün doğru sınıflandırılabilmesi açısından veri madenciliği yöntemleri ile karar destek sisteminin geliştirilmesi önem arz etmektedir. Çalışmada, kuru üzüm tanelerinin cinsini belirlemek üzere yığınlanmış oto kodlayıcı (YOK) algoritması rotasyon orman algoritması hibrit bir yöntem olarak önerilmiştir. Deneysel değerlendirmeler sonucunda, hibrit YOK-RO yöntemi tüm klasik veri madenciliği yöntemlerine kıyasla %91.50 başarı sonucuyla daha yüksek performans gösterdiği gözlemlenmektedir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde YOK-RO, doğrusal olarak ayrılmayan sınıflama problemlerinde iyi performans verdiği görülmektedir. Ek olarak, benzer yöntemler arasında da global optimum değere en çok yakınsayan yöntem olduğu görülmüştür. Gelecekteki çalışmada, kuru meyve görüntüleri üzerinden, derin öğrenme yöntemleri kullanılarak hızlı karar verebilecek karar destek sistemi geliştirilmesi amaçlanmaktadır.

Yazar Katkıları

Yazar çalışmaya eşit oranlı katkı sunmuştur.

Çıkar Çatışması

Makale yazarları, aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

KAYNAKÇA

- [1] T. Uzun, B. Hallaç, A. Altın, and G. Kaya, "Midyat/Mardin ve Beşiri/Batman İlçelerinde Satışa Sunulan Bazı Kuru Üzüm Çeşitlerinin Fizikokimyasal Özelliklerinin Karşılaştırılması", Turkish Journal of Agricultural Engineering Research, vol.1, no. 2, pp. 404-414, 2020.
- [2] N. Karimi, R. R. Kondrood, and T. Alizadeh, "An intelligent system for quality measurement of Golden Bleached raisins using two comparative machine learning algorithms", Measurement, vol. 107, pp. 68-76, 2017.
- [3] İ. Çınar, M. Koklu, and P. D. Ş. Taşdemir, "Classification of Raisin Grains Using Machine Vision and Artificial Intelligence Methods", Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi (GMBD), vol. 6, no. 3, pp. 200-209, 2020.
- [4] K. Mollazade, M. Omid, and A. Arefi, "Comparing data mining classifiers for grading raisins based on visual features", Computers and electronics in agriculture, vol. 84, pp. 124-131, 2012.
- [5] S. Wang, K. Liu, X. Yu, D. Wu, and Y. He, "Application of hybrid image features for fast and non-invasive classification of raisin", Journal of food engineering, vol. 109, no. 3, pp. 531-537, 2012.
- [6] X. Yu, K. Liu, D. Wu, and Y. He, "Raisin quality classification using least squares support vector machine (LSSVM) based on combined color and texture features", Food and Bioprocess Technology, vol. 5, no. 5, pp. 1552-1563, 2012.
- [7] K. Adem, S. Kılıçarslan, and O. Cömert, "Classification and diagnosis of cervical cancer with stacked autoencoder and softmax classification", Expert Systems with Applications, vol. 115, pp. 557-564, 2019.
- [8] S. Kılıçarslan, K. Adem, and M. Celik, "Diagnosis and classification of cancer using hybrid model based on ReliefF and convolutional neural network", Medical hypotheses, vol. 137, no. 109577, 2020.
- [9] S. Kılıçarslan, M. Celik, and Ş. SAHİN, "Hybrid models based on genetic algorithm and deep learning algorithms for nutritional Anemia disease classification", Biomedical Signal Processing and Control, vol. 63, no. 102231, 2021.
- [10] M. Cui, Y. Wang, X. Lin, and M. Zhong, "Fault diagnosis of rolling bearings based on an improved stack autoencoder and support vector machine", IEEE Sensors Journal, vol. 21, no. 4, pp. 4927-4937, 2020.
- [11] O. Kaynar, Z. Aydın, and Y. Görmez, "Sentiment Analizinde Öznitelik Düşürme Yöntemlerinin Oto Kodlayıcı Derin Öğrenme Makinaları ile Karşılaştırılması", Bilişim Teknolojileri Dergisi, vol. 10, no. 3, pp. 319-326, 2017.
- [12] Y. Bengio, "Learning deep architectures for AI", Foundations and Trends in Machine Learning, vol. 2, no. 1, pp. 1-127, 2009.
- [13] W. Chen, S. Gou, X. Wang, X. Li, and L. Jiao, "Classification of PolSAR Images Using Multilayer Autoencoders and a Self-Paced Learning Approach", Remote Sensing, vol. 10, no. 1, pp. 1-17, 2018.
- [14] U. Erkan, "A precise and stable machine learning algorithm: eigenvalue classification (EigenClass)", Neural Computing and Applications, vol. 33, no. 10, pp. 5381-5392, 2021.
- [15] I. Pacal, and D. Karaboga, "A Robust Real-Time Deep Learning Based Automatic Polyp Detection System", Computers in Biology and Medicine, no. 104519, 2021.
- [16] I. Pacal, D. Karaboga, A. Basturk, B. Akay, & U. Nalbantoglu, "A comprehensive review of deep learning in colon cancer", Computers in Biology and Medicine, no. 104003, 2020.
- [17] F. O. Ozkok, and M. Celik, "A hybrid CNN-LSTM model for high resolution melting curve classification", Biomedical Signal Processing and Control, vol. 71, no. 103168, 2022.
- [18] K. Adem, and S. Kılıçarslan, "COVID-19 Diagnosis Prediction in Emergency Care Patients using Convolutional Neural Network", Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, vol 2. no. 2, pp. 300-309, 2021.
- [19] K. Adem, "Diagnosis of breast cancer with Stacked autoencoder and Subspace kNN", Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, vol. 551, no. 124591, 2020.
- [20] M. A. Bülbül, and C. Öztürk, "Optimization, Modeling and Implementation of Plant Water Consumption Control Using Genetic Algorithm and Artificial Neural Network in a Hybrid Structure", Arabian Journal for Science and Engineering, vol. 47, no. 2, pp. 1-15, 2021.
- [21] S. Memiş, S. Enginoğlu, and U. Erkan, "Numerical data classification via distance-based similarity measures of fuzzy parameterized fuzzy soft matrices", IEEE Access, vol. 9, pp. 88583-88601, 2021.
- [22] S. Kılıçarslan, and M. Çelik, "Rotasyon orman sınıflandırma algoritması kullanarak kronik böbrek rahatsızlığının tahmini", Journal of Science and Technology of Dumlupınar University, no. 43, pp. 21-34, 2019.
- [23] J. J. Rodríguez, L. I. Kuncheva, and C. J. Alonso, "Rotation forest: A New classifier ensemble method", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 2810, pp. 1619-1630, 2006.
- [24] E. Akçetin, and U. Çelik, "İstenmeyen Elektronik Posta (Spam) Tespitinde Karar Ağacı Algoritmalarının Performans Kıyaslaması", Journal of Internet Applications & Management/İnternet

- Uygulamaları ve Yönetimi Dergisi, vol. 5, no. 2, pp. 1-20, 2014.
- [25] Ö. H. Namlı, and T. Özcan, “Makine Öğrenmesi Algoritmaları Kullanarak Gişe Hasılatının Tahmini”, Yönetim Bilişim Sistemleri Dergisi, vol. 3, no. 2, pp. 130-143, 2017.
- [26] D. Çıtak, and D. Sabancı, “ Response surface methodology and hydrophobic deep eutectic solvent based liquid phase microextraction combination for determination of cadmium in food and water samples”, Journal of Food Measurement and Characterization, vol. 15, no. 2, pp. 1843-1850, 2021.
- [27] S. Kiliçarslan, and M. Celik, “RSigELU: A nonlinear activation function for deep neural networks”, Expert Systems with Applications, vol. 174, no. 114805, 2021.
- [28] N. K. Okamura, M. J. Delwiche, and J. F. Thompson, “Raisin grading by machine vision”, Transactions of the ASAE (USA), vol. 2, no. 36, pp. 485-492, 1993.
- [29] S. Abuzir, and Y. Abuzir, "Data Mining For CO2 Emissions Prediction In Italy." Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi , vol. 3, no. 1, pp. 59-68, 2020.
- [30] F. Tarakci, and I. A. Ozkan, "Comparison of classification performance of kNN and WKNN algorithms." Selcuk University Journal of Engineering Sciences, vol. 20, no. 2, pp. 32-37, 2021.
- [31] M. Koklu, R. Kursun, Y. S. Taspınar, and I. Cinar, “Classification of Date Fruits into Genetic Varieties Using Image Analysis”, Mathematical Problems in Engineering, vol. 2021, pp. 1-13, 2021.
- [32] M. Koklu, S. Sarigil, and O. Ozbek, “The use of machine learning methods in classification of pumpkin seeds (Cucurbita pepo L.)”, Genetic Resources and Crop Evolution, vol. 68, no.7, pp. 2713-2726, 2021.



Almanpınarı (Osmaniye) Killerinin Yapı Malzemesi Olarak Kullanımına Bir Yaklaşım

An Approach to the Usage of Almanpınarı (Osmaniye) Clays as Building Materials

¹Pınar KOÇHAN , ²Cihan YALÇIN , ³Yusuf URAS 

¹Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Mersin, Türkiye

²Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Sanayi Bölgeleri Genel Müdürlüğü, Dünya Bankası Proje Uygulama Birimi. Ankara, Türkiye

³Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

¹pinarkochan@hotmail.com, ²cihan.yalcin@sanayi.gov.tr,

³yuras@ksu.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

ARTICLE INFO

Article history

Received : 13 March 2022

Accepted : 13 April 2022

Keywords:

Upper Devonian, Clay, FTIR, Aggregate, Almanpınarı (Osmaniye)

ABSTRACT

In this study, the mineralogy of the Almanpınarı clays located in the east of Osmaniye and the relevance of the aggregates made up of these clays to be used as building material were revealed. In the Almanpınarı district the Paleozoic aged rocks form the basement. Red colored clays overly the Upper Devonian aged clayey limestones. Based on the results of the FTIR (Fourier Transform Infrared) analysis of the clays, the predominant clay minerals are kaolinite, illite and smectite. Aggregates of various sizes were prepared from clays with predetermined mineralogy, and the physical properties of these aggregates were investigated. The shrinkage values of clays are between 9-19%, and clays exhibit medium and high plasticity character. It has been determined that the expansion of Almanpınarı clays starts from 1050 °C, its density decreases with organic additives, and the water absorption amount is around 21.8%, respectively. It is figured out that Almanpınarı clays, which have been offered to be used as aggregate for the first time, can be used as a building material as heat and sound insulation issues.

© 2022 Bandırma Onyedi Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Science. Published by Dergi Park. All rights reserved.

MAKALE BİLGİSİ

Makale Tarihleri

Gönderim : 13 Mart 2022

Kabul : 13 Nisan 2022

Anahtar Kelimeler:

Üst Devoniyen, Kil, FTIR, Agrega, Almanpınarı (Osmaniye)

ÖZET

Bu çalışmada Osmaniye doğusunda yer alan Almanpınarı killerin mineralojisi ve bu killerden oluşturulan agregaların yapı malzemesine uygunluğu ortaya konulmuştur. Almanpınarı bölgesinde temelde Paleozoyik yaşlı kayalar bulunmaktadır. Bu kayalar gruplarından Üst Devoniyen yaşlı killi kireçtaşları üzerinde kırmızı renkli killer bulunmaktadır. Daha çok eğimli bölgelerde örtü şeklinde duran killerin FTIR (Fourier Transform Infrared) analizinde yaygın mineraller kaolen, illit ve smektit şeklindedir. Mineralojisi belirlenen killerden farklı boyutlarda agrega üretilmiş ve bu agregaların fiziksel özellikleri ortaya konulmuştur. Orta ve yüksek plastisite karakterinde olan killerin rötre değerleri %9-19 arasındadır. Almanpınarı killerinde genişlemenin 1050 °C'den itibaren başladığı, organik katkı ile yoğunluğunun düştüğü ve su emme miktarının da %21,8 civarında olduğu belirlenmiştir. İlk kez agrega olarak kullanılabilirliği ortaya koyulan Almanpınarı killerin yapı malzemesi olarak ısı ve ses yalıtımı konularında kullanılabileceği düşünülmektedir.

© 2022 Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi. Dergi Park tarafından yayımlanmaktadır. Tüm Hakları Saklıdır.

ORCID ID: ¹0000-0003-3063-9692

²0000-0002-0510-2992

³0000-0001-5561-3275

1. GİRİŞ

Kil başta seramik olmak üzere tuğla, sondaj ve inşaat sektöründe kullanılan önemli bir endüstriyel hammaddedir. Bu geniş ve önemli kullanım alanlarının vazgeçilmez bileşeni olan killerin cinsinin belirlenmesi ve bu killerin yapı malzemesi olarak kullanımlarının belirlenmesi inşaat sektörü için oldukça önemlidir.

Killer mineral içerikleri ve minerallerin kimyasal bileşimlerine bağlı olarak farklı renklerde bulunabilir. Ancak endüstriyel anlamda ise kilin doğal hali değil pişme rengi daha önemli olabilmektedir [1-4]. Pişme rengini ise demirin oksidasyon aşamasına, pişme sıcaklığına, kil minerallerindeki Al_2O_3 , CaO ve MgO oranına ve yanma sırasında oluşan gazların bileşimine bağlıdır [4-6].

Kil mineralleri, kayaçları oluşturan esas minerallerin ayrışmasıyla oluşur. Mineralojisine göre de kaolin, smektit, mika, klorit ve illit şeklinde sınıflandırılır. Bu killerden özellikle kaolin seramik sektöründe kullanılan en önemli endüstriyel hammaddelerden biridir. Bu konuda Türk seramik endüstrisinde özellikle riyolitik-riyodasitik bileşimli kaolinleşmiş volkanik kayaçlar yoğun olarak kullanılmaktadır [7-14].

Bilindiği üzere ülkemizde birçok alanda kil üzerine araştırmalar yapılmıştır. Bunlardan en önemli olanlarından biri de Almanpınarı (Osmaniye) killeri. Almanpınarı killeri Osmaniye doğusundaki Üst Devoniyen yaşlı killi kireçtaşları içerisinde bulunur [15]. Tabakalanma sunmayan killer kırmızımsı rengi ile diğer birimlerden kolayca ayrılır. Bu killerin fiziksel ve mekanik özellikleri araştırmacılar tarafından yapılmıştır [16-18]. Mirdallı vd., [18] seramik sektöründe boya olarak kullanımının uygunluğunu, Aytekin [19] ise zemin iyileştirme açısından uygunluğunu ortaya koymuştur. Rusen [20] farklı lokasyonlardaki killeri değerlendirmiş ve bunların serbest basınç deneylerini yapmıştır. Bu deneyleri Almanpınarı killerinde de uygulamış ve standart Proctor testi ile sıkıştırmıştır.

Endüstriyel kullanım alanının ön plana çıkması sebebiyle birçok araştırmacı bu killerin fiziksel özelliklerini ortaya koymaya çalışmıştır. Bu çalışmada ise Almanpınarı killerinin mineralojisi ortaya konularak bu killerden elde edilen farklı ısılardaki agregaların yapı malzemesi olarak kullanılabilirliği ilk defa ortaya konulmuştur. FTIR tekniği, farklı türdeki kil minerallerini ayırt etmek ve kil minerallerinin kimyasal modifikasyonu üzerine yapı, bileşim ve yapısal değişiklikler hakkında bilgi elde etmek için kullanılır. Bu teknik kil mineral örneklerinden mineraloji ve kristal kimyasını değerlendirmek için en bilgilendirici tekniktir. Bu sebeple bu yöntem kullanılarak Almanpınarı killerinin mineralojisi belirlenmiştir. Aynı zamanda killere ait kıvam limitleri Atterberg yöntemi ile belirlenmiştir. Sonrasında ise bu killerin farklı tane boyutundaki pelletleri hazırlanmış ve ısı işleme tabi tutulmuştur. Tüm bu süreçler boyunca da kile ait fiziksel özellikler belirlenmiştir.

2. GENEL JEOLJİ

Almanpınarı bölgesi ve civarında bölgenin temeli Kembro-Ordovisiyen yaşlı Seydişehir formasyonundan oluşmaktadır (Şekil 1). Almanpınarı kuzeydoğusunda yer alan birim başlıca kireçtaşı, metasilttaşı, metakumtaşı, metaşeyl, metaçamurtaşı ardalanmasından oluşmakta olup Bedinan formasyonu tarafından açısız uyumsuzlukla örtülmektedir [21-23]. Orta-Üst Ordovisiyen yaşlı olan birim gri-siyah ve gri-yeşil sleyt ve siltli sleyt litolojilerinden oluşmaktadır. Bedinan formasyonu ise Almanpınarı ve civarında gözlenen Üst Devoniyen yaşlı kireçtaşı ve sleyt ardalanmalı birim tarafından açısız uyumsuzlukla örtülmektedir [24-25]. Bu Paleozoyik seri ise karbonatlı kayaçlardan oluşan Alt Kretase yaşlı Karadağ formasyonu [26] ile açısız uyumsuzlukla, peridotit, harzburjit, dünit, lertzolit, serpantinlerden oluşan Kızıldağ ofiyoliti [27-29] tektonik dokanakla örtülmektedir (Şekil 1). Bu yaşlı istif üzerinde ise Neojen yaşlı sedimanter kayaçlar ile Kuvaterner yaşlı kayaç grupları açısız uyumsuzlukla örtülmektedir.

Almanpınarı killerinin bulunduğu Hasanbeyli Formasyonu başlıca kireçtaşı ve sleyt ardalanmasından oluşur. Taban seviyelerde daha çok karbonatlı sleytlerin olduğu formasyonun üst seviyelerinde ise kireçtaşları hâkimdir. Kireçtaşlarının tavan seviyelerinde ise kil oluşumu gözlenmektedir.

3. MATERYAL VE METOD

Sahada farklı lokasyonlarda mostra veren killerden örnekler alınmıştır. Örnek alırken saha geneli düşünülerek gözlemsel veriye dayalı örnekleme gerçekleştirilmiştir. Derlenen killerin mineralojik analizleri için FTIR (Fourier Transform Infrared) yöntemi kullanılmıştır. Bu analiz Mersin Üniversitesi İleri Teknoloji Eğitim, Araştırma ve Uygulama Merkezinde yapılmış ve diyagramları hazırlanmıştır. Öncelikle ince toz haline getirilen 10 adet örnek kızılötesi ışınlar maruz bırakılmıştır. Bu uygulama sonucunda ise pikler ortaya çıkmıştır. Nitel analizler için ise günümüzde çok sayıda minerale ait Infrared spektrumları değerlendirilmiştir. Böylece FTIR diyagramı ile spektrumlar karşılaştırılmış ve piklerin hangi minerallere ait olduğu tespit edilmiştir. Mineralojik bileşimi belirlendikten sonra Almanpınarı killerinin yapı malzemesi olarak kullanılabilirliği için bu killerden agrega üretilmiştir. Bu üretim için killer öncelikle toz haline getirilmiş ve bu killerin macun kıvamına gelmesi için de su ilave edilmiştir (Şekil 2a). Macun kıvamındaki killer küçük (>8-10 mm), orta (>10-14mm) ve büyük boyutta (>14-20 mm) olmak üzere pelletler oluşturulmuştur (Şekil 2b). Bu pelletler etüvde 4-5 saat 105 °C de kurutulduktan sonra soğutma işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 2c, d). Bu proses sonucunda 3 farklı boyutta pellet oluşturulmuş ve fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Bu farklı boyuttaki pelletler 900-1200 °C aralığındaki

sıcaklıklarda ısı işleme tabi tutulmuş ve agrega üretimi sonlanmıştır. Elde edilen agregaların fiziksel özellikleri de (yoğunluk, genleşme vb.,) ortaya konulmuştur.



Şekil 1. Almanişınarı ve çevresinin jeoloji haritası (Şenel [29]'den değiştirilerek hazırlanmıştır).

4. BULGULAR

4.1. Kil Mineralojisi

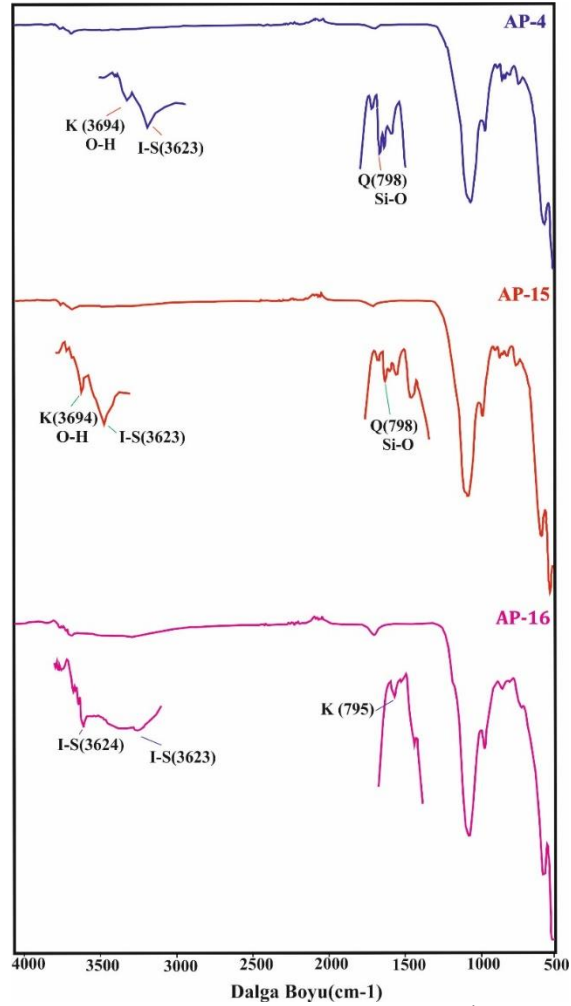
Almanişınarı bölgesindeki killerden (Şekil 3) örnekler alınmıştır. Alınan örneklerin mineralojik tanımlaması için de FTIR yöntemiyle analiz gerçekleştirilmiştir (Şekil 4). Yapılan analiz sonucunda örneklerde kaolin, illit, smektit mineralleri ile birlikte, kuvars, kalsit ve dolomit mineralleri de tespit edilmiştir (Şekil 4). FTIR diyagramında kaolenin dalga boyu $3697-3624 \text{ cm}^{-1}$ arasında illit ve smektit grubu dalga boyları da 3622 cm^{-1} dolaylarındadır (Şekil 4). Kaolendeki bu yüksek dalga boyu mineralin kristal yapısındaki (OH) ile ilgilidir.



Şekil 2. Almanişınarı killlerinden elde edilen a) macun, b) pellet, c) ısı işleme görmüş pellet ve d) soğutulmuş pelletlerin görünümleri.



Şekil 3. Almanpınarı killerin genel görünümü.



Şekil 4. Almanpınarı killerin FTIR diyagramı (K:Kaolinit; I:İllit, S: Smektit, Q: Kuvars;).

4.2. Kil Agregaların Fiziksel Parametreleri

Almanpınarı killerine ait Atterberg limitleri, ASTM, D 4318-10'a göre yapılmıştır. Bu çalışma ile killerin likit (LL) ve plastik limitleri (PL) belirlenmiştir. Likit limit testi ise Casagrande yöntemine göre yapılmıştır [30]. Son olarak plastisite indisi (PI) de likit limitten plastik limit değerinin çıkarılması ile elde edilmiştir (Tablo 1). Rötore

limitler ise (SL) % kuru küçülme ile % pişme küçülmesinin toplamından elde edilmiştir (Tablo 1). Kuru ve pişme küçülmesine ait formül aşağıda verilmiştir.

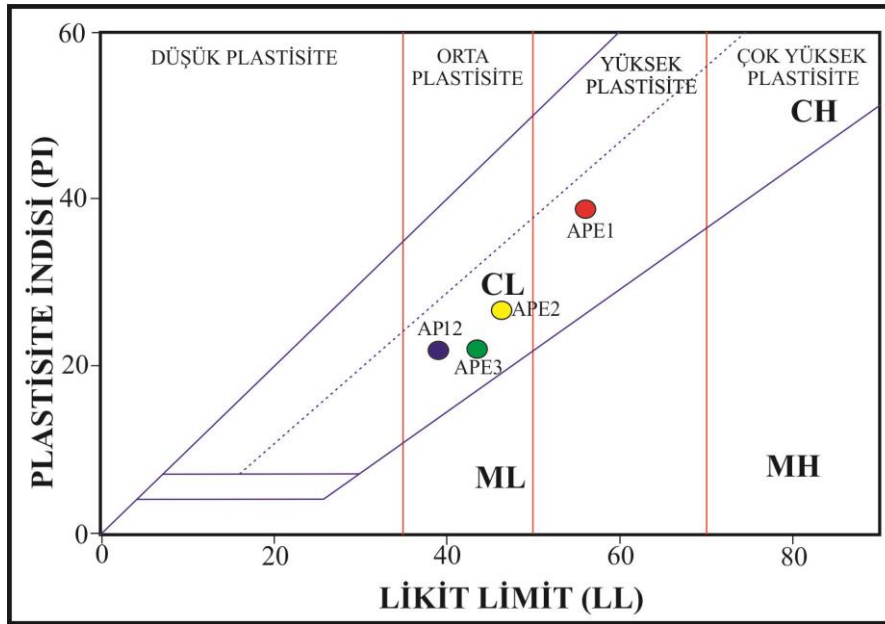
$$\% \text{ Kuru Küçülme} = (\text{Plastik uzunluk} - \text{Kuru uzunluk}) / \text{Plastik uzunluk} * 100$$

$$\% \text{ Pişme Küçülme} = (\text{Kuru uzunluk} - \text{Pişme uzunluk}) / \text{Kuru uzunluk} * 100.$$

Yuvarlak pellet haline getirilen killerin likit limit değerleri %39-58 arasında, plastik limit değerleri %22- 40 arasında ve rötre değerleri ise %9 ile 19 arasındadır (Tablo 1). Elde edilen veriler plastisite kartı üzerine yerleştirilmiş ve örneklerin dağılımları Şekil 5’de verilmiştir. Bu değerler sonucunda Almanpınarı killerin orta ve yüksek plastisiteli olduğu (Şekil 5) ortaya konulmuştur. Elde edilen kıvam limitleri endüstriyel hammadde olarak kullanım için uygun olmasına rağmen rötre değerinin yüksek olması üründe çatılma ve deformasyonlar oluşturabileceği için bu durum göz önüne alınmalıdır.

Tablo 1. Killerin kıvam limitleri.

%	APE1	APE2	APE3	API2
LL	58	46	42	39
PL	40	28	23	22
PI	18	17	19	17
SL	19	16	11	9



Şekil 5. Plastisite indisi-Likit limit diyagramı.

Kil agregaların üretimi aşamasında killerin fırında kalma süresi, sıcaklık ve genişleme miktarı ilişkileri ortaya konulmuştur (Tablo 2). Yapılan çalışma neticesinde killerde genişlemenin 1070 °C’den itibaren başladığı belirlenmiştir (Tablo 2).

Yuvarlak pellet şekline getirilen agrega örneklerinin ham ve belli oranlarda organik katkı olarak (kömür tozu, talaş vs.) farklı sıcaklıklardaki yoğunlukları Tablo 3’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre agregaların oldukça düşük yoğunlukta oldukları görülmektedir.

Genleştirilmiş farklı boyutlardaki kil agregalarının ortalama gevşek ve sıkışık haldeki yoğunlukları Tablo 4’de verilmiştir. Bu sonuçlara göre ise killerin gevşek veya sıkışık halde yoğunluklarının giderek azaldığını söylemek mümkündür.

Yapı malzemelerinin üretiminde kullanılacak agregaların en önemli parametrelerinden biri de su emme miktarıdır. Bu hesaplama için daha önce etüvde 105 °C kurutulmuş örnek tartılmıştır (M_K). Kütleli belirlen agregalar bir kap içerisine koyulmuş ve kaba su doldurulmuştur. 24 saat bekletilen agregaların daha sonra suyu süzülmesi ve kuru bir bez yardımı ile dış yüzeyleri de kurularak tartılmıştır (M_D). Kuru ve suya doymuş hale getirilen bu agregaların su emme miktarı (SE)= $100 * [(M_D) - (M_K)] / (M_K)$ formülü kullanılarak hesaplanmıştır.

Bilindiği üzere su emme miktarı yüksek olan agregadan üretilen yapı malzemelerinin dayanımı da düşük olmaktadır. Bunun yanında yüksek su emme özelliğine sahip agregaların kuruması da zaman alabilmekte hatta malzemelerde rutubet oluşumuna da neden olmaktadır. Bu çalışmada üretilen kil agregaların su emme miktarı ortalama %21,8 olarak belirlenmiştir. Kaliteli hafif agregalarda su emme genellikle %15’in altında olup

genleştirilmiş olanlarda ise %10'un altındadır [31], Bu sonuçla beraber killerin yapı malzemesinden çok yalıtım amaçlı kullanılması gerekmektedir.

Tablo 2. Küre şekline getirilen killerin fırında kalma süresi, sıcaklık ve genleşme miktarı ilişkileri.

Sıcaklık (°C)	Genleşme durumu	Fırında kalma süresi (Dakika)
1070	Genleşiyor	40
1100	Genleşiyor	30
1130	İyi Genleşiyor	20
1150	Genleşme ve birbirine yapışma	10
1170	Aşırı genleşme ve birbirine yapışma	10
1200	Aşırı genleşme ve erime	10

Tablo 3. Ham ve farklı oranlardaki organik katkılı üretilen agregaların farklı sıcaklıklardaki yoğunlukları (OK, organik katkılı agregası).

Sıcaklık (°C)	HAM	% 0.2 OK	% 0.3OK	0.4% OK
	ρ (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)
1050	1,98	1,86	1,80	1,74
1070	1,74	0,59	0,54	0,52
1100	1,67	0,58	0,48	0,46
1130	1,70	0,45	0,42	0,36
1150	1,20	0,54	0,42	0,33
1170	1,15	0,50	0,41	0,31
1200	1,12	0,50	0,39	0,30
Ortalama	1,49	0,52	0,45	0,38

Tablo 4. Farklı boyutlardaki genleştirilmiş kil agregasının (GKA) gevşek ve sıkışık haldeki yoğunlukları.

Agrega boyutu	Gevşek (g/cm ³)	Sıkışık (g/cm ³)
16-5,6 mm	0,34	0,37
8-2 mm	0,47	0,53
Ortalama	0,41	0,45

5. TARTIŞMA

Almanpınarı killeri Osmaniye doğusundaki Üst Devoniyen yaşlı killi kireçtaşları içerisinde bulunur. FTIR çalışmalarında killerin kaolen, illit ve smektit grubu minerallerinden oluştuğu belirlenmiştir. Derlenen örneklerde az da olsa silis ve karbonat mineralleri de tespit edilmiştir. Almanpınarı killerinin bileşiminde onlara kırmızı rengi veren hematit minerali de bulunmaktadır.

Türkiye'nin birçok bölgesinde genleştirilmiş killerden agregası yapımına yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir [32-33]. Gündüz ve diğ. [34] genleşen killerin tanımını yapmak ve mühendislik özelliklerini araştırmak amacıyla bir çalışma yürütmüştür. Bu çalışma sonucunda killerden hafif agregası yapılabileceğini belirtmiştir. Benzer bir çalışma ise Ankara-Kalecik bölgesinde yapılmıştır. Bu bölgedeki killerden genleşmiş kil agregaları oluşturulmuş ve killerin fiziksel özellikleri ortaya konulmuştur [35]. Bu çalışmada ise Almanpınarı killerinin agregası olarak kullanılabilirliğine altlık sağlamak amacı ile ısıtma işlemi ve boyutlandırma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Isıtma işleminden geçen kil pelletleri genleştirilmiş ve soğutulmuştur. Daha sonra ise ortaya çıkan agregaların fiziksel özellikleri ortaya konulmuştur.

Kil agregaları için daha önce benzer çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Özkan ve Dokumacı [36] atık kil ve pirinçten oluşan şekillendirilmiş agregaları farklı ısılarda test etmiş ve düşük yoğunluklu seramiklerin üretilebileceğini ortaya koymuştur. Tunç vd., [37] yapısal hafif betonlarda genleştirilmiş kil agregasının önemli bir bileşen olduğunu belirtmiştir. Bu çalışmada elde edilen verilere göre ise önceki çalışmalarda olduğu gibi düşük yoğunluklu kil agregası üretilmiş ancak düşük yoğunluklu olması nedeniyle daha çok yalıtım malzemesi olarak kullanılması önerilmektedir. Ayrıca Gürbüz ve Aydın [38] betonda kullanılan kil agregalarının oranının yüksek olması ile işlenebilirlik durumunun arttığını ancak sertleşmiş betonda ise eğilme ve basınç dayanımlarında büyük oranda azalmanın olduğunu ifade etmiştir. Bu çalışmada görüldüğü üzere genleştirilmiş kil agregalarının kıvam limitleri ve su emme miktarları göz önüne alındığında yüksek plastisiteli killerin yüksek dayanımlı beton üretimi için uygun olmadığı görülmektedir.

Sevinç [39] tane boyutu farklı olan ve yüksek oranda kalsiyum oksit içeren Afşin-Elbistan uçucu külünün geopolimer harç üretiminde hammadde olarak kullanılabilirliğini değerlendirmiş ve bu örneklerin mekanik ve fiziksel özelliklerini ortaya koymuştur. Bu çalışmada ise farklı boyuttaki agregaları genleştirilmiş ve bu killerin fiziksel özellikleri belirlenmiştir.

6. SONUÇ

Bu çalışmada mineralojisi belirlenen Almanpınarı killlerinden geliştirilmiş farklı boyutlarda agrega üretilmiş ve elde edilen agregaların fiziksel özellikleri ortaya konulmuştur. Killerin orta ve yüksek plastisiteli olduğu ve rötre değerlerinin yüksek olduğu belirlenmiştir. Killerin 1050 °C'den itibaren geliştiği tespit edilmiştir. Organik katkı ile karıştırıldığında kil agregaların yoğunluğunun düştüğü ve su emme miktarının %21,8 olduğu belirlenmiştir. Hafif agregaların yapılarda kullanılması için bu miktarın %15'i geçmemesi gerekmektedir. Bu veriler ışığında killerin daha çok ısı ve ses yalıtımı amaçlı kullanılabilmesi düşünülmektedir. Ayrıca kıvam limitlerinden LL değeri ortalama %46,25, PL değeri % 28,25 ve SL %13,75 değerleri elde edilmiştir. Bunun yanı sıra ise kuru ve pişme küçülme değerleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre kilin yüksek plastikliğe sahip olduğu ve tek başına kullanılmasının mümkün olmadığı değerlendirilmiştir. Ancak Almanpınarı bölgesinde kırmızı killerin çevresinde bol miktarda bulunan ve büzülme ve su emme miktarı düşük olan (şişmeyen) klorit ve serizit siltlerindeki killer ile belirli oranlarda karıştırılarak tuğla üretimi için uygun bir hammadde oluşturulması ve malzemenin bu şekilde değerlendirilmesi mümkündür.

Yapılan bu çalışmadan elde edilen agregalar ileride farklı bileşimlerdeki betonlar ile karıştırılarak tekrar değerlendirilmelidir. Dayanım, sonik hız vb., çalışmalar ile agreganın beton üzerindeki etkisi ortaya konulmalıdır.

Yazar Katkıları

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sunmuşlardır.
Yazarlar makalenin son halini okudu ve onayladı.

Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Teşekkür

Bu çalışma Mersin Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimince 2017-2-TP2-2619 proje numarası ile desteklenmiştir. Ayrıca çalışma rahmetli Prof. Dr. Fevzi ÖNER'in anısına hazırlanmıştır.

KAYNAKÇA

- [1] R. E. Grim "Applied Clay Mineralogy", International series in the earth and planetary sciences, U.S.A., p. 422, 1962.
- [2] W. D. Kingery, H. K. Bowen, D. R. Uhlmann, "Introduction to ceramics", Second Edition, John Wiley and Sons, p. 1032, 1976.
- [3] Y. Sarıkaya, "Killerin önemi ve özellikleri", III. Ulusal Kil Sempozyumu, Bildiriler, pp. 13-32, 1987.
- [4] Z. Mete, ve G. Özçalık, "Seramikte kullanılan doğal demir renklendiriciler" Seramik Sırları Semineri, Bildiriler Kitapçığı, Türk Seramik Derneği Yayınları no. 18, 1998.
- [5] M. Üzer, ve Ç. Tola, "Kiremit, tuğla topraklarında kuruma problemleri ve elektrolit ilavesinin kurumaya etkisi", Seramik Teknik Kongresi ve Sergisi Bildiriler Kitabı, pp. 84-214, 1987.
- [6] Z. Çobanlı, "Seramik astarları", Anadolu Üniversitesi Yayınları no. 919, G.S.F. Yayınları no. 15, 1996.
- [7] S. Öngen, and N. Aysal, "Use of rhyolitic rocks as a raw material in ceramics", Int Symp Earth Syst Sci, p. 265, 2004.
- [8] A. Sayın, "Origin of kaolin deposits: evidence from the Hisarcık (Emet-Kütahya) deposits, Western Turkey", Turk J Earth Sci, vol. 16, pp. 77-96. 2007.
- [9] H. Çelik, "Technological characterization and industrial application of two Turkish clays for the ceramic industry", Appl Clay Sci, vol. 50, pp. 245-254. 2010.
- [10] G. Yanık, F. Esenli, V. Uz, V. Esenli, B. Uz, and T. Külah, "Ceramic properties of kaolinized tuffaceous rocks in Kesan region, Thrace, NW Turkey", Appl Clay Sci, vol. 48, pp. 499-505, 2010.
- [11] H. Erkoyun, and S. Kadir, "Mineralogy, micromorphology, geochemistry and genesis of a hydrothermal kaolinite deposit and altered Miocene host volcanites in the Hallaçlar area, Uşak, western Turkey", Clay Miner, vol. 46, pp. 421-448, 2011.
- [12] G. Yanık, "Mineralogical, crystallographic and technological characteristics of Yaylayolu kaolin (Kütahya, Turkey)", Clay Miner, vol. 46, pp. 397-410, 2011.
- [13] Ö. I. Ece, B. Ekinci, P. A. Schroeder, D. Crowe, and F. Esenli, "Origin of the Düvertepe kaolin-alunite deposits in Simav Graben, Turkey: timing and styles of hydrothermal mineralization", Journal of Volcanol Geotherm Res, vol. 255, pp. 57-78, 2013.
- [14] D. Laçın, N. Aysal, and S. Öngen, "Geological mineralogical and technological properties of Oligocene-Miocene clay deposits in altered volcanic rocks for the ceramic industry (Western Anatolia, Turkey)". Arab Journal Geosci, vol. 14, p. 1904, 2021.
- [15] "Osmaniye İl Çevre Durum Raporu", İl Çevre ve Orman Müdürlüğü, , sf.34, Osmaniye, Türkiye, 2004.

- [16] H. Güneyli, "Farklı kökenlere sahip killerin kompaksiyon özelliklerinin karşılaştırması", Ç.Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, vol. 23, no. 2, pp. 199-206, 1998.
- [17] T. Taskıran, "Diyarbakır ili, kayapınar-yeniköy-bağcılar yöresi kilinin şişme potansiyelinin irdelenmesi", Yüksek Lisans tezi, G. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2000.
- [18] N. Mirdallı, Y. Z. Halefoğlu, ve N. Sakarya, "Almanpınarı kırmızı kilinin seramikte boya olarak kullanılabilirliğinin araştırılması", Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, vol. 15, no. 1, pp. 229-234, 2006.
- [19] S. Aytekin, "Uçucu küllerin killi zeminlerin ıslahında kullanımı", Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Adana, 82s., 2009.
- [20] T. Rusen, "Killi zeminlerin tek eksenli dayanımı üzerinde örnek boyutu etkisi", Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 274s. 2011.
- [21] M. Blumenthal, "Geologie der Taurusketten in Hinterland von Seydişehir und Beyşehir", MTA Yayınları Seri D 5, pp. 134, 1947.
- [22] W. T. Dean, and O. Monod, "The Lower Paleozoic stratigraphy and faunas of the Taurus mountains near Beyşehir, Turkey", I. Stratigraphy (London), 1970.
- [23] U. Doğan, "Orta ve Kuzey Amanos Dağları'nın (Osmaniye-Gaziantep-K.maraş) stratigrafisine ilişkin yeni bulgular", TPJD Bülteni, vol. 1, pp. 57-98, 2015.
- [24] N. Yalcın, "Orta Amanosların jeolojisi ve petrol olanakları", TPAO Arama Grubu, Rapor no. 1393, 1979.
- [25] W. T. Dean, and O. Monod, "A new Ordovician stratigraphy in the Bahce area, Northern Amanos Mountains, South Central Turkey", Geological Magazine, vol. 122, pp. 15-25, 1985.
- [26] A. Aksay, O. Tekeli, B.M. Ürgün, ve A. Işık, "Amanoslar'ın Paleozoyik birimleri ve Mesozoyik platform karbonat istifleri", MTA Rap., 8312 (yayımlanmamış), 1988.
- [27] H. Selçuk, "Kızıldağ-Keldağ-Hatay dolayının jeolojisi ve jeodinamik evrimi", M.T.A Rapor, no 7787, 1985.
- [28] U. Bağcı, O. Parlak, and V. Hock, "Geochemistry and tectonic environment of diverse magma generations forming the crustal units of the Kizildag (Hatay) Ophiolite, Southern Turkey", Turk J Earth Sci., vol. 17, no. 1, pp. 43-71, 2008.
- [29] M. Şenel, (Ed.) "1:1,000,000 scale geological map of Turkey". General Directorate of Mineral and Research and Exploration, 18 sheets, 2002.
- [30] A. Casagrande, "Classification and identification of soils", ASCE Transactions, no. 2351, 1947.
- [31] A. M. Neville, and J. J. Brooks. "Concrete technology (2nd ed.)" Prentice Hall Harlow, England, 2010.
- [32] DPT, "Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu", Yapı Malzemeleri Genleşen Killer, pp. 69-73. 2005.
- [33] N. Kırıl, "Genleşen Kil Aramaları", MTA Raporu, pp. 1-25, 2002.
- [34] L. Gündüz, N. Şapıcı, M. Bekar, ve S. Yorgun, "Genleşmiş kilin hafif agrega olarak kullanılabilirliği", KİBİTED 1(2) Kil Bilimi ve Teknoloji Dergisi, Temmuz, 2006, pp. 43-49, 2006.
- [35] G. Murat, "Genleşmiş kil agregalarının hafif betonda kullanılabilirliğinin araştırılması". Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi., 150s., 2007.
- [36] İ. Özkan, and E. Dokumacı, "Recycling waste clay and rice husk ash in the production of low-density ceramics", El-Cezeri Journal of Science and Engineering, vol. 8, no. 1, pp. 309-314, 2021.
- [37] E. T. Tunc, K. E. Alyamac, and Z .C. Ulucan, "A numerical approach to estimate the tensile strength of structural lightweight concrete", El-Cezeri Journal of Science and Engineering, vol. 7, no. 2, pp. 690-699, 2020.
- [38] G. Gürbüz, ve F. Aydın, "Agrega kil oranının betonun mekanik özelliklerine etkilerinin araştırılması", Türk Doğa ve Fen Dergisi, vol. 10, no. 1, pp. 144-149, 2021.
- [39] A. H. Sevinc, "Farklı tane boyutuna sahip afşin-elbistan uçucu külünün geopolimer hammaddesi olarak kullanımı" El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi, vol. 8, no. 2, pp. 751-765, 2021.



Bilgisayarlı Görü Teknikleri Kullanılarak Yapay Zeka Temelli Limon Ağacı Rekolte Tahmini

Artificial Intelligence Based Prediction of Lemon Tree Yield Using Computer Vision Technique

¹Yalçın IŞIK , ²Mücahit ÜNAY , ³Ahmet KAYABAŞI 

¹Selçuk Üniversitesi, Silifke-Taşucu Meslek Yüksekokulu, Silifke/Mersin, Türkiye

²MEB Silifke Atatürk Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi, Silifke/Mersin, Türkiye

³Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Karaman, Türkiye

¹isiky@selcuk.edu.tr, ²mucahitunay33@hotmail.com,

³ahmetkayabasi@kmu.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

ARTICLE INFO

Article history

Received : 20 March 2022

Accepted : 14 April 2022

Keywords:

Agriculture, Lemon Detection, Yield Prediction, Image Processing, Artificial Neural Network

ABSTRACT

Agriculture has always been one of the most important production sectors for people and has been in continuous technological development since the early times of human history. Computer vision techniques are also widely used in agriculture today. In the lemon groves, when the fruits on the trees are ripe and ready for sale, the total fruit yield is estimated by experienced people and the sales process takes place based on this forecast data. In this research, fruit yield estimation was made by using numerical data obtained by using computer vision techniques on fruit image taken from trees and transferred to computer environment and the artificial neural network in multilayer perceptron architecture. The designed system estimated the yield correctly by 72.8 % from the pictures taken while the lemons were on the tree and estimated the weights correctly 99.13% from the pictures taken while they collected.

© 2022 Bandırma Onyedli Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Science. Published by Dergi Park. All rights reserved.

MAKALE BİLGİSİ

Makale Tarihleri

Gönderim : 20 Mart 2022

Kabul : 14 Nisan 2022

Anahtar Kelimeler:

Tarım, Limon Tespiti, Rekolte Tahmini, Görüntü İşleme, Yapay Sinir Ağı

ÖZET

Tarım, insanlar için her zaman en önemli üretim sektörlerinden birisi olmuş ve insanlık tarihinin ilk zamanlarından bu zamana kadar sürekli olarak teknolojik gelişim içinde olmuştur. Günümüzde tarım alanında bilgisayarlı görü teknikleri de yaygın olarak kullanılmaktadır. Limon bahçelerinde ağaçlar üzerindeki meyveler olgunlaşıp satışa hazır hale geldiğinde, toplam meyve rekoltesi bu konuda deneyimli insanlar tarafından tahmin edilir ve satış işlemi bu tahmin verisi üzerinden gerçekleşir. Bu araştırma ile, ağaçlardan alınan ve bilgisayar ortamına aktarılan meyve görüntüleri üzerinde bilgisayarlı görü tekniklerinin kullanılması ile elde edilen sayısal veriler ve çok katmanlı perseptron mimarisinde yapay sinir ağı kullanılarak meyve rekoltesi tahmini yapılmıştır. Tasarlanan sistem rekolteyi limonların ağaçtayken çekilen resimlerinden %72,8 oranında, toplanmış haldeyken çekilen resimlerinden ise ağırlıklarını % 99,13 oranında doğru tahmin etmiştir.

© 2022 Bandırma Onyedli Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi. Dergi Park tarafından yayımlanmaktadır. Tüm Hakları Saklıdır.

ORCID ID: ¹0000-0001-9223-5381

²0000-0002-4265-2491

³0000-0002-9756-8756

1. GİRİŞ

Limon yıl boyunca yaprakları dökülmeyen, büyümesini sürdüren ve yapısında uçucu yağlar bulunan bir ağaç türüdür. Dünya turunçgiller üretiminin 2019/20 sezonunda %8'ini limon oluşturmaktadır. Bir yılda dünya genelinde 2,2 milyon ton ihracatı olan limonun, %25'i Türkiye tarafından yapılmaktadır. 2019 yılında Türkiye'de 4,3 milyon ton civarında gerçekleşen turunçgiller hasadının %22'sini 950 bin tonluk rekolte ile limon ve misket limonu oluşturmuştur [1]. Görüldüğü gibi limon Türkiye ekonomisinde önemli bir katkı payına sahiptir ve limonla ilgili yapılacak her türlü teknolojik çalışma ülkeye belirli bir katkı sağlayacaktır. Limonun çiftçi tarafından bahçede satışı genellikle kilogram olarak değil, bütün bahçedeki ürünün tamamı olarak satılmaktadır. Satış bedeli bütün bahçeden hasıl edilecek toplam limon miktarının uzman kişilerce kilogram olarak tahmin edilmesiyle belirlenmektedir. Tabii ki insan yanılgıları sonucunda tam tahmin yapılamayıp ürünün gerçek değerinde satılamaması sorunları olmaktadır. Bu sorunu ortadan kaldırmanın tek yolu, tahmini %100'e yakın değere yaklaştırmaktır ve bunun da insan gözüyle olması pek mümkün değildir. Pek çok alanda olduğu gibi bu alanda da görüntü işleme ve yapay sinir ağı yöntemleri kullanılarak daha doğru tahminler yapmak muhtemeldir. Başlangıçta %100 tahmin başarısı mümkün olmayabilir ama zaman içinde görüntüleme ve değerlendirme yöntemlerinde olacak gelişmelerle %100'e yaklaşmak mümkün olacaktır.

Literatürde değişik meyvelere ait görüntü işleme tekniklerinin kullanılmasına ilgili çalışmalar vardır. Linker vd., (ve diğerleri) doğal aydınlatma koşullarında elma bahçelerinde elde edilen RGB (Red Green Blue-Kırmızı Yeşil Mavi) görüntülerden yeşil elma sayısının belirlenmesine yönelik algoritma geliştirmiştir. Algoritma, dört ana adımı içermektedir. Renk ve pürüzsüzlük kullanarak, elmaya ait olma olasılığı yüksek olan piksellerin tespiti, elmalara ait olma olasılığı yüksek olan birleştirilmiş piksel kümeleri olan "tohum alanlarının" oluşumu ve genişlemesi, bu tohum alanlarının dış hatlarının yaylara ve bölümlere ayrılması, bu yayların birleştirilmesi ve elde edilen dairenin basit bir elma modeliyle karşılaştırılmasından oluşmaktadır. Algoritmanın performansı iki veri grubu kullanılarak incelenmiştir. İlk veri grubu, kameranın tam otomatik modunda ve çeşitli aydınlatma koşullarında kaydedilen görüntülerden oluşmaktadır. İkinci veri grubu, manuel olarak düşük pozlanmış ve çoğunlukla dağınık ışık altında (gün batımına yakın) kaydedilmiş görüntülerden oluşmaktadır. Algoritma ile görüntülerde görülebilen elmanın %85'inden fazlasını doğru tespit etmiştir. Çalışmada doğrudan aydınlatma ve renk doygunluğu, çok sayıda yanlış pozitif tespite neden olmuştur. Bu tür görüntüler için doğru algılama oranı %95'e yakın, yanlış pozitif algılama oranı %5'ten az olarak sonuçlanmıştır [2]. Er vd., yapmış oldukları çalışmada, Akdeniz bölgesinde yer alan Isparta ve civarı illerde yetiştirilen elmaları görüntü işleme yöntemleri ile elmanın rengine, elmanın boyutuna ve elmanın ağırlığına göre ayırmaya yönelik çalışma gerçekleştirmişlerdir. Görüntü üzerinde elmayı bulma, boyutlandırma ve ağırlık tespiti resim üzerinde en küçük kareler yöntemi kullanılarak tahmin edilmeye çalışılmıştır. Yürüyen bant üzerindeki elmalar nitelik ve nicelik açısından %95,5 oranında doğru tespit edilmiştir. Tasarlanan sistemin bir elmayı tespit etme süresini 0,5 saniye olarak kayıt etmişlerdir [3]. Kurtulmuş vd., histogram eşitleme ve logaritma dönüşümü gibi bilgisayarlı görü yöntemlerinden faydalanarak normal şartlarda alınan şeftali meyvesinin görüntülerini aydınlatma açısından zenginleştirmişlerdir. Olgunlaşmamış şeftali meyvelerini tespit eden görüntü işleme algoritması oluşturmuşlardır. Çalışmada kullanılan görüntüleri 2048*1536 piksel çözünürlükte elde etmişlerdir. Meyve görüntüleri ile kamera arasında 50 cm mesafe bırakmışlardır. Görüntü işleme algoritmalarının geliştirilmesi ve test çalışmaları için görüntülerden rastgele 32 tanesi ile eğitim yapılmış, 64 tanesi ile test işlemi yapılmıştır. Kullanılan algoritma ile görüntülenen meyvelerin %75,3'ü doğru tespit edilmiştir [4]. Ören, yapmış olduğu çalışmada, salatalıklardaki bozulmanın etkisiyle meydana gelen boyut kaybı, nem oranındaki azalma, meyve renk değişimi ve dönüşümü ile küflenme ve berelenme oluşumunu Matlab programında görüntü işleme teknikleri ile tespit etmiştir [5]. Yaşar, Matlab programında görüntü işleme teknikleri kullanarak yaptığı çalışmada, portakal ağaçlarının doğal ortamda görüntülerini elde ederek ağacın meyve yükünü hesaplamıştır. Güneşin yoğun olduğu saatlerde yapılan resim çekimlerinde işlem yapmadan önce Matlab programı ile görüntüye karartma işlemi uygulamıştır. Yapılan çalışma neticesinde, portakal ağaçlarının meyve yükü %89,8 doğrulukla tahmin edilmiştir [6]. Tosun, görüntü işleme metodlarıyla yaprak alanı ölçüm sistemi adıyla yaptığı çalışmada, ARM mikrodenetleyici kullanarak tasarladığı yaprak alanı ölçme ünitesinde, ışığın yalıtıldığı bir kutu içerisinde görüntüsü alınan yaprağın alanını OpenCv kütüphanesi ile görüntü işleme teknikleri kullanarak tespit etmiştir. Python dili ile geliştirilen yazılımda arka plan temizleme, kenar bulma algoritması ve alan belirleme yöntemleri kullanılarak sonuca ulaşılmıştır. Çalışmanın %98,8 oranında doğruluk payı olduğu gözlemlenmiştir [7]. Akıncı, yaptığı çalışmada EmguCv görüntü işleme grafik kütüphanesi kullanarak aynı anda elde ettiği video görüntülerinden meyveleri ebatlarına göre sınıflandıran bir çalışma yapmıştır. Görüntülerin eşiklenme, düzleştirilme, yumuşatılma ve kenar bulma işlemlerinden sonra meyvenin görüntüsüne ait piksel koordinatları bulunarak meyvenin boyut bilgisine ulaşılmış, böylece meyveler boyutlarına göre ayrılmıştır [8]. Ergezer vd., yapay sinir ağları için örneklerle ilgili bilgiler toplayarak, genellemeler yapmakta ve sonra daha önce hiç karşılaşmadığı örneklerle karşılaştırılınca edindiği bilgilerden yararlanarak o örnekler için bir karar vermektedir. Yapay sinir ağları bu öğrenebilme ve genelleme yetenekleri sayesinde günümüzde pek çok bilim dalında oldukça sık kullanılmakta ve karmaşık görünen sorunları başarılı bir şekilde çözebilmektedirler [9]. Kav vd., yaptığı çalışmada tarımsal faaliyetin çok olduğu Karaman'da meteorolojik ölçümler yapmış ve elde edilen verileri kullanarak regresyon modeli ve yapay sinir ağları modeli ile en yüksek ve en düşük sıcaklık tahmini yapmış ve

sonuçları karşılaştırmıştır. Yaptığı çözümlenmelerde regresyon analizine göre yapay sinir ağlarının en yüksek ve en düşük hava sıcaklıklarını tahmin etmede daha iyi netice verdiğini tespit etmiştir [10]. Yapılan çalışmaların genellikle elma, şeftali ve portakal üzerine olduğu görülmektedir. Bu meyvelerin de tahmininin yapılması önem arz etmekle birlikte, limona göre algılama zorlukları farklı olabilmektedir. Limon ağacında yaprak arasında kalıp görünmeyen kısımlar genellikle daha fazla olup, portakalla kıyaslandığında da hacimsel olarak daha küçük olması algılama başarısını azaltmaktadır. Limondaki açık sarı renk algılamayı güçleştiren ışık parlamalarına daha yatkınlık oluşturmaktadır. Bu sebeple limon üzerine yapılacak başarılı bir çalışmanın önemli olduğu açıktır. Benzer çalışmalar yapılsa bile her çalışmadaki görüntüleme yöntem ve teknik farklılıkları, değerlendirme ve işleme yöntemleri, kullanılan yapay ağı modelleri ve eğitim yöntemleri sonucu etkileyebilmektedir. Yapılan bu çalışmada kullanılan yöntemlerle oldukça başarılı sonuçlar alınmakla birlikte, daha sonra denenecek farklı yöntem ve geliştirmelerle sonuçların daha da iyileştirilmesi mümkündür.

2. REKOLTE TAHMİN YÖNTEMİ

Bu çalışmada geliştirilen uygulama ile tarım alanında limon hasadına yönelik yeni bir yaklaşım oluşturma amaçlanmıştır. Meyve yüklü limon ağaçlarından elde edilen sayısal görüntüler bilgisayar ortamına aktarılarak, geliştirilen uygulama ile sayısal görüntüler üzerinde renk filtreleme yapıp, filtrelenen alanının piksel değerleri bulunmaktadır. Elde edilen değerlere göre oluşturulan yapay sinir ağı modeli rekolte tahmininde bulunmaktadır. Böylece günümüzde insan tahminine dayalı rekolte tahmini yerine bilgisayarlı görü ve yapay sinir ağı modeline dayalı bir rekolte tahmini yapılmaktadır. Limon bahçesindeki olgunlaşmış meyve yüklü bir ağaçtan elde edilen sayısal görüntülerden, OpenCv kütüphanesi kullanılarak veriler elde edilmekte, limonlardan elde edilen veriler ile yapay sinir ağı önce danışmanlı öğrenme modeli ile eğitilmektedir. Eğitimi tamamlanan yapay sinir ağı modeli sayısal görüntülerden elde edilen limon verileri ile rekolte tahmininde bulunmaktadır.

RGB kırmızı, yeşil ve mavi ana renklerinin oluşturduğu ve en yaygın kullanılan renk uzayıdır. RGB renk uzayında her renk kırmızı, yeşil ve mavi ana renklerin belirli oranlardaki sayısal bileşiminden oluşmaktadır. RGB renk uzayı ile farklı renk elde edilebilmektedir. RGB uzayında her bir renk 8 bit ile temsil edilir. Üç ana renkten $(2^8)^3=16.777.216$ hesabı ile farklı renk elde edilmektedir.

Yaygın kullanılan diğer bir renk uzayı da HSV'dir. HSV(Hue Saturation Value – Renk Tonu Doyum Değer) renk uzayı, renkleri sırayla renk özü, doygunluk ve parlaklık olarak tanımlar. Renk özü, rengin baskın dalga uzunluğu olarak ifade edilir. Renk özü yeşil, sarı, mavi, kırmızı vb. renkler için 0-100 aralığında değerler alabilir. Doygunluk rengin canlılığını belirler. Doygunluk 0-100 aralığında değerler alabilir, yüksek doygunluk değerleri canlı renkleri oluştururken düşük doygunluk değeri ise gri tonlamalı renkleri oluşturur. Parlaklık rengin aydınlığını ve içindeki beyaz değerini ifade eder. 0-100 aralığında değerler alabilir. Sayısal görüntü, piksellerden oluşan, her biri yoğunluğu için sonlu, farklı oranlarda sayısal gösterime veya gri alanı ile sırasıyla x-ekseni ve y-ekseni üzerinde belirtilen uzamsal koordinatlarla girdi olarak beslenen iki boyutlu işlevlerinden bir çıktı olan gri gösterimi olan görüntüdür [11].

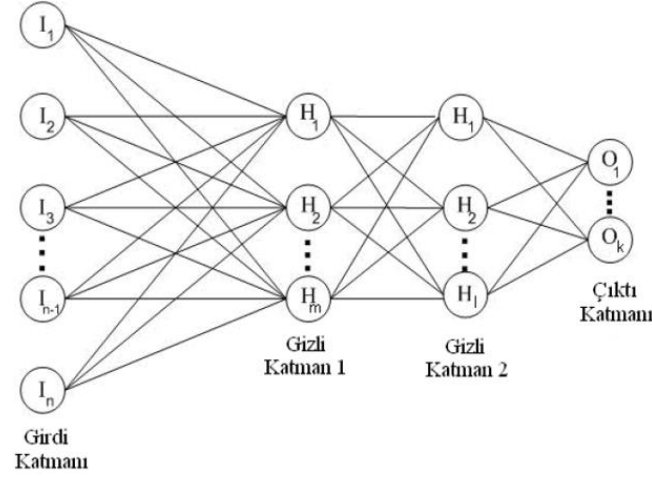
2.1. Görüntü İşleme Teknikleri

Görüntü işleme yöntemi insanların görme sistemi ile görüntüleri algılaması tanımlaması ve değerlendirmesi olayına benzemektedir. Görüntü işleme, sayısal görüntü alıcılar aracılığıyla görüntülerin alınarak bir takım işleme tabi tutulmasının ardından bilgisayarlarca tanımlanması ve istenilen amaca göre görüntünün yorumlanması olarak tanımlanabilir [12, 13]. Gürültü, sayısal görüntülerde oluşan istenmeyen verilerdir, görüntünün bozulmasına ve görüntüdeki detayların kaybolmasına sebep olabilir. Gürültüleri azaltmak için görüntü işleme algoritmalarından faydalanılır [14]. Filtreleme işlemi uzaysal ortamda ve frekans ortamında yapılabilir. Medyan filtreleme en az bulanıklaştırma işlemi ile çok büyük oranda gürültü azaltma amacı taşır [15]. Sayısal görüntünün siyah beyaz olarak tanımlanan ikili (binary) görüntüye çevrilmesi işleme eşikleme yöntemi denir. Görüntüdeki gürültülerin azaltılması ve nesne tespiti gibi amaçlar için kullanılır. Eşikleme, görüntü bölütleme amacıyla kullanılan en önemli yöntemlerdendir. Eşiklemeye ana gaye, görüntüdeki nesnelere görüntü arka planından ayırmaktır. Genel olarak global ve optimal eşikleme teknikleri kullanılır. Nobuyuki Otsu tarafından 1979 yılında geliştirilen Otsu metodu ile eşik değerleri görüntü üstünden hesaplanmaktadır [16]. Otsu kavramı bir dizide (görüntü matrisinde) belirli bir eşik değeri altında olan kısımları 0, üstünde olan kısımları 1 yapmak suretiyle ikili (binary) bir görüntü oluşturmaya denir. Kenar, iki bölge arasındaki sınırda bulunan bir dizi bağlı pikseldir. Bir başka deyişle görüntünün herhangi bir bölümündeki parlaklık oranında meydana gelen keskin değişimdir. Görüntü üzerinde kenar tespiti ile o görüntüdeki nesnelere tespit edilebilir, sayısı çıkartılabilir ve özellikleri belirlenebilir. Kenar belirleme algoritmaları temel anlatımıyla, görüntü üzerindeki piksellerin renk değerlerinin birbirlerinden farklılaşması ile belirlenir. Görüntü işlemede kenar tespiti için çeşitli algoritmalar kullanılmaktadır. Bunlar; Sobel, Canny, Prewitt, Laplacian Zero-Cross vb. gibi kenar bulma algoritmalarıdır.

3. YAPAY SİNİR AĞLARI

Literatürde pek çok çalışmada kullanılan pek çok farklı tipte yapay sinir ağı modelleri vardır. En yaygın kullanılanlardan biri MLP (Multi Layer Perceptron - Çok Katmanlı Perceptron) yapısıdır. MLP giriş, gizli ve çıkış katmanlarına sahiptir ve birbirlerine ileri beslemeli olarak bağlıdır. Giriş katmanı girişi gizli katmandaki

nöronlara dağıtır. Nöronlarda kullanılan değişik aktivasyon fonksiyonları vardır. Nöronlar arasındaki ağırlıklar eğitim sürecinde değişik algoritmalarla istenilen çıkışı almak için ayarlanırlar [17]. Temel bir yapay sinir ağı yapısı Şekil 1’de görülmektedir.



Şekil 1. Yapay sinir ağı katmansal yapısı.

Yapay sinir ağlarının girdi verilerine göre çıkış verisi üretebilmesi için ağı öğrenmesi gerekmektedir. Öğrenme işlemi birkaç yöntem ile gerçekleştirilebilir. Danışmanlı eğitimde ağı öğrenmesi esnasında ağı, eğitim için giriş değerleri ile beraber çıkış değerleri de verilmektedir. Yapay sinir ağı, eğitim için verilen girdi değerleri göre istenen çıkış değerlerini elde edebilmek adına kendi ağırlık değerlerini (weight ve bias) günceller. Ağı elde ettiği sonuçlar ile bilinen sonuçlar arasındaki hata payı hesaplanır ve ağı yeni ağırlık değerleri bu hata payına göre yeniden oluşturulur. Hata payı bulunurken ağı tüm çıktı değerleri ile beklenen çıktı değerleri arasındaki fark hesaplanır ve bu fark ile her nörona düşen hata miktarı hesaplanır. Sonrasında nöronlar kendilerine iletilen ağırlık değerlerini yeniden oluştururlar [18].

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Yöntem

Bilgisayarlı görü teknikleri ile gerçekleştirilen limon ağacı meyve rekoltesi tahmini uygulaması Microsoft Visual Studio Code programında Python dili ile OpenCv kütüphanesi ve Keras kütüphanesi kullanılarak kodlanmıştır. Uygulama ile limon ağaçlarındaki meyveler tespit edilmiş, tespit edilen limonlara ait piksel bilgileri, limonun kapladığı alanın resme oranı gibi veriler kullanılarak modellenen yapay sinir ağı eğitilmiş, uygulamanın limon ağacındaki limonları tespit etmesi ve rekolte tahmininde bulunması sağlanmıştır. Geliştirilen uygulamanın test edilmesi için ağaç üzerindeki limonlara ait görüntüler 2021 yılının şubat ayı içerisinde çekilmiş ve uygulama test edilmiştir. Ayrıca kullanıcının daha rahat kullanımı için bir ara yüz tasarımı da yapılmıştır.

4.2. Bilgisayarlı Görü Teknikleri ile Sayısal Görüntüde Limon Tespiti

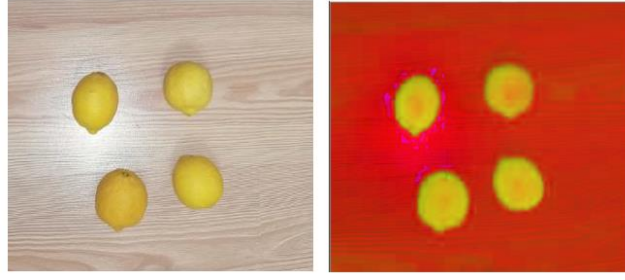
Telefondan alınan görüntüler 3840x5120 piksel boyutlarında (20 mega piksel çözünürlük) olup, görüntü işleme için hız bağlamında yavaşlamaya sebebiyet vermektedir. Yavaşlamanın önlenmesi için resmin boyutları 800x600 piksel olarak küçültülmüştür. Sayısal görüntünün varsayılan renk uzayı RGB’dir. RGB renk uzayı renkleri, ana renklerin sayısal bir karışımı olarak ifade eder. Herhangi bir bilgisayarlı görme uygulamasında belirli renkteki bir nesneyi ayırt etmek istediğimizde HSV renk uzayını kullanmak daha elverişlidir. Çünkü RGB’nin aksine sadece renk tonu (hue) değerini kullanarak ve bu renk tonu değerine eşik değer uygulamak suretiyle renkleri daha net ayırt edebiliriz. Şekil 2’de RGB renk uzayından HSV renk uzayına dönüştürülmüş bir resim görülmektedir.

Uygulamamızda resimdeki limonların tespiti için HSV renk uzayında sarı renge göre filtreleme işlemi yapılmıştır. Bundan dolayı sayısal görüntü RGB renk uzayından HSV renk uzayına çevrilmiştir. Filtreleme için sarı rengin en düşük renk tonu değeri ile en yüksek renk tonu değeri aralık olarak belirlenmiştir. Belirlenen aralıktaki renk tonu değerine göre filtreleme yapıldığında limonlar resim üzerinde tespit edilmiştir.

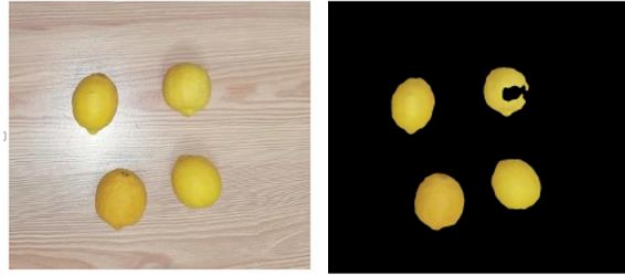
Olgunlaşan limonlar sarı renkte oldukları için uygulamamızda sarı renge göre maskeleyme işlemi gerçekleştirilmektedir. RGB renk uzayından HSV renk uzayına dönüştürülen görüntü, HSV uzayında sarı renge göre belirlenen filtre değerleriyle maskeleyme işlemine tabii tutulmaktadır. Maskeleyme işlemi neticesinde görüntü üzerindeki sarı renk dışında kalan tüm renkler siyah olarak gösterilmektedir. Şekil 3’te sarı renge göre maskelenmiş bir resim görülmektedir.

Gürültü, sayısal görüntülerde oluşan istenmeyen verilerdir, görüntünün bozulmasına ve görüntüdeki detayların kaybolmasına sebep olabilir. Gürültüler, görüntüde benekli bir görünüm oluştururlar. Sayısal görüntüdeki

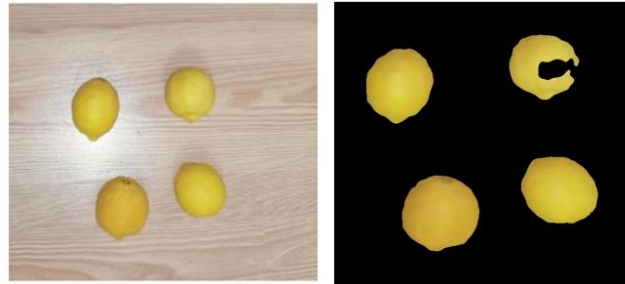
gürültüyü azaltmak için filtreler uygulanmaktadır. Geliştirdiğimiz uygulamada OpenCv kütüphanesinin medyan filtreleme fonksiyonu kullanılmıştır. Medyan filtre uygulanarak gürültüsü azaltılmış ve kenarları daha belirginleştirilmiş görüntü Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 2. RGB renk uzayından HSV renk uzayına çevrilmiş görüntü.

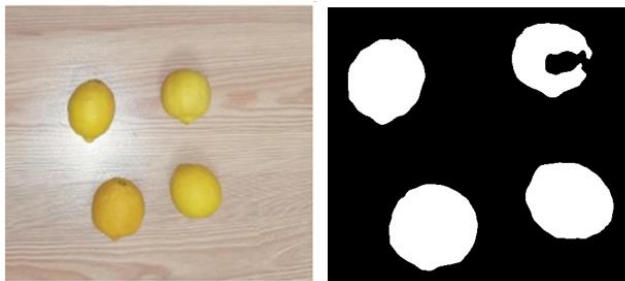


Şekil 3. Maskelenmiş resim.



Şekil 4. Medyan filtre uygulanmış resim.

Sayısal görüntü üzerinde eşikleme işlemi görüntüdeki gürültülerin azaltılması ve nesne tespiti gibi amaçla için kullanılır. Eşiklemenin amacı, görüntüdeki nesnelere görüntü arka planından ayırmaktır. OpenCv kütüphanesi içerisinde yer alan Otsu tarafından geliştirilen threshold fonksiyonu bu işlemi yapmaktadır. Şekil 5'de otsu eşikleme uygulanmış bir resim görülmektedir.



Şekil 5. Otsu eşikleme uygulanmış resim.

Renk uzayı dönüşümü yapılan, maske uygulanan, filtreleme ve otsu eşikleme işleminden geçen resim görüntü işleme için uygun hale gelmiş olur. OpenCv'nin findContours fonksiyonu ile resimdeki filtrelenen alanlar tespit edilebilir, alanların piksel bilgilerine ulaşılabilir. Uygulamamızda limonlara ait alanların resim arka planından ayrılması ve bu alanlara ait piksellerin bulunması ile limon tespiti yapılabilmektedir. Her bir limona ait piksel bilgileri ve limonların resmin geneline yüzdesel oran bilgileri yapay sinir ağımızın rekolte tahmini yapabilmeleri için giriş (input) verisi olarak kullanılmaktadır.

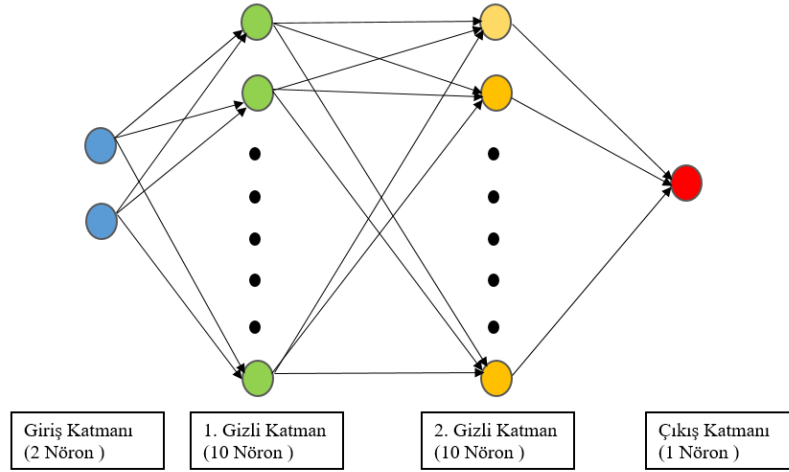
4.3. Yapay Sinir Ağı ile Rekolte Tahmini

Bilgisayarlı görü teknikleri ile elde edilen resim üzerindeki limonlara ait bilgiler yapay sinir ağının giriş verisi olarak kullanılmıştır. Yapay sinir ağının giriş verisi olarak iki adet veri kullanılmakta ve çıkış verisi tek bir tahmin sonucu olacağı için çıkış verisi tek olacak şekilde yapay sinir ağı tasarlanmıştır.

Uygulamamızdaki yapay sinir ağı modeli Python dili ile Keras kütüphanesi kullanılarak kodlanmıştır. Multi Layer Perceptron (MLP) ağ mimarisine sahip ardışık bir ağ tasarlanmıştır. Yapay sinir ağı (YSA) katmanlarda bulunan her bir nöron kendinden sonra gelen katmanlardaki her bir nörona bağlı olacak şekilde tasarlanmıştır.

YSA modelimizde bir adet giriş (input layer) katmanı, iki adet gizli (hidden layer) katman ve bir adet çıkış (output layer) katmanı bulunmaktadır. Giriş katmanında iki adet nöron, görüntüde tespit edilen her bir limonun piksel bilgisi ile limonun pikselinin resmin toplam pikseline oranı bilgisi için giriş sağlamaktadır. Gizli katmanların her birisinde 10'ar adet nöron bulunmaktadır. Buradaki her bir nöron kendinden sonraki her bir nörona bağlantılıdır. Çıkış katmanında ise tek bir tahmin sonucu üretileceği için bir adet nöron vardır. Tasarlanan model Şekil 6'da görülmektedir. YSA modelimizde gizli katmanlarda aktivasyon fonksiyonu olarak sigmoid fonksiyonu, çıkış katmanında relu aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır. Overfitting (ölü nöron) oluşmasını engellemek için Dropout metodundan faydalanılmıştır. Dropout metodu nöronların weight değerlerini 0,2 oranında azaltır ve böylece nöronların weight değerleri sürekli güncellenerek ölü nöronlar oluşmasının önüne geçilir.

Tasarlanan model Keras kütüphanesinin compile metodu ile derlenir. Derleme işlemi loss fonksiyonu, tahmin edilen değer, gerçek değerden ne kadar uzak olduğunu hesaplar. Amacımız bu değeri sıfıra yaklaştırmaktır. Ardından optimizasyon ile model kendini günceller. Modelimizde loss fonksiyonu olarak MSE (Mean Squared Error - Ortalama Kareysel Hata) fonksiyonu kullanılmıştır.

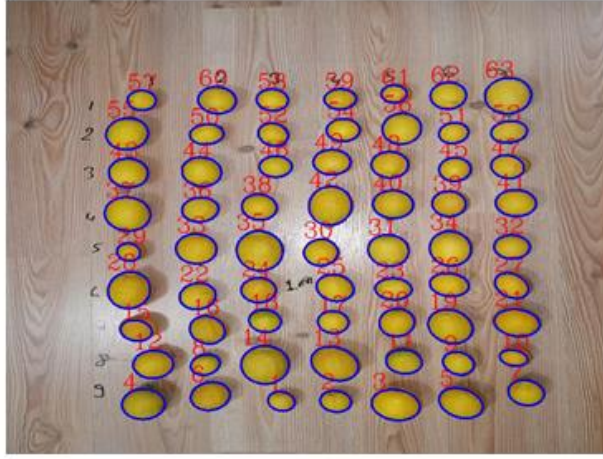


Şekil 6. Uygulama için tasarlanan yapay sinir ağı modeli.

4.4. Yapay Sinir Ağının Eğitilmesi

Uygulamamız için tasarlanan YSA modelimiz danışmanlı öğrenme algoritması ile öğrenmeyi gerçekleştirmektedir. Danışmanlı öğrenmede giriş verilerine göre beklenen bir çıkış verisi sisteme verilmektedir. Sistem bu çıkış verilerine göre weight (ağırlık) ve bias değerlerini MSE'den faydalanarak güncelleyecek ve en yakın sonucu bulana kadar bu işlemi eğitim sayısınca devam ettirecektir. Eğitimde aynı anda 4 veri eğitimi seçeneği (batch_size=4) seçilmiş olup, "adam" algoritmasıyla optimizasyon yapmak suretiyle 10.000 epoch iterasyon yapılmıştır.

Danışmanlı öğrenmenin gerçekleşmesi için ağaçlardan çeşitli büyüklüklerde 63 adet limon kullanılmıştır. Zemine belirli aralıklara yerleştirilen limonlar 0,5 metre, 1 metre, 2 metre, 2,5 metre gibi uzaklıklardan fotoğraflanmıştır. Çeşitli uzaklıklardan elde edilen bu limon resimlerinden, görüntü işleme teknikleri ile her bir limonun resimdeki piksel bilgilerine ve her bir limonun resmin toplam piksel büyüklüğüne oranı bilgisine ulaşılmıştır. Bu bilgiler Python'ın NumPy (Numeric Python) kütüphanesi aracılığı ile matris olarak oluşturulmuştur. Bu matris verisi YSA modelimiz için giriş verisi olarak kullanılmıştır. Resimlerde tespit edilen her bir limon terazi ile tartılmış ve bu veriler yine NumPy kütüphanesi aracılığı ile çıkış verisi olarak kullanılmak üzere matris olarak oluşturulmuştur. Şekil 7'de uygulamamızın eğitim veri seti oluşturulurken resim üzerinde tespit edilmiş limonlar ve bu limonlara ait bilgiler görülmektedir.



Sıra No	Limon Pixel	Limon Yüzde	Ağırlık	Uzaklık
1	688	0.14	54	1m
2	873	0.18	80	1m
3	2008	0.42	250	1m
4	1738	0.36	210	1m
5	1743	0.36	198	1m
6	1497	0.31	148	1m
7	1230	0.26	111	1m
8	766	0.16	64	1m
9	952	0.2	87	1m
10	593	0.12	68	1m
11	1162	0.24	112	1m
12	1511	0.31	159	1m
13	2131	0.44	249	1m
14	2500	0.52	273	1m
15	886	0.18	121	1m
16	1306	0.27	134	1m
17	916	0.19	88	1m
18	981	0.2	89	1m
19	2027	0.42	218	1m
20	1322	0.28	135	1m

Şekil 7. Veri seti oluşturmak için tespit edilen limonlar ve limonların bilgileri.

5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

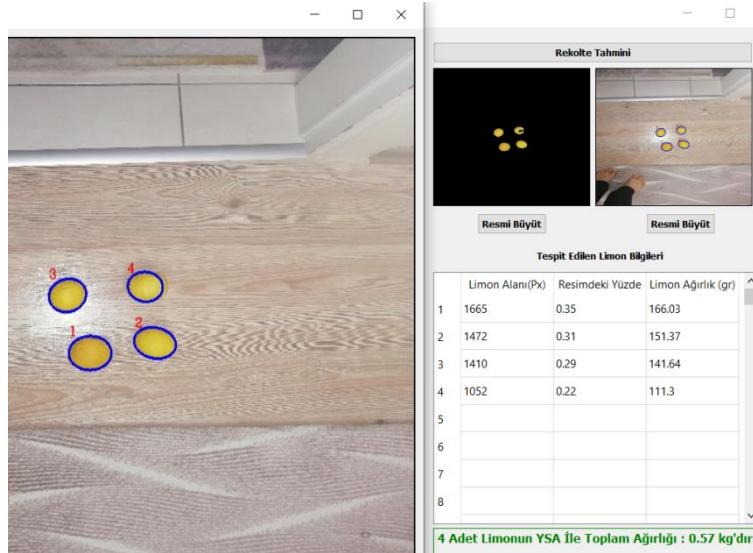
Şekil 8'de görüldüğü gibi bir limon ağacının önden ve arkadan olacak şekilde iki adet resmi çekilmiştir. Resimler bilgisayara aktarılmış ve geliştirilen uygulamada kullanılmıştır. Resim Yükle butonu ile resimler sırasıyla uygulamaya yüklenmiş ve resimlerdeki limonlar önce tespit edilmiş, bilgileri çıkartılmış ve YSA'na giriş verisi olarak verilmiştir. YSA bu bilgiler ışığında rekolte tahmininde bulunmuştur. Ağacın ön tarafından çekilen resimde uygulamamız 65 adet limon tespit etmiş olup 6,9 kg rekolte tahmini yapmıştır. Ağaçtan toplanan limonlar terazi ile tartılmış ve gerçek ağırlığın 9,72 kg olduğu görülmüştür. Tasarlanan model bu resim için %70,99 doğrulukla rekolte tahmini yapmıştır. Ağacın arka tarafından çekilen resimde uygulamamız 46 adet limon tespit etmiş ve 5,76 kg rekolte tahmini yapmıştır. Ağaçtaki limonlar toplanıp tartılmış ve gerçek ağırlık 7,67 kg olarak tespit edilmiştir. Modelimiz burada %75,1 doğrulukla tahmin yapmıştır. Sonuç olarak ağacın ön ve arka tarafından elde edilen resimlerde uygulamamız 12,66 kg rekolte tahmini yapmış olup bu limonların gerçek ağırlığının 17,39 kg olduğu görülmüştür. Tasarladığımız sistem rekolteyi %72,8 oranında doğru tahmin etmiştir. Oranın bu şekilde çıkmasında, resim çekilirken ortamdaki ışık miktarı, büyük kısmı yaprak arkasında kalan limonlar, ışığın yansımından kaynaklı olarak belirlediğimiz sarı renk filtre aralığı dışında renge sahip olan limonlar etkili olmuştur.

Tasarlanan sistem ağaçtan toplanmış ve bir zemine yerleştirilmiş olan limon görüntüleri üzerinde de test edilmiştir. Resimde tespit edilen 4 adet limon için uygulamamız 570 gr ağırlık tahmininde bulunmuştur. Bu durum Şekil 9'da görülmektedir. Limonlar terazi ile tartıldığında gerçek ağırlığın 575 gr olduğu Şekil 10'da gösterildiği gibi görülmüştür. Uygulamamız bu resimdeki limonların ağırlığını % 99,13 oranında doğru tahmin etmiştir.

Limon Alanı (Px)	Resimdeki Yüzde	Limon Ağırlık (gr)
1	0.06	155.61
2	0.05	137.08
3	0.29	144.7
4	0.01	91.89
5	0.01	92.1
6	0.18	85.01
7	0.23	117.58
8	0.06	158.66

46 Adet Limonun YSA İle Toplam Ağırlığı : 5.76 kg'dır.
Görüntü İşleme İle Toplam Ağırlık : 6.67 kg'dır.

Şekil 8. Limon ağacı rekolte tahmini.



Şekil 9. Zemindeki limonlara ait ağırlık tahmini.



Şekil 10. Zemindeki limonların terazi ile tartılması.

6. SONUÇLAR

Limon ağaçlarından resim elde edilirken ortamın ışık miktarı, limonların yaprak arkasında kalıp çok az bir kısmının resimde görünmesi, uygulamamızda yansıyan ışıktan dolayı limonun sarı renk dışında bir renkte algılanıp yok sayılması ağaç üzerindeki limonların tespitini olumsuz etkilemektedir. Ayrıca bazı limonların piksel değerlerinin çok küçük olup YSA tarafından ağırlık tahmininde 0 gr ağırlık olarak tahmin edilmesi de uygulamanın doğruluk oranını düşürmektedir (ortalama %72,8). Ancak çalışma, onlarca farklı ağaç için gerçekleştirilip, yaprak arkasında kalan kısımlar için genel bir düzeltme katsayısı oluşturularak bahçenin tamamı için daha doğru bir sonuç çıkarılabilir.

Ağaçtan bağımsız olarak çekilen limon resimlerinde uygulamamız %99,13 oranında doğru tahminde bulunmuştur. Bu durum tasarladığımız yapay sinir ağının tahmin gücünü göstermektedir. Rekolte tahmininde bulunulacak ağacın resmi elde edilirken ortamdaki güneş ışığı miktarı uygun olup, daha az yapraklı ağaçlar ile daha doğru sonuçlara ulaşılabilir. Resimler daha kaliteli fotoğraf makineleri ile çekilirse resimdeki limon tespiti oranı daha da artabilir. Ayrıca YSA eğitilirken veri seti için kullanılan resimler bizim çektiğimiz uzaklıklar (0,5 metre, 1 metre, 2 metre, 2,5 metre) dışındaki mesafelerden de çekilerek eğitimin kalitesi artırılabilir.

Yazar Katkıları

Her bir yazar da çalışmaya eşit miktarda katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

KAYNAKÇA

[1] Tarım ve Orman Bakanlığı, "Tarım Ürünleri Piyasa Raporu-Limon", Temmuz 2020.

[2] R. Linker, O. Cohen, and A. Naor, "Determination of the number of green apples in RGB images

- recorded in orchards”, Computers and Electronics in Agriculture, vol. 81, pp. 45-57, 2012.
- [3] O. Er, B. Çetişli, M. M. Sofu, ve M. C. Kayacan, “Gerçek zamanlı otomatik elma tasnifleme”, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, vol. 17, no. 2, pp. 31-38, 2013.
- [4] F. Kurtulmuş, “Olgunlaşmamış Şeftali Meyvesini Doğal Bahçe Koşullarında Alınmış Görüntülerde Görüntü İşleme Teknikleri Ve Yapay Sınıflandırıcılarla Saptayarak Sayan Algoritmaların Geliştirilmesi”, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, 2013.
- [5] Ören, S. , “Görüntü İşleme Yöntemi ile Salatalık Kalite Değişiminin Sayısal Analizi”, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 2012.
- [6] G. H. Yaşar, “Görüntü İşleme İle Ağaç Meyve Yükünün Hesaplanması”, Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 2019.
- [7] O. Tosun, “Görüntü İşleme İle Yaprak Alanı Ölçüm Sistemi Tasarımı”, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 2015.
- [8] İ. B. Akıncı, “Gerçek Zamanlı Olarak Meyveleri Görüntü İşleme İle Sınıflandıran Otomasyon Sistemi”, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 2017.
- [9] H. Ergezer, M. Dikmen, ve E. Özdemir, “Yapay Sinir Ağları Ve Tanıma Sistemleri”, Pivolka, vol. 2, no. 6, pp. 14-17, 2003.
- [10] R. Kav, “Meteorolojik Parametrelerden Minimum ve Maksimum Hava Sıcaklığının Regresyon ve Yapay Sinir Ağları Yöntemi ile Tahmini”, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 2019.
- [11] R. C. Gonzales, R. E. Woods, “Digital Image Processing”, 4. Edition, 2018.
- [12] G. Çankaya, M. H. Arslan, ve M. Ceylan, “Görüntü işleme ve yapay sinir ağları yöntemleri ile betonun basınç dayanımının belirlenmesi”, Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 2013.
- [13] B. Jahne, “Practical handbook on image processing for scientific and technical applications”, CRC press, (Chapter 1), 2014.
- [14] C. Küpeli, F. Bulut, “Görüntüdeki Tuz Biber ve Gauss Gürültülerine Karşı Filtrelerin Performans Analizleri”, Haliç Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, vol. 3, no. 2, pp. 211-239, 2020.
- [15] Y. Zhu, C. Huang, “An Improved Median Filtering Algorithm for Image Noise Reduction”, Physics Procedia, vol. 25, pp. 609-616, 2012.
- [16] N Otsu - IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, 1979.
- [17] E. Öztemel, “Yapay Sinir Ağları”, Papatya Yayıncılık Eğitim, İstanbul, 2003.
- [18] M. F. Keskenler, E. F. Keskenler, “Geçmişten Günümüze Yapay Sinir Ağları ve Tarihi”, Takvim-i Vekayi, vol. 5, no. 2, pp. 8-18, 2017.



Predictive Maintenance Based On Machine Learning In Public Transportation Vehicles

Toplu Taşıma Araçlarında Makine Öğrenmesine Dayalı Kestirimci Bakım

¹Özlem GÜVEN , ²Hasan ŞAHİN 

¹Kent Kart Aegean Electronics, System Engineering Department, İzmir, Turkey

²Bursa Technical University, Industrial Engineering Department, Bursa, Turkey

¹ozlemozdemirguven@gmail.com, ²h.sahin@btu.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

ARTICLE INFO

Article history

Received : 25 March 2022

Accepted : 15 April 2022

Keywords:

Maintenance, Predictive Maintenance, Machine Learning, Internet of Things, Smart Public Transportation

ABSTRACT

Predictive maintenance is an approach to prevent failure in a system by estimating the time of failure before a mechanical component fails, so that the maintenance decision can be properly planned. Maintenance forecasting models are used to increase the productivity and efficiency of a hardware. In the public transport sector, whose efficiency is heavily dependent on equipment, forecasting of failures is vital. In this study, predictive maintenance work was carried out in order to minimize the problems such as stopping the voyage, delaying the journey and having an accident caused by unplanned breakdowns in public transport vehicles. Based on instant vehicle health data obtained from IoT sensors, classification techniques were run in machine learning. For maintenance planning, the probability of vehicles being normal and malfunctioning was examined with fuzzy logic and fuzzy outputs were obtained at maintenance speed. As a result of the study, almost all of the faults in the vehicles could be detected with the predictive maintenance approach applied.

© 2022 Bandırma Onyedi Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Science. Published by Dergi Park. All rights reserved.

MAKALE BİLGİSİ

Makale Tarihleri

Gönderim : 25 Mart 2022

Kabul : 15 Nisan 2022

Anahtar Kelimeler:

Bakım, Kestirimci Bakım, Makine Öğrenmesi, Nesnelerin İnterneti, Akıllı Toplu Taşıma Sistemleri

ÖZET

Kestirimci bakım, bir sistemin mekanik bir bileşeninde arıza oluşmadan önce arıza zamanını tahmin ederek bakım kararının doğru planlanabilmesi için arızanın önlenmesini sağlayan bir yaklaşımdır. Bir donanımın üretkenliğini ve verimliliğini artırmak için bakım tahmin modelleri kullanılmaktadır. Verimliliği büyük ölçüde donanıma bağlı olan toplu taşıma sektöründe de, arızaların önceden tahmin edilmesi hayati önem taşır. Bu çalışmada toplu taşıma araçlarında plansız arızalardan kaynaklanan seferin durdurulması, yolculuğun ertelenmesi ve kaza yapılması gibi sorunları en aza indirmek için kestirimci bakım çalışması yapılmıştır. IoT sensörlerinden elde edilen anlık araç sağlığı verilerine dayalı olarak makine öğrenmesinde sınıflandırma teknikleri çalıştırılmıştır. Bakım planlaması için araçların normal ve arızalı olma olasılığı bulanık mantıkla incelenmiş ve bakım hızında bulanık çıktılar elde edilmiştir. Çalışmanın sonucunda, uygulanan kestirimci bakım yaklaşımı ile araçlardaki arızaların neredeyse tümü tespit edilebilmiştir.

© 2022 Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi. Dergi Park tarafından yayımlanmaktadır. Tüm Hakları Saklıdır.

1. INTRODUCTION

Maintenance is any corrective and preventive action to prevent any part of a system from failing or completely stopping the system from working. Predictive maintenance, on the other hand, minimizes the number and cost of unplanned outages caused by machine failures at the maximum interval between repairs by regularly monitoring the true mechanical health, operating efficiency, and other indicators of operating condition of any part of a machine or system [1]. Predictive maintenance works based on fault prediction. Such predictive technologies integrate intelligent algorithms with electronics and disconnected intelligence even more as more software and embedded intelligence are integrated into industrial products and systems. These technologies can also be used to predict performance degradation of a system or machine and to independently manage and optimize the needs of that system or machine [2]. Especially in hardware-dependent systems, using a predictive and intelligent maintenance strategy has advantages over maintenance strategies that are determined to be repaired when it breaks down or to maintain at standard specified periods. In order to prevent instant undesired breakdowns, delays and stoppages in a hardware-dependent system, a management where maintenance is planned and predicted is often preferred. Diagnostics, performance assessment of failure level, and maintenance forecasting models can be used to achieve near-zero failure performance and increase a company's productivity.

In this study, it is aimed to prevent unplanned breakdowns and increase driving safety in public transportation vehicles by establishing an intelligent, automatic and real-time maintenance forecasting model. As a result of the study, it is expected that the number of unfinished voyages due to breakdowns, voyage delays, disruptions while cruising, and the costs and the amount of labor spent due to malfunctions are expected to decrease. The data source and solution focus of the study is the "Kent Kart" company working on smart transportation systems. Kent Kart provides services in many cities both in the country and abroad with the smart solutions it brings to the public transportation sector and domestic production. Vehicle health data were obtained from a working vehicle in order to prevent negative situations such as disruptions and even stopping of voyages, waiting for passengers, experiencing accidents, loss of property and life due to malfunctions observed in public transportation for many years. By examining the health data of the vehicles taken from the IoT sensors, the data sources that cause the most serious malfunctions are considered as attributes in the study. Defective/healthy data labels were made on the collected data and the tagged data formed the training data set for machine learning. The data set, which generates the values of the same attributes randomly taken at any time, was also used for testing purposes in the application. For the maintenance prediction model of the study, classification methods such as support vector machines, random forest, naive bayes, k-nearest neighbor and logistic regression were created. As the output of these methods, the vehicle is classified as normal/defective, and thus, the system is warned as soon as the vehicle starts to produce data close to the first failure. The warnings made to the system were obtained according to the maintenance probabilities obtained from the normality of the vehicles. Fuzzy decision set is obtained by fuzzing these two variables.

In the first part of the study, predictive maintenance methodology is mentioned. Then, in the method part, classification models and performance measurement criteria used in machine learning and the fuzzy logic model used are defined. In the last section, the application and the results of the application were given and the study was concluded.

2. PREDICTIVE MAINTENANCE

According to the first comprehensive maintenance terminology published, predictive maintenance is a hardware maintenance strategy that relies on measuring the condition of the equipment to assess whether or predictably when it will fail in the future, and then taking appropriate action to avoid the consequences of that failure [3]. This strategy is based on regular monitoring of the data received on the hardware and the performance measurements of the hardware, and parameter optimization on these data. After performance and/or parameter monitoring, the system should plan the next precautionary actions. In this case, as the definitions for predictive maintenance say, the estimation of "Maintenance performed after an estimate derived from analysis and evaluation of key parameters of item condition" becomes the maintenance actions to be taken in subsequent actions. Planning and scheduling predictive maintenance actions can be run automatically or work in interaction with other systems and people. In this case, an advanced or complex condition-based maintenance system for a comprehensive system or hardware can also perform maintenance operations independently [4].

The advantages of predictive maintenance have been compiled in the literature as follows.

- Minimizes uncertain downtime and maintenance cost [5].
- Allows specific control of machines indicating the initiation of a fault [5].
- Increases the availability of industrial facilities [6].
- Both internal and subcontracted maintenance interventions have the capacity to perform quality checks [5].
- Increases factory safety [7].
- It facilitates certification and ensures the verification of the requirements of the ISO 9000 standard [5].
- It provides the best programming of maintenance actions [5].
- Provides efficient scheduling of consumables and personnel [5].

- Production quality is optimized by operating the machine uninterruptedly due to malfunctions [8].
- Provides support during the design phase of equipment, particularly through the application of modal analysis [9].
- Provides direct maintenance costs reduction by checking only defective equipment [10].
- Improves company image by adhering to delivery dates and meeting customers' quality demands [5].
- It reduces spare part and labor costs [11].
- By keeping industrial equipment operational while applying predictive tools, the measurement process does not directly affect equipment availability [5].
- As in-plant security increases, costs associated with insurance policies decrease [5].
- Provides complete historical information on each piece of equipment that helps determine reliability parameters and optimize maintenance planning. This information about machines and equipment is available to management for decision making [12].
- It ensures the reduction of energy consumption [5].

3. METHOD

Statistical (trend, regression, correlation, survival analysis) methods [13], machine learning-based (supervised-classification, unsupervised-clustering, semi-supervised) methods in predictive maintenance approach [14-19] model-based (simulation, mathematical, experimental) methods [20], knowledge and rule-based methods and hybrid methods [18] can establish a care model [21]. In this study, data were collected from vehicles with IoT sensors and a machine learning-based prediction system was established on the collected data. Although IoT-based predictive maintenance studies have become widespread in recent years [14], machine learning-based maintenance prediction studies with an intelligent system for vehicle health in the public transportation sector are relatively new [20]. For this reason, applying this method to the public transport sector provides an innovative contribution to the literature. The focus of the study is to provide a smart maintenance forecasting model with high performance, which can be applied to the literature in smart cities and smart municipality studies, provides fast results by making real-time calculations.

3.1. Classification in Machine Learning

All data in any dataset used for machine learning is represented using the same set of variables. This set of variables can consist of continuous, categorical or binary variables. If the target variable contains labeled data, this type of learning is supervised as opposed to unsupervised learning where the data is not labeled. This learning process is called classification [22]. In the prepared structure, random forest (RF), logistic regression (LR), support vector machines (SVM), naive bayes (NB) and k-nearest neighbor (kNN) supervised classification methods were used to classify IoT sensor data in machine learning.

- Support Vector Machines (SVM): The basis of the method is based on the division of data into optimal classes with the help of a hyperplane. There are many possible linear classifications here that can separate the data. But only one of these classifications maximizes the limit. This linear classifier is called the optimal separation hyperplane. This plane makes optimal discrimination by maximizing the distance between itself and the data point closest to each class [23].
- Random Forest (RF): According to the definition of Breiman [24], a random forest is a combination of tree estimators that depend on the random vector values of each tree in the forest with the same distribution and independent samples. Accordingly, the random forest classification algorithm works with the combination of each tree in the forest. When a new object is to be classified, each tree in the forest votes for a classification result or a class. The forest classifies the new object into the class with the most votes [25].
- Logistic regression (LR): Fits a separating hyperplane that is a linear function of input properties between two conditions or classes. In a given training data set, the goal is to predict the hyperplane that accurately predicts the class label of a new sample and to identify the subset of features that are most informative about class separation [26]. LR is useful for situations where you want to be able to predict the presence or absence of a feature or result based on the values of a set of prediction variables [27].
- Naive Bayes (NB): Naive Bayes (NB) classifier, which is widely used for classification, is provided by Bayes' theorem, which is a simple probability theorem. The classifier obtained using the set of discriminant functions and calculating the corresponding probabilities from the training set is generally called the Naive Bayesian classifier. Because if the "pure" assumption is made that the attributes are independent when considering the class, this classifier can easily be shown as optimal in terms of misclassification rate or minimizing zero-one loss [28].
- K-Nearest Neighbor (kNN): To classify a data record, its nearest neighbors are rearranged, forming a neighborhood of t . Among the neighboring data records, majority voting is often used to decide on the t classification, with or without the distance-based weighting [29]. The KNN rule classifies each unlabeled sample with the majority label among the k nearest neighbors in the training set.

3.2. Performance Measuring in Classification

For performance measures, a confusion matrix was drawn and the results of the matrix were evaluated using the area under the curve (AUC) and accuracy (ACC) metrics. A confusion matrix is a matrix that summarizes the classification performance of a classifier against some test data. For a two-class classification result, it is a two-dimensional matrix [30] indexed in one dimension by the actual class of the data and in the other by the class predicted by the classifier. The confusion matrix is suitable for traditional classification methods where it is assumed that cells at reference locations can be assigned to single classes, and accuracy measures based on the proportion of correctly classified area are then calculated from the correct pixel count [31]. The complexity matrix is plotted as in Table 1 below.

Table 1. Confusion matrix.

	Observed True	Observed False
Predicted True	TP	FP
Predicted False	FN	TN

- True Positive (TP): A case of incorrectly predicting and incorrect data
- False Positive (FP): The state of a data being predicted to be incorrect but not incorrect.
- True Negative (TN): A situation where a data is predicted to be non-erroneous and not erroneous.
- False Negative (FN): A situation where a data is incorrect even though it is predicted not to be incorrect.

The ratio between the number of faulty data correctly classified in the confusion matrix and the total number of samples gives the accuracy measurement. The higher the accuracy value, the better the performance output. It is calculated as follows in (1).

$$ACC = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \tag{1}$$

A two-dimensional graph, called ROC, is drawn on the vertical axis of the true positive rate and the false positive rate on the horizontal axis in the confusion matrix. The area under this curve is called the AUC. The AUC indicates the classifier's ability to prevent misclassification. The larger the area is calculated, the better the performance measurement.

3.3. Fuzzy Logic

Computers reveal certain facts such as "black and white", "true-false", "yes-no" with zero and one sequences, they cannot reason like the human brain can reason under uncertainty or with claims containing value judgments. However, instead of these real judgments, when these are partially correct, people, unlike computers, have common sense in situations where transition values such as "black-gray-white", "warm-warm-cold-freezing" are not clear. Fuzzy logic is a branch of machine intelligence that helps computers paint gray, common-sense pictures of an uncertain world by manipulating ambiguous concepts [32]. Fuzzy logic deals with the formal principles of precise reasoning and approximate reasoning, which limit decisions in situations where it cannot always be decided with certainty. Unlike classical exact logical systems, this method aims to model modes of reasoning that cannot be expressed precisely and play an important role in making rational decisions in an environment of uncertainty [33].

Fuzzy logic is based on fuzzy set operations that can take any degree of membership between 0 and 1. In this fuzzy set, real values are transformed into linguistic terms. The value that determines how much an input value belongs to any term of the transformed linguistic variable is called membership degree in fuzzy logic literature. The functions in which membership degrees are calculated are membership functions. There are different types of membership functions that are frequently used like triangle, trapezoid, Gaussian and sigmoid. In Figure 1, different type of membership representations are exemplified [34].

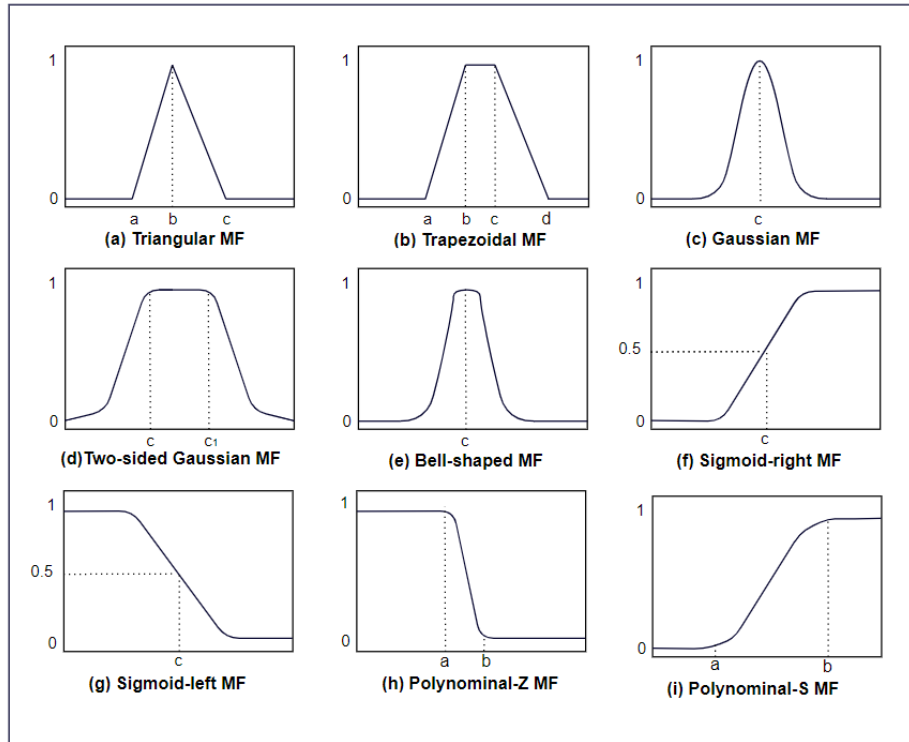


Figure 1. Different types of membership representations.

In this study, triangle type of membership function is used. As can be seen in the (a) chart of the Figure 1, this function has three parameters, a, b and c given by the following expression (2).

$$f(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (2)$$

Basically, in fuzzy logic flow, data input is blurred with membership function. Here real values are transformed into linguistic values. After the membership functions are determined according to the fuzzy set boundaries of the application, the fuzzy rules are defined and the rule-based fuzzy inference step is applied. Here, the rules are explained with “if”, “then” conditions. Then, the clarification process is performed using the membership function. This is the process of converting the fuzzy result obtained as a result of fuzzy inference to the real value. After that, data output is provided.

4. APPLICATION

According to the method map followed, the appropriate features for the telemetry data received from the IoT sensors were selected and separated into test and training data sets. The training dataset was trained in classification algorithms in machine learning and prediction outputs were produced for the unlabeled data in the test dataset. Then, performance measurements and outputs were evaluated on the test data set. Whenever new telemetry data is generated in the system, it is transmitted to the center together with the time of occurrence of this data and the value of the relevant sensor. For this pilot predictive maintenance study, basic independent variables such as engine cooling degree, engine operating speed, engine oil pressure, engine intake manifold pressure, total distance traveled and total fuel consumed level are considered. The dependent variable is the machine status, which consists of the normal (0) label, which indicates that there is no fault in the vehicle, and the faulty (1) labels, indicating that there is a fault. Of the total 138733 data, approximately 92% (127733) are normal labeled data and the remaining 8% (11000) are defective label data. These data were randomly divided into two as 25% (34676) test and 75% (104057) training dataset. Then, the training data was run with the determined classification algorithms and then the predictions in the test data set were evaluated.

Figure 2 shows the confusion matrix according to the random forest classifier. According to the RF algorithm, only 3 of the measurements in the test dataset were labeled with deviation as normal while actually defective.

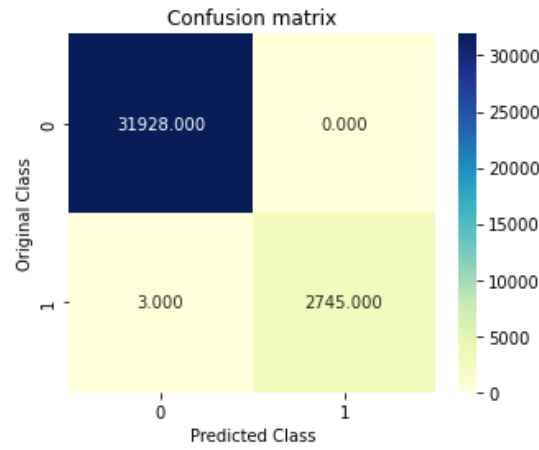


Figure 2. Confusion matrix of random forest classifier.

Figure 3 shows the confusion matrix according to the logistic regression classifier. According to the LR algorithm, a total of 128 of the measurements in the test data set were labeled with deviation as normal while actually defective.

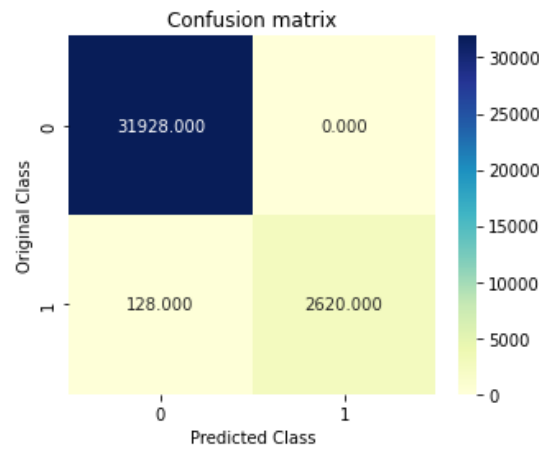


Figure 3. Confusion matrix of logistic regression classifier.

Figure 4 shows the confusion matrix according to the k nearest neighbor classifier. According to the kNN algorithm, only 5 of the measurements in the test data set were deviatedly labeled as normal while actually defective.

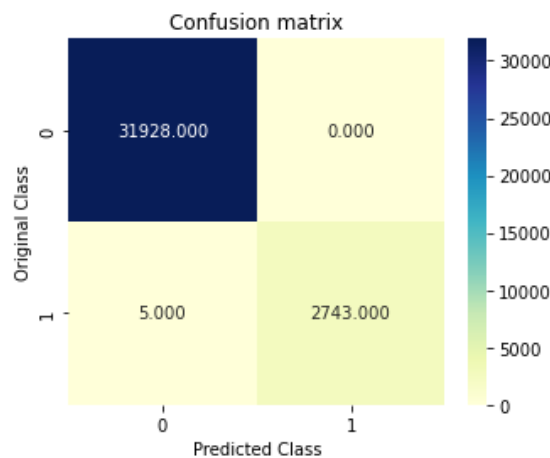


Figure 4. Confusion matrix of k nearest neighbor classifier.

Figure 5 shows the confusion matrix according to the support vector machines classifier. According to the SVM algorithm, 50 of the measurements in the test data set were labeled with deviation as normal while actually defective.

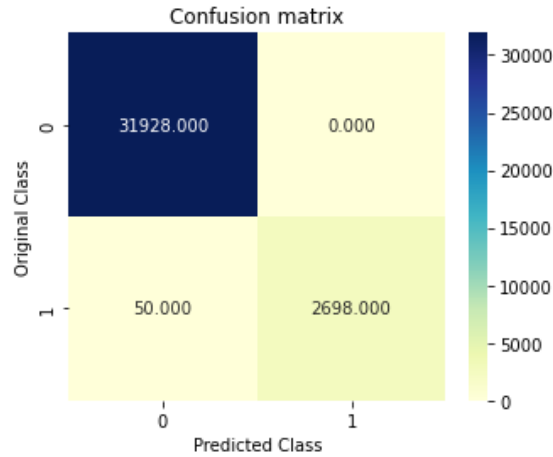


Figure 5. Confusion matrix of support vector machines classifier.

Figure 6 shows the confusion matrix according to the naive bayes classifier. According to the NB algorithm, a total of 137 measurements in the test data set were labeled with deviation. 122 of these deviated labels were estimated as faulty when they were actually normal, and 15 of them were incorrectly estimated as normal when they were actually faulty.

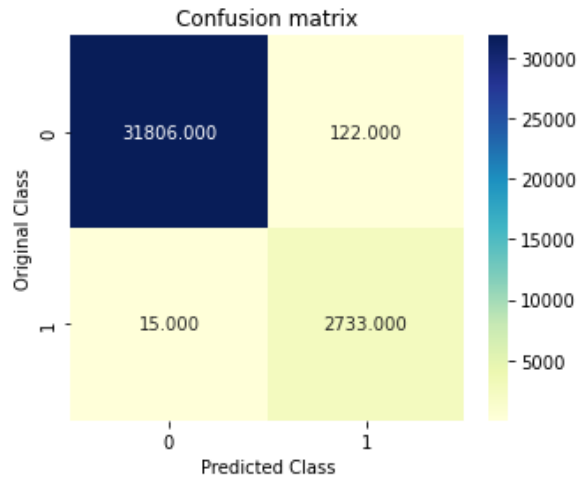


Figure 6. Confusion matrix of naive bayes classifier.

Table 2 compares the AUC and ACC values of all classifiers. When the results of Table 2 were evaluated, it was seen that all classifiers had a prediction success of close to 100%. The best result is the random forest classifier.

Table 2. Classification Performances.

	AUC	ACC
RF	0.99999984	0.99991348
LR	0.99896336	0.99630868
KNN	0.99981788	0.99985580
SVM	0.99994755	0.99855808
NB	0.99695318	0.99604914

The classification weights of the random forest, which is the best performance output of the classification results, were obtained. These weights show the probability that the vehicle is normal or healthy. The opposite values of the weights show the maintenance speed of the vehicle. These two new variables were evaluated with fuzzy logic and it was concluded that the maintenance speed should be done low (long term), medium (medium term) and high (urgent) according to the low, medium and high probability of the vehicles being normal.

The probability of being normal and the rate of care variables were represented by the triangular membership function. Figure 7 and Figure 8 show the triangular membership functions of normality probability and maintenance rates, respectively.

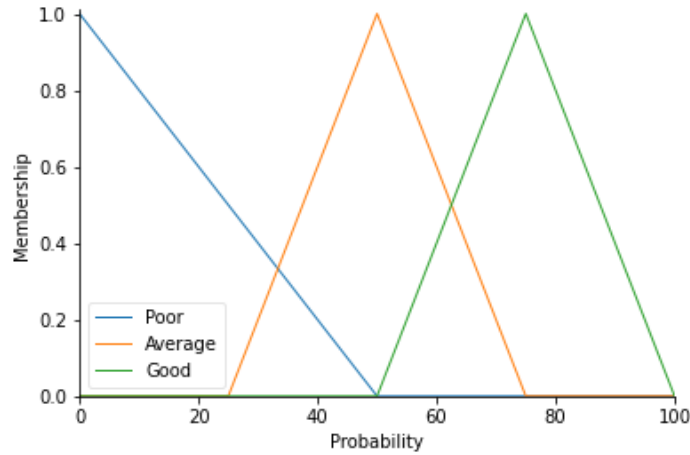


Figure 7. Membership function of probability of being normal.

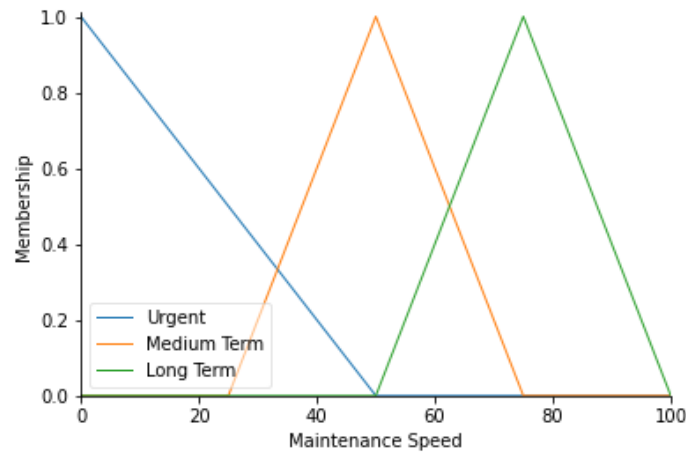


Figure 8. Membership function of maintenance speed.

Both membership functions have the same descriptive parameters. The parameters showing the descriptive points of the triangle membership function of the input and output variables are shown in Table 3.

Table 3. Descriptive Points of Memberships.

Memberships	Descriptive Points
Poor	0 ; 0 ; 50
Average	25 ; 50 ; 75
Good	50 ; 75 ; 100

After the membership functions, the rules of the relevant input and output variables are determined. The fuzzy rules can be expressed as follows.

- Rule 1: If the vehicle is unlikely to be normal, the maintenance speed is high.
- Rule 2: If the vehicle has a moderate probability of being normal, the maintenance speed is moderate.
- Rule 3: If the vehicle is likely to be normal, the maintenance speed is low.

According to these rules, inference was made in fuzzy logic and as a result, the prediction and probability inference made by machine learning were blurred and the estimated maintenance plan was obtained. For example, when the probability of vehicles not being defective is 30%, the example of Figure 9 below was obtained and it was suggested that the maintenance plan triangle function that should be applied should be done with 40% fast and approximately 20% normal maintenance speed. In this case, the medium-term maintenance covering the minimum action plan, namely 20% speed, will be carried out as per the fuzzy logic rule applied. Similarly, when the 90% normality probability is calculated, an alarm is given to the system for the long-term care plan or for the emergency care plan implementation when the 15% normality probability is calculated.

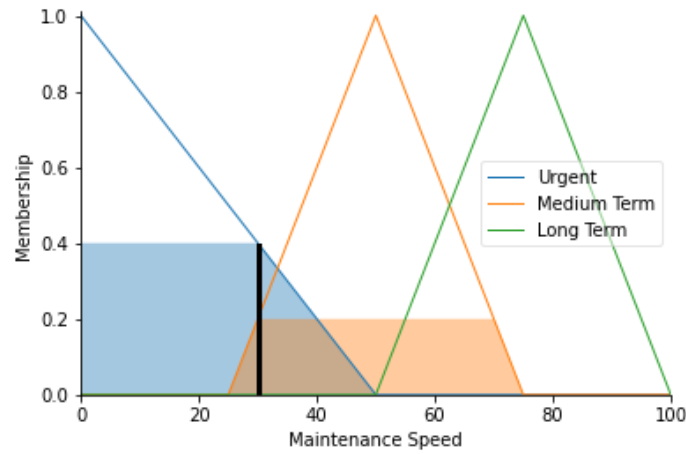


Figure 9. An example for fuzzy decision making.

5. CONCLUSION

The establishment of a predictive maintenance model based on machine learning in public transport has produced near-precise prediction results for the prediction of failures. The error state estimates of all estimators resulted in a negligible margin of error. In the study, the RF estimator, which has the highest result among all classifiers, was used as a result of the final machine learning in the fuzzy decision making step. With the established fuzzy logic model, it is possible to predict the maintenance times with linguistic time outputs. Thus, an application has been developed that will continuously measure the status of vehicles to be used in public transportation vehicles and notify the center of the maintenance time, that is, the remaining useful time of the vehicle. This pilot study showed that the failure prediction model can be used realistically in public transport. With this fault model, as soon as fault information starts to occur, alarms are generated in the system and measures can be taken before the fault causes serious damage. Thus, the study will have administrative effects such as customer satisfaction, prevention of accidents, death and injury, major material damage and increase in reputation. For this reason, practitioners can set up an intelligent estimating model by using this application for both the maintenance forecasts of vehicles in the transportation sector and for similar equipment that can receive instant health data.

In order not to cause loss of information and benefit, the results will be evaluated by making a generalization by establishing an ensemble model on the classifiers used in future studies without eliminating any estimators. In addition, choosing the right size of the data set is a challenging limitation for the study, since the application is based on instant data and instant changes in the health status of the vehicle are vital. For this reason, in future studies, both the data set and feature size will be increased, and the application will be re-evaluated for more vehicles and longer-term datasets, and instant calculation performance will be measured on the server side.

Author Contributions

The authors contributed equally to the study.

Conflict of Interest

The authors of the article declare that there is no conflict of interest between them.

Acknowledge

This study is a preliminary research study supported by TÜBİTAK BİDEB 2210-C program.

REFERENCES

- [1] A. Binding, N. Dykeman, S. Pang, "Machine Learning Predictive Maintenance on Data in the Wild", In 2019 IEEE 5th World Forum on Internet of Things (WF-IoT), 507-512, 2019.
- [2] J. Lee, H. A. Kao, and S. Yang, "Service innovation and smart analytics for industry 4.0 and big data environment", *Procedia Cirp*, vol. 16, pp. 3-8, 2014.
- [3] S. Dunn, "Maintenance terminology-some key terms", *Plant Maintenance Resource Center*, 2002.
- [4] M. Bengtsson, "Condition based maintenance system technology-Where is development heading", *Condition Based Maintenance Systems-An Investigation of Technical Constituents and Organizational Aspects*, vol. 55, 2004.
- [5] M. C. Carnero, "Selection of diagnostic techniques and instrumentation in a predictive maintenance program A case study", *Decision support systems*, vol. 38, no. 4, pp. 539-555, 2005.

- [6] J. W. Weyerhaeuser, "Bearing Failures Dry Up at Weyerhaeuser, Practicing Oil Analysis", J. Fitch, Tulsa, 2000 (March – April).
- [7] A. H. Christer, W. Wang, J. M. Sharp, "A state space condition monitoring model for furnace erosion prediction and replacement", *European Journal of Operational Research*, vol. 101, pp. 1 – 14, 1997.
- [8] M. Lupinucci, J. Perez, G. Davila, and L. Tiseyra, "Improving sheet metal quality and product throughput with Bently's machinery management system", *Orbit*, Bently Nevada, vol. 21, no. 3, pp. 37-41, 2000.
- [9] P. Beltra'n, A. Lo'pez, *El Mantenimiento Predictivo en aerogeneradores. Caso pra'ctico: estudio de averi'as*, Proceedings 4jCongreso Espan'ol de Mantenimiento, AEM, Barcelona, 2000.
- [10] J. M. Villar, L. O. Masson, J. A. Gomes, "Proactive maintenance—a successful history" vol. 21 no. 3, *Orbit*, Bently, NV, 2000.
- [11] V. Kakkar, "Ontario power generation's nanticoke power plant" vol. 20, no. 4, *Orbit*, Bently, NV, 1999.
- [12] F. Barbera, H. Schneider, E. Watson, "A condition based maintenance model for two-unit series system", *European Journal of Operational Research* vol. 116, pp. 281 – 290, 1999.
- [13] M. Carnero, "An evaluation system of the setting up of predictive maintenance programmes", *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 91, no. 8, pp. 945-963, 2006.
- [14] Z. M. Çınar, A. A. Nuhu, Q. Zeeshan, O. Korhan, M. Asmael, B. Safaei, "Machine learning in predictive maintenance towards sustainable smart manufacturing in industry 4.0." *Sustainability*, vol. 12, no. 19, p. 8211, 2020.
- [15] M. Karakose, O. Yaman, "Complex fuzzy system based predictive maintenance approach in railways", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 16, no. 9, pp. 6023-6032, 2020.
- [16] A. Shamayleh, M. Awad, and J. Farhat, "IoT based predictive maintenance management of medical equipment", *Journal of medical systems*, vol. 44, no. 4, pp. 1-12, 2020.
- [17] R. Sipos, D. Fradkin, F. Moerchen, Z. Wang, "Log-based predictive maintenance", In *Proceedings of the 20th ACM SIGKDD international conference on knowledge discovery and data mining*, pp. 1867-1876, 2014.
- [18] E. Traini, G. Bruno, G. D'antonio, F. Lombardi, "Machine learning framework for predictive maintenance in milling", *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 13, pp. 177-182, 2019.
- [19] W. Zhang, D. Yang, H. Wang, "Data-driven methods for predictive maintenance of industrial equipment: A survey", *IEEE Systems Journal*, vol. 13, no. 3, pp. 2213-2227, 2019.
- [20] A. Grall, L. Dieulle, C. Bérenguer, M. Roussignol, "Continuous-time predictive-maintenance scheduling for a deteriorating system", *IEEE transactions on reliability*, vol. 51, no. 2, pp. 141-150, 2002.
- [21] R. K. Mobley, "An introduction to predictive maintenance", Elsevier, 2002.
- [22] S. B. Kotsiantis, I. Zaharakis, and P. Pintelas, "Supervised machine learning: A review of classification techniques", *Emerging artificial intelligence applications in computer engineering*, vol. 160, no. 1, pp. 3-24, 2007.
- [23] S. R. Gunn, "Support vector machines for classification and regression", *ISIS technical report*, vol. 14, no. 1, pp. 5-16, 1998.
- [24] L. Breiman, "Random forests", *Machine learning*, vol. 45, no. 1, pp. 5-32, 2001.
- [25] K. R. Seeja, and M. Zareapoor, "Fraudminer: A novel credit card fraud detection model based on frequent itemset mining", *The Scientific World Journal*, 2014.
- [26] S. Ryali, K. Supekar, D. A. Abrams, and V. Menon, "Sparse logistic regression for whole-brain classification of fMRI data", *NeuroImage*, vol. 51, no. 2, pp. 752-764, 2010.
- [27] I. Kurt, M. Ture, and A. T. Kurum, "Comparing performances of logistic regression, classification and regression tree, and neural networks for predicting coronary artery disease", *Expert systems with applications*, vol. 34, no. 1, pp. 366-374, 2008.
- [28] P. Domingos, and M. Pazzani, "On the optimality of the simple Bayesian classifier under zero-one loss", *Machine learning*, vol. 29, no. 2, pp. 103-130, 1997.
- [29] G. Guo, H. Wang, D. Bell, Y. Bi, and K. Greer, "KNN model-based approach in classification", In *OTM Confederated International Conferences On the Move to Meaningful Internet Systems*, pp. 986-996. Springer, Berlin, Heidelberg. 2003.
- [30] C. Sammut, and G. I. Webb, (Eds.), "Encyclopedia of machine learning", Springer Science & Business Media, 2011.
- [31] H. G. Lewis, and M. Brown, "A generalized confusion matrix for assessing area estimates from remotely sensed data", *International journal of remote sensing*, vol. 22, no. 16, pp. 3223-3235, 2001.
- [32] B. Kosko, and S. Isaka, "Fuzzy logic", *Scientific American*, vol. 269, no. 1, pp. 76-81, 1993.
- [33] L. A. Zadeh, "Fuzzy logic", *Computer*, vol. 21, no. 4, pp. 83-93, 1998.
- [34] J. Zhao, and B. K. Bose, "Evaluation of membership functions for fuzzy logic controlled induction motor drive", In *IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society, IECON 02*, vol. 1, pp. 229-234, 2002.