



e-ISSN: 2149-3367

e-ISSN: 2149-3367

CİLT / VOLUME: XX

SAYI / NUMBER: 6

ARALIK / DECEMBER 2020

FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Ahmet Necdet Sezer Kampüsü
Fen Bilimleri Enstitüsü
AFYONKARAHİSAR
Tel: 444 03 03 / 10702
Belgegeçer: 0 272 228 13 10
E-posta: fmbd@aku.edu.tr

Afyon Kocatepe Üniversitesi FEN ve MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ

Afyon Kocatepe University
Journal of Science and
Engineering



<http://fmbd.aku.edu.tr>

<http://fmbd.aku.edu.tr>

**AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN VE MÜHENDİSLİK
BİLİMLERİ
DERGİSİ**

*Afyon Kocatepe University
Journal of Science and Engineering*

Cilt / Volume 20
Sayı / Number 6

e – ISSN: 2149-3367

ARALIK 2020

DECEMBER 2020

Derginin Amacı ve İÇeriği

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi (AKÜ FEMÜBİD), fen ve mühendislik bilimleri alanlarındaki güncel gelişmeleri takip etmek, meslek kuruluşları ve bireylerin ulusal ve uluslararası gelişmelerine katkıda bulunmak ve bu alanlarda nitelikli bir kaynak oluşturmak amacıyla yayımlanmaktadır.

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, özgün bilimsel araştırmalar ile uygulama çalışmalarına yer veren bir dergidir. Dergide, fen ve mühendislik bilimlerinde yapılmış deneysel ve teorik ilerlemeleri içeren bilimsel ve özgün araştırma makalesi türündeki çalışmalara yer verilir.

Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi; Afyon Kocatepe Üniversitesi tarafından 1999'dan bu yana yılda 2 sayı (Haziran ve Aralık) Türkçe veya İngilizce olarak hazırlanan çalışmaları yayınlanan, bilimsel ve hakemli bir dergidir.

Dergimizde makale değerlendirme sürecinin daha şeffaflaştırılması ve hızlandırılması için Şubat 2013 itibarıyla online makale değerlendirme ve takip sistemi uygulamaya alınmıştır.

Ocak 2015 itibaren dergimiz; yayınlanma süreci ile yazarlara ve gerekse yapılan çalışmalara pratik ulaşma imkânları nedeniyle okuyuculara birçok avantajlar sağlayan; elektronik dergi (e-ISSN: 2149-3367) olarak yılda 3 sayı (Nisan, Ağustos ve Aralık) Türkçe ve İngilizce makaleleri kabul edecek ve çift taraflı kör hakemlik esasına göre en az iki hakemli olarak değerlendirilmektedir. Makale göndermek isteyen yazarlarımız, dergi sayfamızdan (<https://fenbildergi.aku.edu.tr/> yada <https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid>) kayıt yaptırarak, özgün bilimsel makalelerini çevrimiçi olarak gönderebilir ve süreci takip edebilirler. Özellikle lisansüstü tezlerden hazırlanan yayınlar veya bu tezlerin bir alt çalışması olarak yapılan özgün bilimsel çalışmalar teşvik edilmektedir.

Ocak 2020 yılından itibaren dergimiz; yılda 6 sayı (Şubat, Nisan, Haziran, Ağustos, Ekim ve Aralık) olmak üzere özgün araştırma makalelerini kabul etmektedir.

Dergimizde yayımlanan makaleler izin alınmaksızın başka bir yerde yayımlanamaz veya bildiri olarak sunulamaz. Makalelerin bir kısmı veya tamamı dergimiz kaynak gösterilmeden kullanılamaz.

Dergimize hem hakem hem de yazar olarak katkılarınızı beklemekteyiz. Dergimize olan desteğiniz için şimdiden teşekkür eder, çalışmalarınızda başarılar dilerim.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN VE MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ
Afyon Kocatepe University
Journal of Science and Engineering

EDİTÖR / EDITOR-IN-CHIEF

Tamer BAYBURA, Survey Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)
e-mail: tbaybura@aku.edu.tr

ALAN EDİTÖRLERİ / EDITORIAL BOARD

Afife Binnaz HAZAR, Metallurgy and Materials Engineering, Yıldız Teknik University, (Turkey)

e-mail: afife.hazar@gmail.com

Ahmet YILDIZ, Geological Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)

e-mail: ayildiz@aku.edu.tr

Atilla EVCİN, Material Science and Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)

e-mail: evcin@aku.edu.tr

Bojan Zlender, Civil Engineering, University of Maribor, (Slovenia)

e-mail: bojan.zlender@um.si

Cevat İNAL, Survey Engineering, Konya Teknik University, (Turkey)

e-mail: cinal@ktun.edu.tr

Fatih Onur HOCAOĞLU, Electrical Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)

e-mail: fohocaoglu@gmail.com

Hüseyin Ali YALIM, Physics, Afyon Kocatepe University, (Turkey)

e-mail: hayalim@aku.edu.tr

Hüseyin BAYRAKÇEKEN, Automotive Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)

e-mail: bceken@aku.edu.tr

İbrahim EROL, Chemistry, Afyon Kocatepe University, (Turkey)

e-mail: ierol@aku.edu.tr

İsmail Sedat BÜYÜKSAGIŞ, Mining Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)

e-mail: sbsagis@aku.edu.tr

İsmail ZORLUER, Civil Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)

e-mail: izarluer@aku.edu.tr

Meltem DİLEK, Chemical Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)

e-mail: mdilek@aku.edu.tr

Muhittin BAŞER, Mathematics, Afyon Kocatepe University, (Turkey)
e-mail: mbaser@aku.edu.tr

Mustafa YILDIZ, Molecular Biology and Genetics, Afyon Kocatepe University, (Turkey)
e-mail: mustafa_yildizus@yahoo.com

Mustaque Hossain, Civil Engineering, Kansas State University, (USA)
e-mail: mustak@k-state.edu

Ramazan ŞEVİK, Food Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)
e-mail: ramazansevik03@yahoo.com

Regita Bendikiene, Department of Production Technologies, Kaunas University of Technology,
(Lithuania)
e-mail: regita.bendikiene@ktu.lt

Sinan SARAÇLI, Statistics, Afyon Kocatepe University, (Turkey)
e-mail: ssaracli@aku.edu.tr

Şükrü TALAŞ, Metallurgy and Materials Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)
e-mail: stalas@aku.edu.tr

Uçman ERGÜN, Biomedical Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)
e-mail: uergun@aku.edu.tr

Yüksel OĞUZ, Electrical Electronics Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)
e-mail: yukseloguz@aku.edu.tr

ADRES/ADDRESS:

Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Ahmet Necdet Sezer Kampusu, 03200, AFYONKARAHİSAR
Telefon: 0 272 218 1460 - 1465/1467
Belgegeçer: 0 272 228 13 10
e-posta: fmbd@aku.edu.tr

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

FEN BİLİMLERİ / SCIENCE

BİYOLOJİ / BIOLOGY (10)

Araştırma Makalesi / Research Article Eisenia hortensis Sölomositlerinde Bentazone ve Chloridazon Herbisitlerinin Genotoksitesinin Değerlendirilmesi Genotoxic Evaluation of Bentazone and Chloridazon Herbicides in Eisenia hortensis Coelomocytes Sevgi ULUKÜTÜK, İbrahim Hakkı CİĞERCİ	061001 (963-967)
---	-------------------------

MATEMATİK & İSTATİSTİK / MATHEMATICS & STATISTICS (13)

Araştırma Makalesi / Research Article İstatistiksel Epi-Yakınsaklık ile İlgili Temel Özellikler Basic Properties of Statistical Epi-Convergence Şükrü TORTOP	061301 (968-974)
Araştırma Makalesi / Research Article Alfa Kenmotsu Pseudo Metrik Manifoldlar Üzerine On Alpha Kenmotsu Pseudo Metric Manifolds Sermin ÖZTÜRK, Hakan ÖZTÜRK	061302 (975-982)
Araştırma Makalesi / Research Article Skew Hurwitz Polinom Halkası Terslenebilir Olan Halkalar ve Genişlemeleri Rings Over Which Skew Hurwitz Polynomial Rings Are Reversible and Their Extensions Fatma KAYNARCA	061303 (983-990)

MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ / ENGINEERING

ENDÜSTRİ & TEKSTİL/ INDUSTRY & TEXTİLES (53)

Araştırma Makalesi / Research Article Bulanık Mantık ile Sanayii Sektöründe ISO 50001 Enerji Yönetim Sistemi Uygulaması ISO 50001 Energy Management System Application in Industrial Sector with Fuzzy Logic Çetin Önder İNCEKARA	065301 (991-1013)
---	--------------------------

Araştırma Makalesi / Research Article Deprem ve Troposfer İlişkisi: Şili Örneği Relation Between Earthquake and the Troposphere: Chile Example Gökhan GÜRBÜZ, Kübra KOÇYİĞİT	065501 (1014-1023)
Araştırma Makalesi / Research Article Kültürel Mirasın Etkileşimli Keşfi İçin Mobil Artırılmış Gerçeklik ve Web Tabanlı Görselleştirme Teknolojilerinin Kullanılması: Sfenks Heykeli Örneği Using Mobile Augmented Reality and Web-Based Visualization Technologies for Interactive Exploration of Cultural Heritage: The Case of Sphinx Sculpture Ahmet USLU, Murat UYSAL	065502 (1024-1031)
Araştırma Makalesi / Research Article Perakende Market Lokasyonları için CBS Tabanlı Çok Kriterli AHP Yöntemi ile Optimal Yer Seçimi Analizi: İstanbul Örneği Optimal Location Selection for Retail Market Locations with GIS Based Multi Criteria AHP Method: The Case of Istanbul Hasan Can BEYHAN, Gizem EREN, Bahadır AKTUĞ	065503 (1032-1050)

Araştırma Makalesi / Research Article Nano Boyutlu Kalsit ve Uçucu Külün, Harçların Hidratasyonu ve Mikroyapısal Özellikleri Üzerindeki Kombine Etkileri Combined Effects of Nano-Sized Calcite and Fly Ash on Hydration and Microstructural Properties of Mortars Serhat DEMİRHAN	065601 (1051-1067)
Araştırma Makalesi / Research Article Yol Geometrisi Kalitesinin Standart Sapma Yöntemi ve Kalite Endeksleri İle Değerlendirilmesi: Kütahya-Afyonkarahisar Hattı Örneği Evaluation of the Track Geometry Quality with Standard Deviation Method and Quality Indices: Case study of Kütahya-Afyonkarahisar Railway Line Polat YALINIZ, Sezgin İÇA	065602 (1068-1078)

Araştırma Makalesi / Research Article Freeze-drying İşlemi ile Kenevir Lifinden Silika ve Karbon Aerojellerin Sentezi ve Karakterizasyonu Synthesis and Characterization of Silica and Carbon Aerogels from Hemp Fiber via freeze-drying Process Alime ÇITAK	065701 (1079-1084)
--	---------------------------

Araştırma Makalesi / Research Article Kale Havzasındaki (Denizli, GB-Türkiye) Kömür İçeren Mortuma Formasyonunun Mineralojik ve Jeokimyasal Özellikleri Mineralogical and Geochemical Properties of Coal-Bearing Mortuma Formaton in the Kale Basin, (Denizli, SW-Turkey) Duygu ELÇİ, Tülay ALTAY	065801 (1085-1095)
---	---------------------------

Araştırma Makalesi / Research Article Standart k-ε Modeli Temelinde Eksenel Simetrik Sıkıştırılmaz Türbülanslı Akış Isı Transferi için Boyutsuz Ana Denklemlerin Türetilmesi Derivation of Dimensionless Governing Equations for Axisymmetric Incompressible Turbulent Flow Heat Transfer Based on Standard k-ε Model Eyüb CANLI, Ali ATEŞ, Şefik BİLİR	065901 (1096-1111)
Araştırma Makalesi / Research Article Göller Bölgesi İklim Verilerinin Matematiksel Modellenmesi Mathematical Modelling of Lake Region Climate Data Tansel KOYUN, Burakhan DOĞAN	065902 (1112-1123)
Araştırma Makalesi / Research Article Gaz ve Düşük Basıncılı Sementasyon Yapılmış Helisel Dişli Çarkların Yorulma Analizi Fatigue Analysis of Gas and Low-Pressure Carburized Helical Gears Serhan GENÇOĞLU, Aysel YAZICI	065903 (1124-1137)
Araştırma Makalesi / Research Article Elektronik Diferansiyel İçin Farklı Viraj Çaplarındaki Sürtünme Katsayısının Tekerlek Hızlarına Etkisi Effect Of Friction Coefficient Of Different Curve Diameters On Wheel Speeds For Electronic Differential İbrahim YAVUZ, Ali ÖZEK	065904 (1138-1146)

DİSİPLİNLER ARASI / INTER DISCIPLINARY (71)

Araştırma Makalesi / Research Article Yalıtık Sözcüklü bir Türkçe Konuşma Tanıma Sisteminin Yapay Veri Artırımı ile Tasarımı ve Gerçekleştirimi Design and Implementation of an Isolated-word Turkish Speech Recognition System with Data Augmentation İbrahim Baran USLU, Hakan TORA, Emre SÜMER, Mustafa TÜRKER	067101 (1147-1155)
---	---------------------------

MÜHENDİSLİK DİĞER / OTHER ENGINEERING (72)

Araştırma Makalesi / Research Article Perikardial Sıvıdan İzole Edilen Hücrelere Fibroblast Büyüme Faktörü (FGF-2) Etkisinin Analizi Analysis of Fibroblast Growth Factor (FGF-2) Effect on Cells Isolated from Pericardial Fluid Dilek SÖNMEZER, Güler TOPRAK, Ayhan DÜZLER, Fatma LATİFOĞLU	067201 (1156-1164)
Araştırma Makalesi / Research Article Üst Ekstremitte Dış İskelet Robot İçin Giyilebilir Kablosuz MIMU Sensörler Vasıtası İle İnsan Robot Etkileşim Ağı Tasarımı Human Robot Interaction Network Design with Wearable Wireless MIMU Sensors for Upper Extremity Exoskeleton Robot Beyda TAŞAR, Oğuz YAKUT, Sait MÜFTÜ, Şakir Furkan YÖNDEM, Hakan DURMUŞ	067202 (1165-1177)
Araştırma Makalesi / Research Article Uçuş Aşamalarının Bölümlendirilmesi: Havacılık Verilerinde Gözetimsiz Öğrenme Uygulaması Segmentation of Flight Stages: An Unsupervised Learning Model for Aviation Data Oğuz BEKTAŞ	067203 (1178-1186)

AKÜ FEMÜBİD 20 (2020) 061001 (963-967)

AKU J. Sci. Eng. 20 (2020) 061001 (963-967)

DOI: 10.35414/akufemubid.827228

Araştırma Makalesi / Research Article

Genotoxic Evaluation of Bentazone and Chloridazon Herbicides in *Eisenia hortensis* Coelomocytes

Sevgi ULUKÜTÜK¹, İbrahim Hakkı CİĞERCİ^{2*}¹Afyon Kocatepe University, Şuhut Vocational School, 03200, Afyonkarahisar, Turkey²Afyon Kocatepe University, Faculty of Science and Literatures, Molecular Biology and Genetics Department, 03200, Afyonkarahisar, Turkey.Sorumlu yazar e-posta: cigerci@aku.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3626-7730>
sulukutuk@aku.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5760-8493>

Geliş Tarihi: 17.11.2020 Kabul Tarihi: 24.12.2020

Abstract

Keywords
Bentazone;
Chloridazon;
Eisenia hortensis;
Genotoxicity;
Comet assay;
Micronucleus

In current study, genotoxic effects of Bentazone and Chloridazon herbicides on *Eisenia hortensis* species were investigated. The species of *E. hortensis* were collected from the natural habitats in Afyonkarahisar. Comet assay and Micronucleus test was conducted to evaluate the genotoxicity in earthworm coelomocytes. The LD₅₀ value of Bentazone herbicides was noted as 236 ppm and 76.6 ppm for Chloridazon, respectively. Then LD_{50/2}, LD₅₀ and 2XLD₅₀ concentrations of Bentazone and Chloridazon herbicides were applied to *E. hortensis* for 48 h. Concentration dependent increase in DNA and chromosomal damage was observed (P < 0.05) by both herbicides. Highest DNA damage and micronucleus formation were noticed at highest doses compared to other concentrations and control group. It was concluded that Bentazone and Chloridazon induced DNA damage and chromosomal aberrations failure in *E. hortensis* earthworms.

Eisenia hortensis Sölomositlerinde Bentazone ve Chloridazon Herbisitlerinin Genotoksitesinin Değerlendirilmesi

Öz

Anahtar kelimeler
Bentazon;
Chloridazon;
Eisenia hortensis;
Genotoksosite;
Comet yöntemi,
Mikronukleus

Bu çalışmada, Bentazone ve Chloridazon herbisitlerinin *Eisenia hortensis* türleri üzerindeki genotoksik etkileri araştırılmıştır. *E. hortensis* türleri Afyonkarahisar'daki doğal yaşam alanlarından toplanmıştır. Solucan sölomositlerinde genotoksiteyi değerlendirmek için Comet ve Mikronükleus testi yapıldı. Bentazone herbisitlerin LD50 değeri Chloridazon için sırasıyla 236 ppm ve 76.6 ppm olarak kaydedildi. Daha sonra LD_{50/2}, LD₅₀ and 2XLD₅₀ konsantrasyonlarında Bentazon ve Chloridazon herbisitleri *E. hortensis*'e 48 saat süreyle uygulandı. Her iki herbisitte de DNA'da konsantrasyona bağlı artış ve kromozomal hasar gözlemlendi (P < 0.05). En yüksek DNA hasarı ve kromozomal sapmaları, diğer konsantrasyonlara ve kontrol grubuna kıyasla en yüksek dozlarda tespit edildi. Bentazone ve Chloridazon'un *E. hortensis*'te DNA hasarı ve kromozomal sapmalara neden olduğu sonucuna varılmıştır.

©Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Introduction

To enhance the crop production, pesticides and herbicides are aggressively used to overcome the yield of harmful organisms. These are either directly applied on soil or indirectly deposited through residual effects and not only affect target organisms, but they also have some side effects such as human and animal toxicity. Irrespective of the ill effects of these chemicals, it is not possible

for many countries to reduce the use of pesticides and herbicides (Venkateswara Rao and Kavitha 2007, Reinecke and Reinecke 2007).

Chloridazon is a residual pyridazinone herbicide, used for the control of weeds in beet, Mangels, Red beet, Onions, garlic and for other crops (Ahmadi et al. 2011). Bentazone is a contact herbicide, used to control the weeds in corn, mint, rice and beans etc (Lina et al. 2020). Both

herbicides are commonly used in fields. In agricultural research, there is a serious concern on the issue of soil toxicity due to the irrational use of herbicides.

Many researches already stated the use of earthworms as a model organism for ecotoxicological assessment. Earthworms significantly contribute towards the decomposition of the organic matter, soil formation and nutrient cycling. They have sensitive receptors on their dermis to detect soil toxicity due to different chemicals. Pesticides and herbicides impair the physiological functions of earthworms and lead the morbidity or mortality of these organisms. This lead to their ecological importance in term of sensitive bioindicator of soil toxicity risk assessment, as even at low concentrations of toxins can be monitored by these organisms. (Lanno et al. 2004, Xiao et al. 2006, Castellanos and Hernandez 2007, Lukkari et al. 2004, Gambi et al. 2007). The quantity of earthworms in soil shows the overall health quality of soil ecosystem and safety level of environment (Xiao et al. 2004).

Several toxicological assays have been applied to asses toxicities of pesticides and herbicides on earthworms (Lukkari et al. 2004, Cigerci et al. 2016). However, many herbicides show specific effects on specific target organisms, and there is a little information is available of their toxicological effects on earthworms. Ecotoxicological effects of Chloridazon and Bentazone were explored through comet assay (CA) and micronucleus assay (MN) on earthworms in the current study.

2. Materials and Methods

2.1. Earthworms collection and experimental method

E. hortensis samples were collected from the Afyonkarahisar's natural surroundings. Species was identified by the specified key of taxonomic classification. The chemicals, bentazone and chloridazon were obtained from the commercial market in the liquid formulation, containing 480 g of bentazone and 520 g of chloridazon per liter of their formulations. Series of different concentrations (0, 50, 100, 250, 500 and 1000 ppm) of these chemicals were employed on earthworms

for 48 h. Species-designated soil worms with developed sexual organs and clitellum were placed in groups of 8 in 5 aerated petri dishes. At the end of 48 h, the head of the earthworms were touched 5 times with a wooden stick and the viability control was performed. The results were evaluated by Probit analysis method and lethal dose was determined. The three concentrations ($LD_{50/2}$, LD_{50} and $2XLD_{50}$) were selected of chloridazon and bentazone. These doses were further used to assess the DNA and chromosomal damage for 48 h. All experimental procedures were carried out in the dark at 24 ± 2 °C. In control group of earthworms, distilled water was used. Three replicates were made for each group to validate the results.

2.2. Comet assay (CA)

Comet assay was carried out on the coelomic fluid of the earthworms to assess the DNA damage. Each earthworm was kept in eppendorf tube containing the extrusion buffer to extract the coelomic fluid from the earthworms. Comet assay was performed as described by the Reinecke and Reinecke (2004), and Cigerci et al 2016. After, lysis and electrophoresis, slides were stained with ethidium bromide. Comet score was calculated by the method of Cigerci et al 2016.

2.3. Micronucleus (MN) test

Rest of coelomocytes was further used for MN test, as described by the (Muangphra and Gooneratne 2011). Briefly, potassium chloride 1 ml (KCl) added in the fluid, centrifuged at 1400 rpm for 6 min. Then, fixative I (1 ml) was added and centrifuged for 10 min at 1400 rpm. Then, cells were again centrifuged with fixative II (1ml), at 1400 rpm for 10 min The cells were spread over the wet clean slides and dried for 24 h. Slides were stained for 15-20 min with giemsa stain and fixed with entellan.

Scores of micronuclear cells were calculated as described by the Cigerci et al 2016.

2.4. Statistical analysis

Analysis of variance (ANOVA) was applied by using SPSS version 15.0. Duncan test was used for making comparison of different concentration. Statistical significance cut-off value was kept as $p < 0.05$.

3. Results

Effects of chloridazon in the form of DNA damage are shown in fig. 1. The LD₅₀ determined for chloridazon herbicide was found 76.6 ppm. The LD_{50/2}, LD₅₀ and 2XLD₅₀ doses were used for comet assays were 38.3 ppm, 76.6 ppm and 153.2 ppm respectively. Highest DNA damage scores were found at the highest concentrations (53.67 ± 6.66) whereas, lowest was observed in the control group. Concentration dependent increase in DNA damage was observed by the chloridazon and it was found statistically significant ($p < 0.05$).

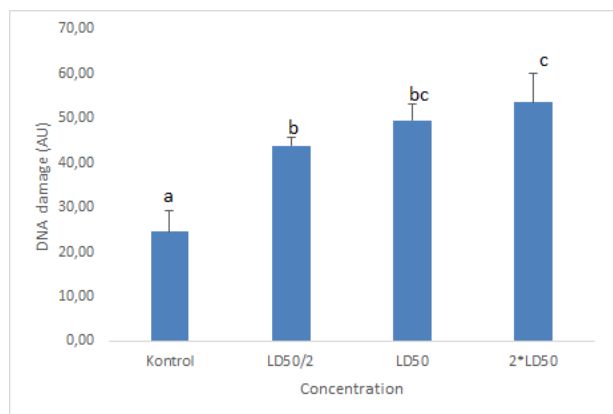


Figure 1. DNA damage caused by the Chloridazon herbicide on *E. hortensis* coelomocytes through comet assay. *The different letters in the columns show significant level at $p < 0.05$.

Similarly, bentazone also showed the dose dependent increase in DNA damage ($p < 0.05$), as shown in Fig 2. The LD₅₀ for Bentazone was found at 236 ppm. The DNA damage score at LD_{50/2}, LD₅₀ and 2XLD₅₀ doses were found 43.67 ± 2.51 , 51.67 ± 3.05 and 55.33 ± 1.52 respectively.

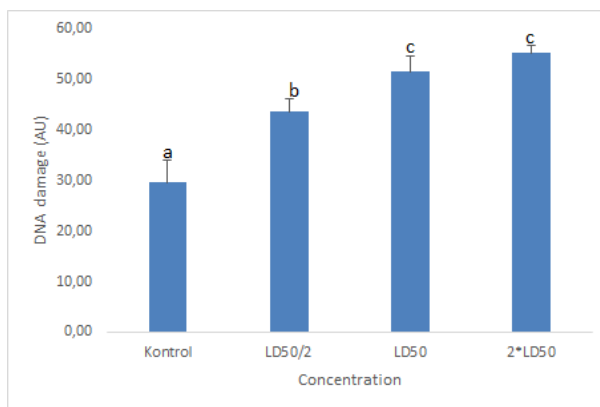


Figure 2. DNA damage caused by the Bentazone herbicide on *E. hortensis* coelomocytes through comet assay. *The different letters in the columns show significant level at $p < 0.05$.

The results of MN are shown in fig 3 and 4. Different concentrations of Chloridazon showed highest chromosomal damage as compared to control group. Highest chromosomal damage was observed at the highest dose whereas, lowest was observed at the lowest concentration. Frequencies of MNi and BN cells were higher in a dose dependent manner and there was significant difference ($p < 0.05$) as compared to control group by the both herbicides.

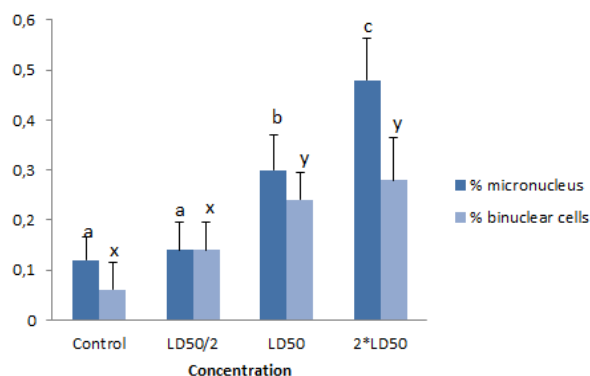


Figure 3. Chromosomal damage caused by the chloridazon herbicide on *E. hortensis* coelomocytes by MN test. *The different letters in the columns show significant level at $p < 0.05$.

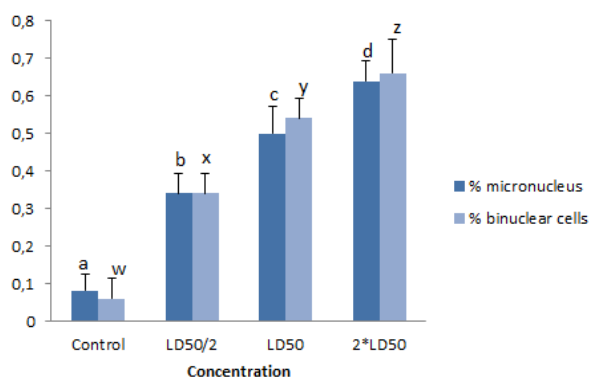


Figure 4. Micronucleus formation caused by the Bentazone herbicide on *E. hortensis* coelomocytes by MN test. *The different letters in the columns show significant level at $p < 0.05$.

4. Discussion

Ecologically, the use of fertilizers and pesticides in agricultural areas is particularly damaging to non-target species due to environmental pollution (Aydin 2006). Many herbicides are being investigated to assess their ecotoxicological effects. But no study has been found to evaluate the genotoxic effects of chloridazon and bentazone by the comet assay and MN test.

Soil worms are particularly used and play an important role in soil ecosystems by improving the physical properties of soil, performing nitrogenation (nitration), helping to form humus, separating and binding organic materials, and ensuring that soil is aerated by the help of tunnels. (Aydin 2006).

In, current study both herbicides showed the genotoxic effects on the earthworm coelomocytes. There was dose dependent increase in the DNA and chromosomal damage by the chloridazon and bentazone.

Bentazone is a member of the thiadiazine group. It is a heterocyclic ring containing nitrogen and sulfur atoms formed as a pair of aromatic rings. It was registered in 1975 and is used as a herbicide after a selective outbreak of weeds, especially with many broad-leaved weeds and cedars. Bentazone showed negative responses to gene mutations in both *in vitro* and *in vivo* systems, chromosome effects, and various tests for primary DNA damage and repair, according to WHO / IPCS and DPR genotoxicity data. Only weak positive responses

have been reported for some clastogenic potential indications in point mutations in Chinese hamster ovary (CHO) cells (HGPRT locus) and in CHO cells with low exposure (Kaya 2004). Dose-related decreases in hemoglobin, hematocrit, and erythrocyte indices in male and female rats were observed by the bentazone along with other low subacute to subchronic toxicity (Brkić et al. 2015). Bentazone also showed the developmental abnormalities against the gold embryo in the time-dependent (Kimmel et al. 1995) and recorded a behavior changes by the goldfish offspring (Saglio et al. 2001).

The chloridazon herbicide showed the DNA damage and MN formation in the coelomocytes. It is thought that chloridazon can interact with DNA through the intercalation mode. In addition, other studies also have been carried out to assess that which base pairs tend to interact with chloridazon. A consistent set of theoretical studies have been shown that using ab initio mechanical quantum to calculate the interaction energies between AT or CG base pairs, chloridazon is tied to the base sequence and that DNA has more interaction with the GC base sequence (Ahmadi 2011).

In current study, both test systems showed the significant results in term of genotoxic assessment of tested chemicals. Comet technique is frequently used in biomonitoring studies because it can even show low level of DNA damage, can be analyzed with fewer cells, can be easily applied, works with different cell and tissue groups, safe and economical (Collins 2003). The micronucleus seen in a cell indicates a numeric or structural genetic damage to that cell. The MN test is a well-known test in human biologic monitoring to detect genotoxicity and detect several nuclear anomalies, micronucleus and binuclear frequencies in coelomocytes, chromosomal defects and inhibition of cytokinesis (Zhan 2012).

An ideal pesticide is defined as "chemical substances that are permanent and devoid of environmental toxicity" that only affect the target organism. Today, however, pesticides pose significant toxicological risks by reaching non-target organisms directly or through residues via soil, water and air. In current study, bentazone and

chloridazon herbicides demonstrated the significant genotoxicity in earthworm coelomocytes. These herbicides are widely used. So, these should be used by the skilled persons and at the appropriate doses to avoid its health hazards effects.

Fundings

This study was supported by AKU-BAP Project No: 15.FEN BİL.44.

5. References

- Ahmadi F., Jamali N., Jahangard-Yekta S., Jafari S., Nouri S., Najafi F. and Rahimi-Nasrabadi M., 2011. The experimental and theoretical QM/MM study of interaction of chloridazon herbicide with ds-DNA. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, **1011**, 1004-1012.
- Aydın H., 2006. Toprak solucanlarının Çevre Toksikolojisi Yönünden Değerlendirilmesi. *İstanbul Üniversitesi Veterinerlik Fakültesi Dergisi*, **32**, 75-79
- Brkic D., Szakonyne-Pasics I., Gasic S., Teodorovic I., Raskovic B., Brkic N. and Neskovic N., 2015. Subacute and subchronic toxicity of Avalonregd mixture (bentazone+dicamba) to rats. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, **13**,1-30.
- Castellanos L.R. and Hernandez T.C.S., 2007. Earthworm biomarkers of pesticide contamination: current status and perspectives. *Journal of Pesticide Science* **32(4)**,360-371
- Charles B. K., William W. B., Seth R.K., Bonnie U., and Thomas F. S., 1995. Stages of Embryonic Development of the Zebrafish. *Developmental Dynamics*,**203**, 253-310
- Çiğerci, İ., Ali, M.M., Yüksek, Ş., Liman, R., 2016. Genotoxicity assessment of cobalt chloride in *Eisenia hortensis* earthworms coelomocytes by comet assay and micronucleus test. *Chemosphere*, **755**, 754-757.
- Collins A., Hartmann A., Agurell E., Beevers C., Brendler-Schwaab S., Burlinson B. and Clay P., 2003. Recommendations for conducting the in vivo alkaline Comet assay. *Mutagenesis*, **18(1)**, 45-51.
- Gambi N., Pasteris A., Fabbri E., 2007. Acetylcholinesterase activity in the earthworm (*Eisenia andrei*) at different conditions of carbaryl exposure. *Comparative Biochemistry & Physiology*, **145 (4)**, 678-685.
- Kaya B., Marcos R., Yanikoğlu A. and Creus A., 2004. Evaluation of the genotoxicity of four herbicides in the wing spot test of *Drosophila melanogaster* using two different strains. *Mutation Research*, **55**, 53-62.
- Lanno R., Wells J., Conder J., Bradham K., Basta N., 2004. The bioavailability of chemicals in soil for earthworms. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* **57 (1)**, 39-47.
- Lina S., Yarong G., Jiao N., Shanning Lou., Fujiang H. 2020. Herbicide Applications Increase Greenhouse Gas Emissions of Alfalfa Pasture in the Inland Arid Region of Northwest China. *PeerJ*. May **25,8**, 9231.
- Lukkari T., Taavitsainen M., Soimasuo M., Oikari A., Haimi J., 2004. Biomarker responses of the earthworm (*Aporrectodea tuberculata*) to copper and zinc exposure: differences between populations with and without earlier metal exposure. *Environ. Pollut.*, **129**, 377-386.
- Reinecke S.A., Reinecke, A.J., 2004. The comet assay as biomarker of heavy metal genotoxicity in earthworms. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* **46**, 208-215.
- Reinecke S.A. and Reinecke A.J., 2007. The impact of organophosphate pesticides in orchards on earthworms in the Western Cape, South Africa. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* **66 (2)**, 244-251.
- Saglio P., Olsen K.H., Bretaud S., 2001. Behavioral and olfactory responses to prochloraz, bentazone, and nicosulfuron contaminated flows in golf fish. *Arch Environ Contam Toxicol*, **41(2)**, 192-200.
- Venkateswara Rao J., Kavitha P., Jakka N.M., Sridhar V., Usman P.K., 2007. Toxicity of organophosphates on morphology and locomotor behavior in brine shrimp (*Artemia salina*). *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* **53**, 227-232.
- Xiao H., Zhou Q.X., Liang J.D., 2004. Single and joint effects of acetochlor and urea on earthworm *Eisenia foelide* populations in phaeozem. *Environmental Geochemistry and Health*, **26**, 277-283.
- Xiao N.W., Jing B.B., Ge F., Liu, X.H., 2006. The fate of herbicide acetochlor and its toxicity to *Eisenia fetida* under laboratory conditions. *Chemosphere*, **62**, 1366-1373.
- Zhan, Y., 2012. Effects of silver nanoparticles on bacteria and earthworms. Master's thesis, Lincoln University, ABD, 129.

AKÜ FEMÜBİD 20 (2020) 061301 (968-974)

AKU J. Sci. Eng. 20 (2020) 061301 (968-974)

DOI: 10.35414/akufemubid.819410

Araştırma Makalesi / Research Article

Basic Properties of Statistical Epi-ConvergenceŞükrü TORTOP^{1*}¹Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Matematik Bölümü, Afyonkarahisar.*Sorumlu yazar e-posta: stortop@aku.edu.tr. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5342-7612>

Geliş Tarihi: 01.11.2020

Kabul Tarihi: 21.12.2020

KeywordsEpi-convergence;
Statistical
Convergence;
Epigraph; Sequence of
Functions**Abstract**

In this paper, we give some basic properties in order to use statistical epi-convergence more efficiently in future studies. Such situations are studied: Uniform statistical convergence of sequence of functions, statistical epi-limit of compound of sequence of functions, statistical epi-limit of the sum of sequence of functions, the property of epi-limit function if the sequence of functions are lower semi-continuous and the convexity of epi-limit function if each function in the sequence is convex.

İstatistiksel Epi-Yakınsaklık ile İlgili Temel Özellikler**Öz**

Anahtar kelimeler
Epi-Yakınsaklık;
İstatistiksel Yakınsaklık;
Epigraf; Fonksiyon
Dizileri

Bu çalışmada, istatistiksel epi-yakınsaklığın sonraki çalışmalarda daha verimli kullanılabilmesi için bazı temel özelliklere yer verildi. Bir fonksiyon dizisinin düzgün istatistiksel yakınsaklık durumu, fonksiyon dizilerinin bileşkesinin istatistiksel epi-limiti, fonksiyon dizilerinin toplamının istatistiksel epi-limiti, fonksiyon dizisinin alttan yarı sürekli olması halinde epi-limit fonksiyonunun özelliği ve fonksiyon dizisindeki her bir fonksiyonun konveks olması halinde epi-limit fonksiyonunun konveksliği gibi durumlar çalışıldı.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Introduction

Wijsman (1964, 1966) studied epi-convergence in 1964 for the first time. Epi-convergence was called infimal convergence at that time. After Wijsman, Mosco (1969) used epi-convergence on variational inequalities, Joly (1973) on topological structures, Salinetti and Wets (1977) on equisemicontinuous convex functions, Attouch (1977) on convex functions, McLinden and Bergstrom (1981) on conservation of epi-convergence on convex functions. Moreover, epi-convergence was called Γ -convergence by Maso (1993). Wets (1980) called it epi-convergence in 1980, firstly. Epi-convergence offers solutions for stochastic optimization problems, variational problems and partial differential equations.

Zygmund (1979) studied statistical convergence in 1935 for the first time. Then it is investigated by other mathematicians including Fast (1951), Steinhaus (1951) and Schoenberg (1959). The

definitions of pointwise and uniform statistical convergence of real-valued functions were given by Gökhan and Güngör (2002, 2005) and by Duman and Orhan (2004) independently. Statistical limit inferior and superior were studied by Fridy and Orhan (1997). Statistical limit points and cluster points were defined by Fridy (1993). Furthermore statistical lower and upper limits of closed sets were defined and characterized by Talo et al. (2016).

2. Preliminaries

In this part, fundamental definitions and theorems will be given. First of all, let (X, d) be a metric space and $f, (f_n)$ are functions defined on X with $n \in \mathbb{N}$. If it is not mentioned explicitly the symbol d stands for the metric on X .

Let $K \subseteq \mathbb{N}$ and if the limit

$$\delta(K) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} |\{k \leq n: k \in K\}|$$

exists then it is called asymptotic density of K . $|\{k \leq n: k \in K\}|$ tells the number of elements of K less than or equal to n (Anastassiou and Duman 2011).

If $\delta(K_1) = \delta(K_2) = 1$ then,

$$\delta(K_1 \cap K_2) = \delta(K_1 \cup K_2) = 1.$$

If $\delta(K_1) = \delta(K_2) = 0$, then,

$$\delta(K_1 \cap K_2) = \delta(K_1 \cup K_2) = 0.$$

Let (x_n) be a sequence of real numbers. If $\forall \varepsilon > 0$, $\exists x_0$ such that

$$\lim_k \frac{1}{k} |\{n \leq k: |x_n - x_0| \geq \varepsilon\}| = 0,$$

then (x_n) is statistically convergent to x_0 .

Let n be a positive integer and $x = (x_n)$ be a sequence of real numbers. Define the sets B_x and A_x as

$$B_x := \{b \in \mathbb{R}: \delta(\{n: x_n > b\}) \neq 0\},$$

$$A_x := \{a \in \mathbb{R}: \delta(\{n: x_n < a\}) \neq 0\}.$$

Then statistical limit inferior and superior of $x = (x_n)$ is given by

$$st - \liminf x := \begin{cases} \inf A_x & \text{if } A_x \neq \emptyset, \\ +\infty & \text{if } A_x = \emptyset \end{cases}$$

$$st - \limsup x := \begin{cases} \sup B_x & \text{if } B_x \neq \emptyset, \\ -\infty & \text{if } B_x = \emptyset. \end{cases}$$

For every $\varepsilon > 0$, a sequence of functions (f_n) is uniformly statistically convergent to f on a set S if,

$$\lim_k \frac{1}{k} |\{n \leq k: |f_n(x) - f(x)| \geq \varepsilon \text{ for all } x \in S\}| = 0.$$

For a sequence of functions $f_n: X \rightarrow \mathbb{R}$, if it is statistically alpha convergent to a function f , then it is uniformly statistically convergent to f (Caserta and Kočinac 2012).

Let $\sigma \in X$ and (x_n) is a sequence. If there exists a set $K = \{n_1 < n_2 < n_3 < \dots\}$ with $\delta(K) \neq 0$

satisfying $x_{n_k} \rightarrow \sigma$ while $k \rightarrow \infty$, then σ is a statistical limit point of (x_n) . Let Λ_x denote the set of all statistical limit points of (x_n) .

Let $\mu \in X$ and (x_n) is a sequence of real numbers. If for any $\varepsilon > 0$, μ is a statistical cluster point of (x_n) , then the following statement holds

$$\delta(\{n \in \mathbb{N}: d(x_n, \mu) < \varepsilon\}) \neq 0.$$

Γ_x will denote the set of all statistical cluster points of (x_n) .

Let $\gamma \in X$ and (x_n) is a sequence of real numbers. If there exists a set $K = \{n_1 < n_2 < n_3 < \dots\}$ satisfying $x_{n_k} \rightarrow \gamma$ while $k \rightarrow \infty$, then γ is a limit point of (x_n) . The set of all limit points of (x_n) will be denoted by L_x .

Obviously we have $\Lambda_x \subseteq \Gamma_x \subseteq L_x$.

Following definitions are statistical inner and outer limits on the concept of set convergence which is fundamental to define statistical epi-limit using sets. In this paper, we deal with Painleve'-Kuratowski (1958) convergence and actually its statistical version will be studied here which is defined by Talo et al. (2016). Now we start with the following collections of subsets of \mathbb{N} .

$$\mathcal{S}^\# := \{N \subset \mathbb{N}: \delta(N) \neq 0\},$$

$$\mathcal{S} := \{N \subset \mathbb{N}: \delta(N) = 1\}.$$

Let (X, d) be a metric space. Statistical outer and inner limit of (A_n) are defined in the following equalities:

$$\begin{aligned} st - \liminf_n A_n &:= \{x | \forall V \in \mathcal{N}(x), \exists N \in \mathcal{S}, \forall n \\ &\quad \in N: A_n \cap V \neq \emptyset\} \\ &= \{x | \exists N \in \mathcal{S}, \forall n \in N, \exists y_n \in A_n: \lim_n y_n = x\}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} st - \limsup_n A_n &:= \{x | \forall V \in \mathcal{N}(x), \exists N \in \mathcal{S}^\#, \forall n \\ &\quad \in N: A_n \cap V \neq \emptyset\} \\ &= \{x | \exists N \in \mathcal{S}^\#, \forall n \in N, \exists y_n \in A_n: x \in \Gamma_y\}. \end{aligned}$$

Let f be a function defined on X , the epigraph of f is the set $epif := \{(x, \alpha) \in X \times \mathbb{R} | \alpha \geq f(x)\}$ and its level set is defined by

$$lev_{\leq \alpha} f := \{x \in X | f(x) \leq \alpha\}.$$

Let $f_n: X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ be a sequence consisting of lower semicontinuous functions and (X, d) a metric space. The lower statistical epi-limit, $e_{st} - \liminf_n f_n$ is defined by the help of the sequence of sets:

$$epi(e_{st} - \liminf_n f_n) = st - \limsup_n (epif_n).$$

Similarly, the upper statistical epi-limit $e_{st} - \limsup_n f_n$ is defined by:

$$epi(e_{st} - \limsup_n f_n) = st - \liminf_n (epif_n).$$

If we have the following equality, it is called statistical epi-convergence:

$$\begin{aligned} f &= st - \lim_n f_n = e_{st} - \limsup_n f_n \\ &= e_{st} - \liminf_n f_n. \end{aligned}$$

Following definition is a sequential characterization of epi-convergence.

For each $x \in X$ the sequence $f_n: X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ is epi-convergent to f , if and only if the following conditions

(i) for all $x_n \in X$ whenever (x_n) is convergent to x , we have $f(x) \leq \liminf_n f_n(x_n)$,

(ii) there exists a sequence (x_n) convergent to x such that $f(x) = \lim_n f_n(x_n)$

both hold.

Let $\mathcal{G}(f)$ be the set of all lower semicontinuous functions denoted by h on X satisfying $h(y) \leq f(y)$ for every $y \in X$. For every function $f: X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$, the lower semicontinuous envelope sc^-f of f is defined by

$$(sc^-f)(x) = \sup_{g \in \mathcal{G}(f)} g(x)$$

for every $x \in X$.

Let $f: X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ be a function. Then

$$(sc^-f)(x) = \sup_{V \in \mathcal{N}(x)} \inf_{y \in V} f(y)$$

for every $x \in X$ where $\mathcal{N}(x)$ is the neighbourhood of x .

More information about epi-convergence and statistical convergence we advise to look at papers in the reference part (Di Maio and Kočinac 2008, Rockafellar and Wets 2009, Šala't 1980).

3. Main Result

Theorem 3.1 *Let $f_n: X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ be a sequence of functions. If (f_n) is uniformly statistically convergent to f , then (f_n) is statistically epi-convergent to sc^-f .*

Proof: Assume that (f_n) is uniformly statistically convergent to f . Then, for every $\varepsilon > 0$, there exists $K \in \mathcal{S}$ such that for all $n \in K$ and for all $y \in X$ we have $|f_n(y) - f(y)| < \varepsilon$. Hence,

$$f(y) - \varepsilon < f_n(y) < f(y) + \varepsilon.$$

Since uniform statistical convergence is independent of y , the following equality is valid for an open set $U \in X$ and all $n \in K$.

$$\inf_{y \in U} f(y) - \varepsilon < \inf_{y \in U} f_n(y) < \inf_{y \in U} f(y) + \varepsilon.$$

Then we have

$$st - \liminf_n \inf_{y \in U} f_n(y) = \inf_{y \in U} f(y),$$

hence for every $x \in X$

$$\sup_{U \in \mathcal{N}(x)} st - \liminf_n \inf_{y \in U} f_n(y) = \sup_{U \in \mathcal{N}(x)} \inf_{y \in U} f(y),$$

which implies that (f_n) is statistically epi-convergent to sc^-f .

In statistical pointwise convergence, ε is dependent on every point $x \in X$ hence it gives us an idea about why statistical pointwise convergence and statistical epi-convergence do not coincide in general.

Remark 3.2 Let each function $f_n: X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ be lower semicontinuous. If (f_n) statistically uniformly converges to f , then f is lower semicontinuous and (f_n) statistically epi-converges to f .

Theorem 3.3 Let $f_n: X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ be a sequence of functions and $g: \overline{\mathbb{R}} \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ be a continuous and increasing function. Then

$$e_{st} - \liminf_n (g \circ f_n) = g \circ (e_{st} - \liminf_n f_n), \quad (1)$$

$$e_{st} - \limsup_n (g \circ f_n) = g \circ (e_{st} - \limsup_n f_n). \quad (2)$$

Proof: As we know, g is a continuous and increasing function, then we have

$$g(\inf S) = \inf g(S) \quad \text{and} \quad g(\sup S) = \sup g(S)$$

for each subset S of $\overline{\mathbb{R}}$. Since

$$(e_{st} - \liminf_n f_n)(x) = \sup_{U \in \mathcal{N}(x)} \sup_{N \in \mathcal{S}} \inf_{n \in N} \inf_{y \in U} f_n(y).$$

Hence the equation can be rewritten as

$$\begin{aligned} & \sup_{U \in \mathcal{N}(x)} \sup_{N \in \mathcal{S}} \inf_{n \in N} \inf_{y \in U} g(f_n(y)) \\ &= g \left(\sup_{U \in \mathcal{N}(x)} \sup_{N \in \mathcal{S}} \inf_{n \in N} \inf_{y \in U} f_n(y) \right). \end{aligned}$$

It gives the proof of (1). The proof of (2) is analogous to the previous one.

Theorem 3.4 If $f_n: X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ and $g_n: X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ be sequences of functions and their sum is well defined, then the following inequalities are valid.

$$e_{st} - \liminf_n (f_n + g_n) \geq e_{st} - \liminf_n f_n + e_{st} - \liminf_n g_n, \quad (3)$$

$$e_{st} - \limsup_n (f_n + g_n) \geq e_{st} - \limsup_n f_n + e_{st} - \limsup_n g_n. \quad (4)$$

Proof: First, we apply some additional restrictions for (f_n) and (g_n) . $\exists \alpha \in \mathbb{R}$ such that $f_n \leq \alpha$ and $g_n \leq \alpha$ on X for every $n \in \mathbb{N}$. In our operations, all

sums have become well defined. Let $U \in \mathcal{N}(x)$ be an open set. For every U ,

$$\inf_{y \in U} (f_n + g_n)(y) \geq \inf_{y \in U} f_n(y) + \inf_{y \in U} g_n(y).$$

Hence, by using properties of statistical upper and lower limits, we get

$$\begin{aligned} & st - \limsup_n \inf_{y \in U} (f_n + g_n)(y) \geq \\ & st - \limsup_n \inf_{y \in U} f_n(y) + st - \liminf_n \inf_{y \in U} g_n(y). \quad (5) \end{aligned}$$

Now fix $x \in X$. If

$$e_{st} - \limsup_n f_n(x) + e_{st} - \liminf_n g_n(x) = -\infty$$

then we are done. Otherwise, for each $\varepsilon > 0$ there exists $V, W \in \mathcal{N}(x)$ such that

$$(e_{st} - \limsup_n f_n)(x) - \varepsilon < st - \limsup_n \inf_{y \in U} f_n(y), \quad (6)$$

$$(e_{st} - \liminf_n g_n)(x) - \varepsilon < st - \liminf_n \inf_{y \in U} g_n(y). \quad (7)$$

Let $U = V \cap W$. Since $U \in \mathcal{N}(x)$ and

$$\inf_{y \in V} f_n(y) \leq \inf_{y \in U} f_n(y), \quad \inf_{y \in W} g_n(y) \leq \inf_{y \in U} g_n(y).$$

By using definition of statistical upper epi-limit, (5), (6) and (7) we obtain

$$\begin{aligned} & \left(e_{st} - \limsup_n (f_n + g_n) \right)(x) \\ & \geq st - \limsup_n \inf_{y \in U} (f_n + g_n)(y) \\ & \geq (e_{st} - \limsup_n f_n)(x) + \\ & \left(e_{st} - \liminf_n g_n \right)(x) - 2\varepsilon. \end{aligned}$$

ε was arbitrary, hence the proof is completed.

Now we deal with the general case. Assume that the sequences (f_n) and (g_n) are not restricted from above. Let us define a function $h_\alpha: \overline{\mathbb{R}} \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ as

$h_a(t) = \min\{t, a\}$ for every $a \in \mathbb{R}$. For every $n \in \mathbb{N}$ we know

$$h_a \circ f_n \leq a \text{ and } h_a \circ g_n \leq a$$

on X from previous part of the proof we get

$$\begin{aligned} & e_{st} - \limsup_n ((h_a \circ f_n) + (h_a \circ g_n)) \\ & \geq e_{st} - \limsup_n (h_a \circ f_n) + e_{st} - \liminf_n (h_a \circ g_n). \end{aligned}$$

Theorem 3.3 implies that

$$\begin{aligned} & e_{st} - \limsup_n (f_n + g_n) \\ & \geq e_{st} - \limsup_n ((h_a \circ f_n) + (h_a \circ g_n)) \\ & \geq h_a \circ (e_{st} - \limsup_n f_n) + h_a \circ (e_{st} - \limsup_n g_n). \end{aligned}$$

When taking $a \rightarrow \infty$, the proof for the case of unboundedness is completed.

Even if (f_n) and (g_n) are statistically epi-convergent, the inequalities (3) and (4) can be strict. This situation can be seen in the following example.

Example 3.5 Let (f_n) and (g_n) be real valued functions defined on \mathbb{R} as,

$$\begin{aligned} f_n(x) &= \begin{cases} -2 & \text{if } n \text{ is even square,} \\ \sin(nx) & \text{if otherwise.} \end{cases} \\ g_n(x) &= \begin{cases} -2 & \text{if } n \text{ is odd square,} \\ -\sin(nx) & \text{if otherwise.} \end{cases} \end{aligned}$$

Then (f_n) and (g_n) are statistically epi-convergent to $h(x) = -1$ while $(f_n + g_n)$ is statistically epi-convergent to $h(x) = 0$.

A sequence $f_n: X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ is statistically α -convergent to f if for every $x \in X$ and every sequence (x_n) in X converging to x , the sequence $f_n(x_n)$ statistically converges to $f(x)$. By Theorem 3.5 by (Caserta and Koćinac 2012), we know statistical α -convergence implies statistical uniform convergence. Also, we proved in Theorem 3.1 that statistical epi-convergence is implied by statistical uniform

convergence. Hence we will use it in the following Corollary.

Corollary 3.6 Assume that $f_n: X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ and $g_n: X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ are sequences of functions. If (g_n) is statistically α -convergent to a function g provided that (g_n) and g are finite, then the following equalities hold.

$$e_{st} - \liminf_n (f_n + g_n) = e_{st} - \liminf_n f_n + g, \tag{8}$$

$$e_{st} - \limsup_n (f_n + g_n) = e_{st} - \limsup_n f_n + g. \tag{9}$$

Proof: We shall prove only (9), the other one being analogous. First of all, we know that if $g_n \xrightarrow{st-\alpha} g$ then g is continuous and $g_n \xrightarrow{st-u} g$. Hence by Theorem 3.1 we have

$$g_n \xrightarrow{e_{st}} g. \tag{10}$$

From now on, we continue by using Theorem 3.4 and we get

$$e_{st} - \liminf_n (f_n + g_n) \geq e_{st} - \liminf_n f_n + g. \tag{11}$$

On the other hand, $(-g_n)$ is statistically epi-convergent to $-g$ in X and by Theorem 3.4 we have

$$\begin{aligned} e_{st} - \limsup_n f_n &= e_{st} - \limsup_n (f_n + g_n - g_n) \\ &\geq e_{st} - \limsup_n (f_n + g_n) - g. \end{aligned}$$

Hence,

$$e_{st} - \liminf_n f_n + g \geq e_{st} - \liminf_n (f_n + g_n). \tag{12}$$

Equality (9) follows from (11) and (12).

Corollary 3.7 Let $f_n: X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ be a sequence of functions. Suppose that $g: X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ is a continuous function. Then the following equalities hold.

$$e_{st} - \liminf_n (f_n + g) = e_{st} - \liminf_n f_n + g,$$

(13)

$$e_{st} - \limsup_n (f_n + g) = e_{st} - \limsup_n f_n + g.$$

(14)

Proof: The sequence (g_n) is statistically alpha convergent to g , since g is a continuous function. Then the result follows by using Corollary 3.6.

Continuity of g is essential in Corollary 3.7, as the following example shows.

Example 3.8 Let (f_n) and g be real valued functions defined on \mathbb{R} as,

$$f_n(x) = \begin{cases} 2nxe^{-2n^2x^2} & \text{if } n \text{ is square,} \\ nxe^{-2n^2x^2} & \text{if otherwise} \end{cases}$$

$$g(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x \neq 0, \\ 0 & \text{if } x = 0. \end{cases}$$

The function g is lower semicontinuous and each of f_n is continuous. (f_n) statistically epi-converges to $-\frac{1}{2}e^{-12}$ while $(f_n + g)$ statistically epi-converges to $1 - \frac{1}{2}e^{-12}$ at the point 0 where g is not continuous.

Corollary 3.9 Let (f_n) and (g_n) be functions from X to $\overline{\mathbb{R}}$. Suppose that (f_n) is statistically epi-convergent and statistically pointwise convergent to f and (g_n) is statistically epi-convergent and statistically pointwise convergent to g . Then $(f_n + g_n)$ is statistically epi-convergent and statistically pointwise convergent to $(f + g)$, provided that the functions $(f_n + g_n)$ and $(f + g)$ are well defined on X .

Proof: By Theorem 3.4 we have

$$\begin{aligned} f + g &= e_{st} - \liminf_n f_n + e_{st} - \liminf_n g_n \\ &\leq e_{st} - \liminf_n (f_n + g_n) \\ &\leq e_{st} - \limsup_n (f_n + g_n) \\ &\leq st - \limsup_n (f_n + g_n) = f + g. \end{aligned}$$

Theorem 3.10 For any sequence (f_n) of convex functions on X , the function $e_{st} - \limsup_n f_n$ is convex.

Proof: Since each f_n is convex function on X , each of $epif_n$ is convex set. Let $x, y \in st - \liminf_n (epif_n)$, then $\exists x_n \in epif_n$ such that $x_n \xrightarrow{st} x$, $\forall n \in N$ with $N \in \mathcal{S}$. Similarly there exists a sequence $y_n \in epif_n$ such that for all $n \in K$ with $K \in \mathcal{S}$, $y_n \xrightarrow{st} y$. Let $W = N \cap K$ that is $\delta(W) = 1$. For arbitrary $\lambda \in [0,1]$, define $z_n^\lambda = (1 - \lambda)x_n + \lambda y_n$ and $z^\lambda = (1 - \lambda)x + \lambda y$, then we have $z_n^\lambda \in epif_n$ and $z_n^\lambda \xrightarrow{st} z^\lambda$ for all $n \in W$, hence $z^\lambda \in st - \liminf_n (epif_n)$ and proves the convexity of this set. Consequently, $e_{st} - \limsup_n f_n$ is convex.

Following example shows that $e_{st} - \liminf_n f_n$ function need not be convex.

Example 3.11 Let $f_n: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ be defined as $f_n = (x + (-1)^n)^2$. Indeed, $f = e_{st} - \liminf_n f_n$ function is

$$f(x) = \begin{cases} (x + 1)^2 & \text{if } x \leq 0, \\ (x - 1)^2 & \text{if } x > 0 \end{cases}$$

which is not convex.

References

- Anastassiou, A. G. and Duman, O., 2011. Towards Intelligent Modeling: Statistical Approximation Theory, vol.14, Berlin.
- Attouch, H., 1977. Convergence de fonctions convexes, de sous-differentiels et semi-groupes. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences de Paris*, **284**, 539-542.
- Caserta, A. and Kočinac, Lj. D. R., 2012. On statistical exhaustiveness. *Applied Mathematics Letters*, **25**, 1447-1451.
- Di Maio, G. and Kočinac, Lj. D. R., 2008. Statistical convergence in topology. *Topology and its Applications*, **156**, 28-45.

- Duman, O. and Orhan, C., 2004. μ -statistically convergent function sequences. *Czechoslovak Mathematical Journal*, **54** (129)(2), 413-422.
- Fast, H., 1951. Sur la convergence statistique. *Colloquium Mathematicum*, **2**, 241-244.
- Fridy, J. A., 1993. Statistical limit points. *Proceedings of the American Mathematical Society*, **118** (4), 1182-1192.
- Fridy, J. A. and Orhan, C., 1997. Statistical limit superior and limit inferior. *Proceedings of the American Mathematical Society*, **125**, 3625-3631.
- Gökhan, A. and Güngör, M., 2002. On pointwise statistical convergence. *Indian Journal of Pure and Applied Mathematics*, **33** (9), 1379-1384.
- Güngör, M. and Gökhan, A., 2005. On uniform statistical convergence. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, **19** (1), 17-24.
- Joly, J.-L., 1973. Une famille de topologies sur l'ensemble des fonctions convexes pour lesquelles la polarité est bicontinue. *Journal de Mathématiques Pures et Appliquées*, **52**, 421-441.
- Kuratowski, C., 1958. Topologie, vol.I, PWN, Warszawa.
- Maso, G. D., 1993. An introduction to Γ -convergence, vol.8, Boston.
- McLinden, L. and Bergstrom, R., 1981. Preservation of convergence of sets and functions in finite dimensions. *Transactions of the American Mathematical Society*, **268**, 127-142.
- Mosco, U., 1969. Convergence of convex sets and of solutions of variational inequalities. *Advances in Mathematics*, **3**, 510-585.
- Niven, I. and Zuckerman, H. S., 1980. An Introduction to the Theory of Numbers, New York.
- Rockafellar, R.T. and Wets, R.J-B., 2009. Variational Analysis, Berlin.
- Šala't, T., 1980. On statistically convergent sequences of real numbers. *Mathematica Slovaca*, **30**, 139-150.
- Salinetti, G. and Wets, R.J-B., 1977. On the relation between two types of convergence for convex functions. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, **60**, 211-226.
- Schoenberg, I.J., 1959. The integrability of certain functions and related summability methods. *American Mathematical Monthly*, **66**, 361-375.
- Steinhaus, H., 1951. Sur la convergence ordinaire et la convergence asymptotique. *Colloquium Mathematicum*, **2**, 73-74.
- Talo, Ö., Sever, Y. and Başar, F., 2016. On statistically convergent sequences of closed sets. *Filomat*, **30** (6), 1497-1509.
- Wets, R.J-B., 1980. Convergence of convex functions, variational inequalities and convex optimization problems, New York.
- Wijsman, R. A., 1964. Convergence of sequences of convex sets, cones and functions. *Bulletin of American Mathematical Society*, **70**, 186-188.
- Wijsman, R. A., 1966. Convergence of sequences of convex sets, cones and functions II. *Transactions of the American Mathematical Society*, **123**, 32-45.
- Zygmund, A., 1979. Trigonometric Series, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Alfa Kenmotsu Pseudo Metrik Manifoldlar Üzerine

Sermin ÖZTÜRK¹, Hakan ÖZTÜRK^{2*}¹Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Matematik Bölümü, Afyonkarahisar.²Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon Meslek Yüksekokulu, Afyonkarahisar.

* Sorumlu Yazar, e-posta: hozturk@aku.edu.tr, ORCID ID: http://orcid.org/0000-0003-1229-3153

ssahin@aku.edu.tr, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-8535-0792

Geliş Tarihi: 01.10.2020

Kabul Tarihi: 07.12.2020

Öz

Anahtar kelimeler

Alfa Kenmotsu manifold; Pseudo metrik; Sabit eğrilik; Kesit eğriliği

Bu makalenin asıl amacı alfa Kenmotsu pseudo metrik manifoldlar üzerinde bazı eğrilik özelliklerini incelemektir. Özellikle bu tür manifoldlar üzerinde lokal simetri, global ϕ -simetri ve lokal ϕ -simetri gibi tensör koşulları bazı ek şartlar altında göz önüne alınmıştır. Ayrıca, η -Einstein ve Einstein manifoldlar için gerek ve yeter koşullar çalışılmıştır. Bundan başka, ξ -kesit ve ϕ -kesit eğrilikleri ile ilgili bazı sonuçlar alfa Kenmotsu pseudo metrik manifoldlar üzerinde verilmiştir. Son olarak, makale alfa Kenmotsu pseudo metrik manifoldlar için açıklayıcı bir örnekle sonlandırılmıştır.

On Alpha Kenmotsu Pseudo Metric Manifolds

Abstract

Keywords

Alpha Kenmotsu manifold; Pseudo metric; Constant curvature; Sectional curvature

The aim of this paper is to investigate some curvature properties on alpha Kenmotsu pseudo metric manifolds. In particular, the tensor conditions such as locally symmetry, globally ϕ -symmetry and locally ϕ -symmetry under some additional conditions on such manifolds are considered. Also, the necessary and sufficient conditions for η -Einstein and Einstein manifolds are studied. Furthermore, some results are related to ξ -sectional and ϕ -sectional curvatures on alpha Kenmotsu pseudo metric manifolds are given. Finally, the paper is concluded with an illustrative example for alpha Kenmotsu pseudo metric manifolds.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Pseudo Riemann metriğine sahip değme metrik manifoldlar üzerinde ilk çalışma Takahashi (1969) ile başlamıştır. Bu çalışmayı takiben birçok yazar bu konu üzerine odaklanmışlar ve özellikle Sasakian manifoldların özel durumlarını çalışmışlardır (Alegre 2011, Calvaruso 2011, Calvaruso *et al.* 2013, Perrone 2014). η bir değme 1-form ve g , η ile birleştirilmiş bir Lorentz metriği olmak üzere, (η, g) değme Lorentz yapısının fizikte özel bir önemi vardır (Duggal 1990). Değme manifoldlar incelenmeye başladıktan sonra hemen hemen değme yarı Riemann manifoldlar üzerinde de sistematik bir çalışma Calvaruso ve Perrone (2010) tarafından ortaya koyulmuştur. Yazarlar değme yapılar üzerinde Riemann ve pseudo Riemann metrikleri arasındaki farklılıkları araştırmışlardır. Genel anlamda sabit kesit eğrilikli değme pseudo

metrik manifoldları sınıflandırmışlardır. Ayrıca, üç boyutlu durum için lokal simetrik değme pseudo metrik ve homojen değme Lorentz manifoldlarını ele almışlardır.

Diğer yandan, Kenmotsu (1972) bazı özel şartları sağlayan değme Riemann manifoldların bir sınıfını tanımlamıştır. Bu tanımlamadan sonra bu tür manifoldlar Kenmotsu manifoldu olarak adlandırılmıştır (Kenmotsu 1972). Hemen hemen alfa Kenmotsu manifoldlar alfa Kenmotsu manifoldların genelleştirilmesinden ibarettir (Öztürk *vd.* 2010, Öztürk 2016).

Son zamanlarda Wang ve Liu (2016) pseudo Riemann metrik ile verilen hemen hemen Kenmotsu manifoldları çalışmışlar ve bu tür manifoldları hemen hemen Kenmotsu pseudo metrik manifoldlar olarak isimlendirmişlerdir.

Bilindiği üzere normal hemen hemen Kenmotsu pseudo metrik manifoldlar Kenmotsu pseudo metrik manifoldlardır. İşte bu çalışmada, alfa Kenmotsu pseudo metrik manifoldlar incelenecektir.

Bu makale aşağıdaki gibi düzenlenmiştir.

İkinci bölümde, alfa Kenmotsu pseudo metrik manifoldlarla ilgili temel ön hazırlık yapılmıştır. Üçüncü bölümde, bu tür manifoldlar için bazı eğrilik özellikleri verilmiştir. Dördüncü bölüm belli bazı şartları sağlayan alfa Kenmotsu manifoldlar üzerindeki temel bulgulardan oluşmaktadır ve açıklayıcı bir örnek sunulmuştur. Son bölüm ise çalışmanın temel amacını yansıtan tartışma ve sonuca ayrılmıştır.

2. Ön Hazırlık

Bu bölümde hemen hemen değme pseudo metrik manifoldlar için bazı genel tanımlar hatırlatılacak ve temel özellikler verilecektir.

$(2n + 1)$ -boyutlu diferensiyellenebilir bir M manifoldu her vektör alanı için,

$$\begin{aligned} \phi^2 X &= -X + \eta(X)\xi, \eta(\xi) = 1 \\ \phi(\xi) &= 0, \eta \circ \phi = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

olacak şekilde M üzerinde $(1,1)$ -tipli bir tensör alanı ϕ , bir vektör alanı ξ ve η , 1-formuna sahipse M manifolduna bir hemen hemen değme manifoldu denir. Burada (1) bağıntısının ilk eşitliği kullanıldığında diğer eşitliklerin aşikar olduğu görülmektedir. Ayrıca, bir hemen hemen değme yapısı için ϕ tensörünün rankı $2n$ dir.

Eğer bir hemen hemen değme manifold

$$g(\phi X, \phi Y) = g(X, Y) - \varepsilon \eta(X)\eta(Y) \quad (2)$$

olacak şekilde bir pseudo Riemann metriği g ile donatılmış ise bu durumda (M, ϕ, ξ, η, g) bir hemen hemen pseudo metrik manifold olarak isimlendirilir. Burada her vektör alanı için $\varepsilon = \mp 1$ dir. O halde, (2) eşitliği $g(\phi X, Y) = -g(X, \phi Y)$ ile birlikte

$$\eta(X) = \varepsilon g(X, \xi) \quad (3)$$

eşitliğine denktir. Özellikle bir hemen hemen değme pseudo metrik manifold üzerinde $g(\xi, \xi) = \varepsilon$ olduğu açıktır. Böylece karakteristik vektör alanı ξ bir birim vektör alanı olmak üzere, ya uzay benzeri ya da zaman benzeridir. Fakat asla ışık benzeri olamaz.

Bir hemen hemen değme pseudo metrik manifold (M, ϕ, ξ, η, g) nin temel 2-formu

$$\Phi(X, Y) = g(X, \phi Y)$$

ile tanımlıdır. Burada $\eta \wedge \Phi^n \neq 0$ dir. Bir hemen hemen değme pseudo metrik manifold $d\eta = \Phi$ şartını sağlıyorsa bir değme pseudo metrik manifold olarak adlandırılır. Burada

$$d\eta = \frac{1}{2}(X(\eta(Y)) - Y(\eta(X)) - \eta([X, Y]))$$

dir. R Riemann eğrilik tensörü

$$R(X, Y) = [\nabla_X, \nabla_Y] - \nabla_{[X, Y]}$$

ile tanımlanır. Ayrıca, Q Ricci operatörü Ricci tensörü yardımıyla

$$S(X, Y) = g(QX, Y)$$

biçiminde tanımlıdır. Bir hemen hemen pseudo metrik (M, ϕ, ξ, η, g) manifoldunun $1 \leq i \leq n$ için her zaman bir özel lokal pseudo ortonormal $\{E_i, \phi E_i, \xi\}$ bazı mevcuttur. Bu baza bir lokal ϕ -bazi denir.

$(2n + 1)$ -boyutlu bir hemen hemen değme pseudo metrik manifold (ϕ, ξ, η) -yapısı ile verilsin. Manifoldu $M \times \mathbb{R}$ olarak düşünelim. Her vektör alanı X için $(X, f \frac{d}{dt})$ yardımıyla $M \times \mathbb{R}$ üzerinde bir vektör alanı belirtelim. Burada t , \mathbb{R} üzerindeki koordinat ve f , $M \times \mathbb{R}$ üzerinde bir diferensiyellenebilir fonksiyondur. O halde, $M \times \mathbb{R}$ üzerinde J hemen hemen kompleks yapısı

$$J\left(X, f \frac{d}{dt}\right) = (\phi X - f\xi, \eta(X) \frac{d}{dt})$$

ile tanımlıdır. Eğer J integrallenebilir ise o zaman hemen hemen değme pseudo metrik (ϕ, ξ, η) -yapısının normal olduğunu söyleyebiliriz. J

kompleks yapısının integrallenebilmesi için gerek ve yeter koşul

$$[\phi, \phi](X, Y) + 2d\eta(X, Y)\xi = 0$$

eşitliğinin sağlamasıdır. Burada $[\phi, \phi]$ Nijenhuis tensör alanı olarak bilinmektedir (Yano and Kon 1984).

Bir hemen hemen Kenmotsu pseudo metrik manifold

$$d\eta = 0, \quad d\Phi = 2(\eta \wedge \Phi)$$

şartlarını sağlayan bir hemen hemen değme pseudo metrik manifolddur. Bir normal hemen hemen Kenmotsu pseudo metrik manifoldu bir Kenmotsu pseudo metrik manifold olarak adlandırılır. (M, ϕ, ξ, η, g) bir hemen hemen değme pseudo metrik manifold olsun. Eğer M üzerinde keyfi vektör alanları ve α reel sayısı, $\alpha \neq 0$ için,

$$d\eta = 0, \quad d\Phi = 2\alpha(\eta \wedge \Phi)$$

eşitlikleri sağlanıyorsa M manifolduna bir hemen hemen alfa Kenmotsu pseudo metrik manifold denir (Kim and Pak 2005). Burada özel olarak alfa sabiti 1 alınırsa manifold hemen hemen Kenmotsu pseudo metrik manifoldda dönüşür (Kenmotsu 1972).

Şimdi, hemen hemen alfa Kenmotsu pseudo metrik manifoldlar ile ilgili aşağıdaki önermeleri verelim. Bu önermeler ilerideki hesaplamalarda kullanılacaktır.

Önerme 2.1 $(2n + 1)$ -boyutlu M manifoldu bir hemen hemen alfa Kenmotsu pseudo metrik manifold olsun. Bu durumda her X, Y vektör alanları için

$$\begin{aligned} & \phi(\nabla_{\phi X}\phi)Y - (\nabla_X\phi)Y \\ &= 2\alpha\eta(Y)\phi X - \varepsilon(g(\alpha\phi X + hX, Y)\xi) \end{aligned} \quad (4)$$

eşitliği sağlanır.

Önerme 2.2 $(2n + 1)$ -boyutlu M manifoldu bir hemen hemen alfa Kenmotsu pseudo metrik manifold olmak üzere, M manifoldunun bir alfa Kenmotsu pseudo metrik manifold olması için gerek ve yeter koşul her X ve Y vektör alanları için

$$(\nabla_X\phi)Y = \alpha[\varepsilon g(\phi X, Y)\xi - \eta(Y)\phi X] \quad (5)$$

eşitiğinin geçerli olmasıdır.

Önerme 2.3 Eğer $(2n + 1)$ -boyutlu M manifoldu bir hemen hemen alfa Kenmotsu pseudo metrik manifold ise o zaman aşağıdaki özellikler sağlanır.

$$\nabla_X\xi = -\alpha\phi^2X \quad (6)$$

$$(\nabla_X\eta)Y = \alpha[\varepsilon g(X, Y) - \eta(X)\eta(Y)] \quad (7)$$

$$(L_\xi g)(X, Y) = -2\alpha(-g(X, Y) + \varepsilon\eta(X)\eta(Y)) \quad (8)$$

$$(L_\xi\eta)X = 0 \quad (9)$$

$$(L_\xi\phi)X = 0 \quad (10)$$

Burada L, M üzerinde tanımlanan Lie türevidir.

3. Eğrilik Özellikleri

Bu bölümde alfa Kenmotsu pseudo metrik manifoldlar üzerinde R Riemann eğrilik tensörü yardımıyla hesaplanan temel eğrilik özelliklerini elde edeceğiz. Bulunan bu özelliklere bulgular bölümünde ihtiyaç duyulacaktır. Verilen tüm eğrilik özellikleri aşağıdaki önermede sunulmuştur.

Önerme 3.1 $(2n + 1)$ -boyutlu M manifoldu bir alfa Kenmotsu pseudo metrik manifold olsun. O halde, M üzerinde keyfi vektör alanları için,

$$R(X, Y)\xi = \alpha^2[\eta(X)Y - \eta(Y)X] \quad (11)$$

$$R(X, \xi)\xi = \alpha^2\phi^2X \quad (12)$$

$$R(X, \xi)\xi - \phi R(\phi X, \xi)\xi = 2\alpha^2\phi^2X \quad (13)$$

$$R(X, \xi)Y = \alpha^2[-\eta(Y)X + \varepsilon g(Y, X)\xi] \quad (14)$$

$$S(X, \xi) = -2n\alpha^2\eta(X) \quad (15)$$

$$Q\xi = -2n\varepsilon\alpha^2\xi \quad (16)$$

$$\begin{aligned} (\nabla_W R)(X, Y, \xi) &= \alpha^3\varepsilon[g(X, W)Y - \\ &g(Y, W)X] - \alpha R(X, Y)W \end{aligned} \quad (17)$$

eşitlikleri geçerlidir.

İspat (6) eşitliği ve R Riemann eğrilik tensörü göz önüne alındığında

$$\begin{aligned} R(X, Y)\xi &= \nabla_X\nabla_Y\xi - \nabla_Y\nabla_X\xi - \nabla_{[X, Y]}\xi \\ &= \nabla_X(-\alpha\phi^2Y) - \nabla_Y(-\alpha\phi^2X) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & +\alpha\phi^2([X, Y]) \\
 & = -\alpha\nabla_X\phi^2Y + \alpha\nabla_Y\phi^2X + \alpha\phi^2[X, Y]
 \end{aligned}$$

bulunur. Yukarıdaki denklemde yer alan kovaryant türev ifadeleri açıldığında

$$\begin{aligned}
 \nabla_X(-\alpha\phi^2Y) &= \alpha\nabla_XY - \alpha\eta(\nabla_XY)\xi - \\
 \alpha^2\varepsilon g(X, Y)\xi - \alpha^2X\eta(Y) \\
 \nabla_Y(-\alpha\phi^2X) &= \alpha\nabla_YX - \alpha\eta(\nabla_YX)\xi - \alpha^2\varepsilon g(Y, X)\xi \\
 & - \alpha^2Y\eta(X)
 \end{aligned}$$

ve

$$\begin{aligned}
 \nabla_{[X, Y]}\xi &= \alpha\nabla_XY - \alpha\nabla_YX \\
 & - \alpha\varepsilon\eta(\nabla_XY)\xi + \alpha\varepsilon\eta(\nabla_YX)\xi
 \end{aligned}$$

yazılır. Bu ifadeler yerine yazılıp, gerekli düzenlemeler yapılırsa (11) eşitliği elde edilir. Burada $\eta(X) = \varepsilon g(\xi, X)$ dır. (11) eşitliğinde Y yerine ξ yazılırsa (12) eşitliğine ulaşılır.

M üzerinde Jakobi operatörü keyfi vektör alanı X için

$$l(X) = R(X, \xi)\xi$$

olmak üzere, $l(X)$ operatörüne sol taraftan ϕ tensörünü uygularsak

$$\phi l(X) = -\alpha^2\phi X$$

bulunur. Yukarıdaki denklemde X yerine ϕX olarak son iki ifade taraf tarafa çıkarılırsa (13) eşitliği elde edilmiş olur. Ayrıca, (11) eşitliğinin her iki tarafının keyfi Z vektör alanına göre iç çarpımı alınır

$$g(R(X, Y)\xi, Z) = \alpha^2[\eta(X)g(Y, Z) - \eta(Y)g(X, Z)]$$

yazılır. Burada R Riemann eğrilik tensörü özelliğinden dolayı

$$g(R(X, Y)\xi, Z) = -g(R(Z, \xi)X, Y)$$

olup

$$R(Z, \xi)X = -\alpha^2\eta(X)Z + \alpha^2 g(X, Z)\xi$$

dır. Bu son denklemde Z yerine X ve X yerine Y vektör alanları seçilirse (14) eşitliğinin ispatı açıktır. Bundan başka, M üzerinde lokal bir pseudo ortonormal ϕ -bazını $1 \leq i \leq n$ için $\{E_i, \phi E_i, \xi\}$

şeklinde alalım. S Ricci eğrilik tensörü ve (3.1) eşitliği yardımıyla

$$\begin{aligned}
 S(X, \xi) &= \sum_{i=1}^{2n+1} \varepsilon_i g(R(E_i, X)\xi, E_i) \\
 &= \sum_{i=1}^n \varepsilon_i g(R(E_i, X)\xi, E_i) \\
 &+ \sum_{i=1}^n \varepsilon_i g(R(\phi E_i, X)\xi, \phi E_i) \\
 &+ \varepsilon_{2n+1} g(R(\xi, X)\xi, \xi)
 \end{aligned}$$

bulunur. Burada $\varepsilon_{2n+1} g(R(\xi, X)\xi, \xi) = 0$ dır. Bu son eşitlik düzenlenirse (15) denklemine ulaşılır. (15) eşitliği yardımıyla Q Ricci operatörünün tanımından

$$Q\xi = \varepsilon S(\xi, Y)\xi$$

yazılır. Böylece (16) eşitliğinin ispatı aşikar olarak görülür. Son olarak, (11) eşitliğinin her iki tarafının keyfi W vektör alanı boyunca kovaryant türevini hesaplırsak

$$\begin{aligned}
 (\nabla_W R)(X, Y, \xi) &= \nabla_W R(X, Y)\xi - R(\nabla_W X, Y)\xi \\
 & - R(X, \nabla_W Y)\xi - R(X, Y)\nabla_W \xi \\
 &= \alpha^2[\eta(\nabla_W X)Y + g(X, \nabla_W \xi)Y + \eta(X)\nabla_W Y \\
 & - \eta(\nabla_W Y)X - g(Y, \nabla_W \xi)X \\
 & - \eta(Y)\nabla_W X] - \alpha^2[\eta(\nabla_W Y) \\
 & - \eta(Y)\nabla_W X] - \alpha^2[\eta(X)\nabla_W Y \\
 & - \eta(\nabla_W Y)X] + \alpha R(X, Y)\phi^2 W
 \end{aligned}$$

elde edilir. Bu son eşitlikle birlikte (6) eşitliği de hesaba katılırsa (17) eşitliği bulunur. Böylece ispat tamamlanmış olur.

4. Bulgular

Bu bölümde alfa Kenmotsu pseudo metrik manifoldlar üzerinde bazı eğrilik özellikleri yardımıyla özellikle sabit ve kesit eğriliklerini kullanarak bazı sonuçlar elde edeceğiz. Öncelikle hesaplamalarda kullanacağımız temel tanımları verelim.

Tanım 4.1 $(2n + 1)$ -boyutlu M manifoldu bir alfa Kenmotsu pseudo metrik manifold olmak üzere, keyfi Y vektör alanı için $K(\xi, Y)$ ve $K(Y, \phi Y)$ ile sembolize edilen Y vektör alanına göre ξ -kesit ve ϕ -kesit eğrilikleri sırasıyla,

$$K(\xi, Y) = \frac{R(\xi, Y, Y, \xi)}{\varepsilon g(Y, Y) - (\eta(Y))^2}$$

ve

$$K(Y, \phi Y) = \frac{R(\phi Y, Y, Y, \phi Y)}{g(Y, Y) [-\varepsilon(\eta(Y))^2 + g(Y, Y)]}$$

şeklinde tanımlıdır.

Eğer $Y \in \text{Çek}\eta$ olarak seçilirse

$$K(\xi, Y) = \frac{R(\xi, Y, Y, \xi)}{\varepsilon g(Y, Y)}$$

ve

$$K(Y, \phi Y) = \frac{R(\phi Y, Y, Y, \phi Y)}{[g(Y, Y)]^2}$$

dir. Burada Y vektör alanı ya uzay benzeri ya da zaman benzeridir (Wang and Liu 2016).

Tanım 4.2 M , bir hemen hemen değme manifold olsun. Her vektör alanı X, Y, Z ve W için

$$\phi^2(\nabla_W R)(X, Y, Z) = 0$$

şartı sağlanıyorsa M global ϕ -simetrik olarak adlandırılır. Eğer vektör alanları $\text{Çek}\eta$ cümlesine ait iseler M ye lokal ϕ -simetrik denir (Yano and Kon 1984).

Tanım 4.3 M , bir $(2n + 1)$ -boyutlu hemen hemen değme pseudo metrik manifold olsun. Her vektör alanı X ve Y için

$$S(X, Y) = \lambda_1 g(X, Y) + \lambda_2 \eta(X)\eta(Y) \quad (18)$$

özelliği geçerli ise M manifolduna η -Einstein denir. Burada λ_1 ve λ_2 düzgün fonksiyonlardır. Özel olarak, $\lambda_2 = 0$ ise manifold Einstein manifolduna dönüşür (Yano and Kon 1984).

Teorem 4.1 M , bir $(2n + 1)$ -boyutlu alfa Kenmotsu pseudo metrik manifold olsun. Eğer M lokal simetrik ise o zaman M manifoldu $-\varepsilon\alpha^2$ sabit eğriliğine sahiptir.

İspat Öncelikle, (17) eşitliğini göz önüne alırsak lokal simetrik özelliğinden dolayı $(\nabla R = 0)$

$$0 = \alpha^3 \varepsilon [g(X, W)Y - g(Y, W)X] - \alpha R(X, Y)W$$

yazılır. Buradan

$$\alpha R(X, Y)W = \alpha^3 \varepsilon [g(X, W)Y - g(Y, W)X]$$

dir. O halde,

$$R(X, Y)W = -\alpha^2 \varepsilon [g(Y, W)X - g(X, W)Y]$$

olup sabit eğrilik tanımından ispat açıktır.

Teorem 4.2 M , bir $(2n + 1)$ -boyutlu alfa Kenmotsu pseudo metrik manifold olsun. Eğer M global ϕ -simetrik ve ε uzay benzeri olarak seçilirse ise o zaman M manifoldu $-\alpha^2$ sabit eğriliğine sahiptir.

İspat Hipotezden dolayı M global ϕ -simetrik olsun. Bu durumda (17) eşitliğinin her iki tarafına soldan iki kez ϕ tensör alanı uygulanırsa

$$0 = \phi^2((\nabla_W R)(X, Y, \xi)) = \alpha^3 \varepsilon [g(X, W)\phi^2 Y - g(Y, W)\phi^2 X] - \alpha \phi^2(R(X, Y)W)$$

elde edilir. Buradan

$$\alpha \phi^2(R(X, Y)W) = \alpha^3 \varepsilon [g(X, W)\phi^2 Y - g(Y, W)\phi^2 X]$$

dir. Bu son eşitlikte (1) eşitliği ve

$$\eta(R(X, Y)W) = \alpha^2 [\eta(Y)g(X, W) - \eta(X)g(Y, W)]$$

denklemleri birlikte düşünülürse

$$0 = -\alpha^3 \varepsilon g(X, W)Y + \alpha^3 \varepsilon g(X, W)\eta(Y)\xi + \alpha^3 \varepsilon g(Y, W)X - \alpha^3 \varepsilon g(Y, W)\eta(X)\xi + \alpha R(X, Y)W - \alpha^3 \eta(Y)g(X, W)\xi + \alpha^3 \eta(X)g(Y, W)\xi$$

bulunur. Burada $g(\xi, \xi) = \varepsilon = +1$ uzay benzeri olarak seçildiğinde

$$-\alpha R(X, Y)W = \alpha^3 [g(Y, W)X - g(X, W)Y]$$

denkleminde ulaşılır ki bu son denklemde manifoldun sabit eğriliğinin $-\alpha^2$ olduğunu gösterir. Böylece ispat tamamlanır.

Teorem 4.3 M , bir $(2n + 1)$ -boyutlu alfa Kenmotsu pseudo metrik manifold olsun. Eğer M lokal ϕ -

simetrik ise o zaman M manifoldu $-\varepsilon\alpha^2$ sabit eğriliğine sahiptir.

İspat Hipotez gereğince, M lokal ϕ -simetrik olduğundan (17) eşitliği yardımıyla

$$0 = \alpha^3\varepsilon[g(X, W)\phi^2Y - g(Y, W)\phi^2X] - \alpha\phi^2(R(X, Y)W)$$

yazılır. Keyfi vektör alanları $\zeta e k \eta$ cümlesinde tanımlı olduklarından yukarıdaki denklem

$$0 = \alpha^3\varepsilon[g(Y, W)X - g(X, W)Y] + \alpha(R(X, Y)W)$$

haline dönüşür. Bu son denklem düzenlenirse manifoldun sabit eğriliğinin $-\varepsilon\alpha^2$ olduğu görülür. Bu da ispatı sonlandırır.

Teorem 4.4 $(2n + 1)$ -boyutlu bir M alfa Kenmotsu pseudo metrik manifoldunun η -Einstein manifold olması için gerek ve yeter koşul

$$S(X, Y) = \lambda_1 g(X, Y) + \lambda_2 \eta(X)\eta(Y)$$

denklemleri için $\lambda_1 = \frac{r+2n\varepsilon\alpha^2}{2n}$ ve $\lambda_2 = -\frac{\varepsilon r+2n(2n+1)\alpha^2}{2n}$ fonksiyonlarının mevcut olmasıdır.

Burada r , manifoldun skaler eğriliğidir.

İspat (18) eşitliğinde Y yerine ξ vektör alanını alırsak

$$S(X, \xi) = \lambda_1 \varepsilon \eta(X) + \lambda_2 \eta(X)$$

Bulunur. Ayrıca, (15) eşitliği ile bu son eşitlik birlikte hesaba katılırsa

$$-2n\alpha^2 = \lambda_1 \varepsilon + \lambda_2 \quad (19)$$

elde edilir. Bundan başka, (18) eşitliğine kontraksiyon yapılırsa

$$r = \lambda_1(2n + \varepsilon) + \varepsilon\lambda_2 \quad (20)$$

bulunur. (19) ve (20) eşitlikleri yardımıyla

$$\lambda_1 = \frac{r}{2n} + \varepsilon\alpha^2 \text{ ve } \lambda_2 = -\left(\frac{\varepsilon r}{2n} + (2n + 1)\alpha^2\right)$$

hesaplanır. Son olarak, (18) eşitliği göz önüne alındığında ispat iki taraflı olarak aşikardır.

Teorem 4.5 $(2n + 1)$ -boyutlu bir M alfa Kenmotsu pseudo metrik manifoldunun Einstein manifold olması için gerek ve yeter koşul

$$S(X, Y) = -2n\alpha^2 \varepsilon g(X, Y) \quad (21)$$

şartının sağlanmasıdır.

İspat M bir Einstein manifoldu olsun. O zaman

$$S(X, Y) = \lambda g(X, Y) \quad (22)$$

eşitliği sağlanır. Burada λ , düzgün bir fonksiyondur. (22) denkleminde $Y = \xi$ için (15) eşitliği yardımıyla

$$-2n\alpha^2 = \lambda\varepsilon$$

bulunur. Bu son eşitlikten ispat açık olarak görülür. Burada $\varepsilon^2 = 1$ dir.

Önerme 4.1 $(2n + 1)$ -boyutlu bir alfa Kenmotsu pseudo metrik manifold M olsun. Bu durumda M manifoldunun her $Y \in \zeta e k \eta$ vektör alanına göre belirlenen ξ -kesit eğriliği $-\varepsilon\alpha^2$ dir.

İspat Her $Y \in \zeta e k \eta$ için ξ -kesit eğriliği formülü ve (14) eşitliği kullanılırsa

$$K(\xi, Y) = \frac{-\varepsilon^2 \alpha^2 g(Y, Y)}{\varepsilon g(Y, Y)}$$

elde edilir ki bu da istenen sonuçtur.

Önerme 4.2 $(2n + 1)$ -boyutlu bir M alfa Kenmotsu pseudo metrik manifoldu her keyfi vektör alanları için

$$\begin{aligned} \phi R(X, Y)W - R(X, Y)\phi W = \\ -\varepsilon\alpha^2[-g(X, W)\phi Y + g(Y, W)\phi X - \\ g(\phi X, W)Y + g(\phi Y, W)X] \end{aligned} \quad (23)$$

ve

$$R(X, Y)W = R(\phi X, \phi Y)W \quad (24)$$

$$\begin{aligned} -\varepsilon\alpha^2[-g(X, W)Y + g(Y, W)X \\ - g(\phi Y, W)\phi X - g(\phi X, W)\phi Y] \end{aligned}$$

eşitliklerini sağlar.

İspat (11) eşitliği yardımıyla elde edilen

$$\eta(R(X, Y)W) = \alpha^2[\eta(Y)g(X, W) - \eta(X)g(Y, W)]$$

denkleminin bir sonucu olarak

$$R(X, Y)W = \alpha^2[g(X, W)Y - g(Y, W)X] \quad (25)$$

dir. (25) eşitliği kullanılarak

$$R(X, Y)\phi W - \phi R(X, Y)W$$

farkını hesapladığımızda (23) eşitliğine ulaşırız. Benzer olarak,

$$R(\phi X, \phi Y)W - R(X, Y)W,$$

ifadesinden (24) elde edilir. Böylece ispat tamamlanır.

Önerme 4.3 $(2n + 1)$ -boyutlu bir alfa Kenmotsu pseudo metrik manifold M olsun. Bu durumda her $Y \in \text{Çek}\eta$ vektör alanına göre belirlenen ϕ -kesit eğriliği için

$$K(Y, \phi Y) = \alpha^2 \left[\left(\frac{g(\phi X, X)}{g(X, X)} \right)^2 - 1 \right]$$

eşitliği geçerlidir.

İspat (25) eşitliğinden

$$R(\phi Y, Y, Y, \phi Y) = \alpha^2 [g(\phi Y, Y)g(Y, \phi Y) - g(Y, Y)g(\phi Y, \phi Y)]$$

yazılır. Her $Y \in \text{Çek}\eta$ için yukarıdaki denklemler birlikte ϕ -kesit eğriliği formülü hesaba katılırsa

$$K(Y, \phi Y) = \frac{\alpha^2 [g(\phi X, X)^2 - g(X, X)^2]}{g(X, X)^2}$$

bulunur. Bu da istenen sonuçtur.

Örnek 4.1 3-boyutlu $M \subset R_1^3$ manifoldu,

$$M = \{(x, y, z) \in R_1^3: z \neq 0\}$$

cümlesi ile verilsin. M üzerinde bir taban ise

$$E_1 = e^{2z^2} \left(\frac{\partial}{\partial x} \right), E_2 = e^{2z^2} \left(\frac{\partial}{\partial y} \right)$$

$$E_3 = \left(\frac{\partial}{\partial z} \right)$$

şeklinde seçilsin.

Ayrıca, M üzerindeki metrik tensör de

$$g = \left(\frac{1}{e^{4z^2}} \right) (\varepsilon_1 dx^2 + \varepsilon_2 dy^2) + \varepsilon_3 dz^2$$

biçiminde tanımlansın. Burada aşikar olarak,

$$\phi(\xi) = 0, \phi(E_1) = E_2, \phi(E_2) = -E_1$$

$$\phi^2 X = -X + \eta(X)E_3, \quad \eta(X) = \varepsilon g(E_3, X)$$

$$\eta(E_3) = g(E_3, E_3) = \varepsilon_3$$

$$\varepsilon_i = g(E_i, E_i), \quad i = 1, 2, 3$$

$$g(\phi X, \phi Y) = g(X, Y) - \varepsilon \eta(X)\eta(Y)$$

eşitlikleri sağlanır. Böylece M bir hemen hemen değme pseudo metrik yapıya sahiptir. O halde bu yapının hemen hemen alfa Kenmotsu pseudo metrik yapıda olduğunu söylemeliyiz. Bu durumda M üzerinde $d\eta = 0$ ve $d\Phi = 2\alpha(\eta \wedge \Phi)$ denklemlerinin geçerli olduğunu göstermeliyiz. $\eta = dz$ olduğundan $d\eta = 0$ olduğu aşikardır. Bundan başka, $\Phi(e_1, e_2) = -\varepsilon_i$ olmak üzere,

$$\Phi = -\varepsilon_i \frac{1}{e^{4z^2}} (dx \wedge dy)$$

bulunur. Buradan

$$d\Phi = -2\varepsilon_i 4z(\eta \wedge \Phi)$$

elde edilir. Burada Nijenhuis tensör alanı özdeş olarak sıfır olduğundan manifoldumuz normal olup alfa Kenmotsu pseudo metrik yapıdadır. Bu örnekte alfa fonksiyonu sabit olmayan düzgün bir fonksiyon olarak alınmıştır.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu makalede, alfa Kenmotsu pseudo metrik manifoldlarla ilgili bazı sonuçlar bulunmuştur. Özellikle bu tür manifoldlar için bazı eğrilik özellikleri araştırılmıştır. Bu çalışmadaki asıl amacımız gelecek çalışmalarda planladığımız hemen hemen alfa Kenmotsu pseudo metrik yapı üzerindeki incelemelerimize başlangıç teşkil etmesidir.

Teşekkür

Bu çalışma, Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 17.FEN.BİL.11 numaralı proje ile desteklenmiştir. Ayrıca, yapıcı yorumları ve katkılarından dolayı saygıdeğer hakemlere teşekkür ederiz.

5. Kaynaklar

Alegre, P., 2011. Semi invariant submanifolds of Lorentzian Sasakian manifolds. *Demonstratio Mathematica*, **44**, 391–406.

- Calvaruso, G., 2011. Contact Lorentzian manifolds. *Differential Geometry and its Applications*, **29**, 541–551.
- Calvaruso, G. and Perrone, D., 2010. Contact pseudo-metric manifolds. *Differential Geometry and its Applications*, **28**, 615–634.
- Dileo, G. and Pastore, A. M., 2009. Almost Kenmotsu manifolds with a condition of η -parallelism. *Differential Geometry and its Applications*, **27**, 671–679.
- Duggal, K.L., 1990. Space time manifolds and contact structures. *Internat. J. Math. & Math. Sci*, **13**, 545–554.
- Kenmotsu, K., 1972. A class of contact Riemannian manifold, *Tôhoku Math. Journal*, **24**, 93–103.
- O’Neil, B., 1983, *Semi-Riemannian geometry with applications to relativity*, Academic Press, New York.
- Öztürk, H., 2016. On Almost α -Kenmotsu Manifolds with Some Tensor Fields, *AKU J. Sci. Eng.*, **16**, 256–264.
- Öztürk, H., Aktan N. and Murathan C., 2010. On α -Kenmotsu manifolds satisfying certain conditions. *Applied Sciences*, **12**, 115–126.
- Perrone, D., 2014. Contact pseudo-metric manifolds of constant curvature and CR geometry. *Results in Mathematics*, **66**, 213–225.
- Takahashi, T., 1969. Sasakian manifold with pseudo-Riemannian manifolds. *Tôhoku Math. Journal*, **21**, 271–290.
- Yano, K. and Kon, M., 1984, *Structures on manifolds*, Series in Pure Mathematics, 3. World Scientific Publishing Co., Singapore.
- Wang, Y. and Liu, X., 2016. Almost Kenmotsu pseudo-metric manifolds. *Analele Stiintifice ale Universitatii Al I Cuza din Iasi - Matematica*, **62**, 241–256.

AKÜ FEMÜBİD 20 (2020) 061303 (983-990)

AKU J. Sci. Eng. 20 (2020) 061303 (983-990)

DOI: 10.35414/akufemubid.746509

Araştırma Makalesi / Research Article

Skew Hurwitz Polinom Halkası Terslenebilir Olan Halkalar ve Genişlemeleri

Fatma KAYNARCA¹¹Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Matematik Bölümü, Afyonkarahisar.e-posta: fkaynarca@aku.edu.tr. ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-5699-3369>

Geliş Tarihi: 01.06.2020

Kabul Tarihi: 08.12.2020

Anahtar kelimelerTerslenebilir halka;
Skew Hurwitz polinom halkası;
Zayıf SH-terlenebilir halka;
 α -katı halka**Öz**

Bu çalışmada; bir halkanın terslenebilir olması kavramı, o halka üzerine kurulan skew Hurwitz polinomlar halkasına genişletilerek, zayıf skew Hurwitz terslenebilir (kısaca zayıf SH-terlenebilir) halka kavramı tanımlanmıştır. Bu halka sınıfının bazı özellikleri ve diğer halka sınıflarıyla ilişkileri incelenmiştir. Zayıf SH-terlenebilir halkaların bazı genişlemelerinin de zayıf SH-terlenebilir olup olmadığı araştırılmıştır. Özel olarak, karakteristiği 0 olan bir R halkası ve R 'nin bir α monomorfizması için R 'nin zayıf SH-terlenebilir olması için gerek ve yeter koşul $A(R, \alpha)$ Jordan genişlemesinin zayıf SH-terlenebilir olması gerektiği ispatlanmıştır.

Rings Over Which Skew Hurwitz Polynomial Rings Are Reversible and Their Extensions

KeywordsReversible ring;
Skew Hurwitz polynomial ring;
Weak SH-reversible ring;
 α -rigid ring**Abstract**

In this paper; the concept of the ability of a ring to be reversible is extended to the ring of skew Hurwitz polynomials established on that ring, and the concept of the weak skew Hurwitz reversible (briefly weak SH-reversible) ring is introduced. Some properties of this ring class and its relations with other ring classes are examined. It is also investigated whether some extension of weak SH-reversible rings are weak SH-reversible. In particular, it is proved that for a ring R with characteristic 0 and an α monomorphism of R the Jordan extension $A(R, \alpha)$ of R is weak SH-reversible if and only if R is weak SH-reversible.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Bu çalışmada, aksi belirtilmedikçe R birimli, birleşmeli ve değişmeli bir halka ve α ; R halkasının birimden ve sıfırdan farklı bir endomorfizması olacak.

Keigher (1975, 1997); birimli ve değişmeli bir R halkası üzerinde, diferansiyel cebirde ilginç uygulamaları bulunan, HR Hurwitz seriler halkasını inşa etmiştir. Daha sonra Hurwitz seri kavramı Hassanein (2007) tarafından skew Hurwitz seriler halkasına genişletilmiştir. R üzerindeki skew Hurwitz serilerinin (HR, α) halkası; \mathbb{N} doğal sayılar kümesi olmak üzere aşağıdaki işlemlerle birlikte tüm $f: \mathbb{N} \rightarrow$

R fonksiyonlarının oluşturduğu küme olarak tanımlanır. (HR, α) kümesinde toplama işlemi bileşensel ve çarpma işlemi her $f, g \in (HR, \alpha)$ için

$$(fg)(n) = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} f(k) \alpha^k (g(n-k))$$

ile tanımlıdır. Burada $n \geq k$ olacak şekilde her $n, k \in \mathbb{N}$ için $\binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!}$ binom katsayılarıdır.

Böylece; bir $\sum_{i=0}^n a_i x^i \in R[[x; \alpha]]$ skew formal kuvvet serisi; $f(n) = a_n$ olacak şekilde bir $f \in (HR, \alpha)$ skew Hurwitz serisi ile özdeşleştirilebilir. Bu açıdan iki halkanın sahip olduğu çarpma işlemi (her bir terimin başında görülen binom katsayıları

dışında) aynıdır. Aynı zamanda (HR, α) ve $R[[x; \alpha]]$ halkalarının izomorf olduğu Paykan (2017) tarafından ifade edilmiştir.

Her bir $r \in R$ ve her $x, n \in \mathbb{N}$ için (HR, α) 'nın

$$h_r(x) = \begin{cases} r & ; x = 0 \\ 0 & ; x \neq 0 \end{cases} \quad \text{ve} \quad h'_n(x) = \begin{cases} 1 & ; x = n \\ 0 & ; x \neq n \end{cases}$$

ile tanımlı elemanları vardır. Kolayca görülebilir ki h_1 ; (HR, α) 'nın birim elemanıdır ve $r \mapsto h_r$ dönüşümü yardımıyla R halkası (HR, α) 'nın içine gömülebilir. Bundan dolayı R ; (HR, α) 'nın bir alt halkası olur.

$$\text{supp}(f) = \{i \in \mathbb{N} : 0 \neq f(i) \in R\}$$

kümesine f 'nin desteği denir ve bu kümenin en büyük elemanı (varsa) $\Delta(f)$ ile gösterilir. $\Delta(f) < \infty$ özelliğini sağlayan tüm $f \in (HR, \alpha)$ 'ların kümesi (hR, α) ile gösterilir ve *skew Hurwitz polinomlar halkası* olarak adlandırılır. (hR, α) skew Hurwitz polinomlar halkasının (HR, α) skew Hurwitz seriler halkasının bir alt halkası olduğu açıktır.

Başka bir ifadeyle açıklamak gerekirse; birimli ve değişmeli bir R halkası üzerine kurulan (hR, α) skew Hurwitz polinomlar halkası; bileşensel toplama ve $f = a_0 + a_1x + \dots + a_mx^m, g = b_0 + b_1x + \dots + b_nx^n \in (hR, \alpha)$ için

$$c_k = \sum_{t=0}^k \binom{k}{t} a_t \alpha^t (b_{k-t}), \quad (0 \leq t \leq m+n)$$

olmak üzere $fg = \sum_{k=0}^t c_k x^k$ ile tanımlı çarpma işlemi ile birlikte birimi 1 sabit polinomu olan birimli bir halkadır.

Sıfırdan farklı nilpotent eleman bulundurmayan (yani; $a \in R$ için $a^2 = 0$ iken $a = 0$ özelliğini sağlayan) bir R halkası *indirgenmiş* olarak adlandırılır. Cohn (1999) tarafından değişmeli halkaların bir genellemesi olan terslenebilir halkalar tanıtılmıştır: $a, b \in R$ için $ab = 0$ iken $ba = 0$ oluyorsa R halkası *terslenebilir* olarak adlandırılır.

Bir R halkası ve R 'nin bir α endomorfizması için R 'den katsayılı polinomlar kümesi üzerinde bilinen toplama ve her $r \in R$ için $xr = \alpha(r)x$

biçiminde tanımlanan çarpma işlemi ile oluşturulan ve $R[x; \alpha]$ ile gösterilen halkaya *skew polinomlar halkası* denir. Herhangi bir $R[x; \alpha]$ skew polinomlar halkasında $1x = x1 = \alpha(1)x$ olup $\alpha(1) = 1$ özelliği sağlanır. Krempa (1996); $a \in R$ için $a\alpha(a) = 0$ iken $a = 0$ oluyorsa R halkasının bir α endomorfizmasını *katı* olarak adlandırmıştır. Bir katı α endomorfizması var olan halkaya *α -katı halka* denir (Hong et al. 2000).

İndirgenmiş halkaların bir genellemesi olarak Rege ve Chhawchharia (1997) tarafından Armendariz halka kavramı tanıtılmıştır. $f(x)g(x) = 0$ olacak şekildeki $R[x]$ 'deki $f(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_mx^m$ ve $g(x) = b_0 + b_1x + \dots + b_nx^n$ polinomları için, her bir i, j için, $a_i b_j = 0$ oluyorsa R halkası *Armendariz* olarak adlandırılır.

Ahmedi vd. (2014) tarafından, her $f = (a_i), g = (b_i) \in (HR, \alpha)$ skew Hurwitz serisi için " $fg = 0$ olması için gerek ve yeter koşul her i, j için $a_i b_j = 0$ olmasıdır" özelliğini sağlayan R halkası *skew Hurwitz serieswise Armendariz* (kısaca *SHA-halka*) olarak adlandırılarak, polinom halkasının Armendarizlik özelliği skew Hurwitz seriler halkasına genişletilmiştir.

Diğer yandan Kim ve Lee (2003) tarafından terslenebilir halkalar üzerine kurulan polinom halkalarının terslenebilir olması gerektiği gösterilmiştir. Bu özelliğe sahip, yani; polinom halkası terslenebilir olan halkalar, *güçlü terslenebilir* olarak adlandırılmıştır (Yang and Liu 2008). Jin vd. (2017) tarafından terslenebilir bir halkanın skew polinom halkasının terslenebilir olmadığı ifade edilerek, skew polinom halkası terslenebilir olan halkalara *güçlü α -skew terslenebilir* adı verilmiştir.

Bu bilgiler ışığı altında Kaynarca ve Yıldırım (2020) terslenebilir bir halka üzerindeki skew Hurwitz seriler halkasının terslenebilir olmadığını göstererek, skew Hurwitz seriler halkası terslenebilir olan halkalara *skew Hurwitz terslenebilir* (kısaca *SH-terlenebilir*) adını vererek, bazı özelliklerini incelemişlerdir. Bu çalışmada ise skew Hurwitz polinom halkası terslenebilir olan halka sınıfı tanıtılmış ve bazı özellikleri ile diğer halka sınıflarıyla

ilişkisi incelenmiştir. Ayrıca skew Hurwitz polinom halkası terslenebilir olan halkaların bazı genişlemelerinin de bu özelliğe sahip olup olmadığı araştırılmıştır.

2. Zayıf SH-terlenebilir Halkalar

Bu bölümde zayıf SH-terlenebilir halka kavramını tanıtaçagız ve bazı özelliklerini inceleyeceğiz. Aşağıdaki örnek, neden böyle bir halka sınıfının tanımlandığını göstermektedir.

2.1 Örnek \mathbb{Z}_2 ; tamsayıların $\text{mod } 2$ 'ye göre kalan sınıflarının kümesi olmak üzere $R = \mathbb{Z}_2 \oplus \mathbb{Z}_2$ ve $\alpha((a, b)) = (b, a)$ ile tanımlı α ; R 'nin bir endomorfizması olsun. $f = (1, 0), g = (0, 1) + (0, 1)x \in (hR, \alpha)$ için $fg = 0$ dir. Fakat $gf = (0, 1)x(1, 0) = (0, 1)x \neq 0$ olduğundan (hR, α) terslenebilir değildir.

Böylece aşağıdaki tanımlı verebiliriz.

2.2 Tanım R değışmeli bir halka ve α ; R 'nin bir endomorfizması olsun. (hR, α) skew Hurwitz polinomlar halkası terslenebilir ise, yani $f(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n, g(x) = b_0 + b_1x + \dots + b_nx^n \in (hR, \alpha)$ için $f(x)g(x) = 0$ iken $g(x)f(x) = 0$ oluyorsa R 'ye zayıf skew Hurwitz terslenebilir (kısaca, zayıf SH-terlenebilir) denir.

SH-terlenebilir halkaların zayıf SH-terlenebilir olduğu açıktır. Ayrıca zayıf SH-terlenebilir bir R halkasının $\alpha(S) \subseteq S$ özelliğine sahip her S alt halkası da zayıf SH-terlenebilir olur. Zayıf SH-terlenebilir halkaların dik çarpımlarının da zayıf SH-terlenebilir olduğu kolay hesaplamalarla görülür.

Terslenebilir halkaların bir başka genellemesi olan α -terlenebilir halkalar Başer vd. (2009) tarafından şu şekilde tanıtılmıştır: R bir halka ve α ; R 'nin bir endomorfizması olmak üzere $a, b \in R$ için $ab = 0$ iken $b\alpha(a) = 0$ (ya da $\alpha(b)a = 0$) oluyorsa α endomorfizması sağ (ya da sol) terslenebilir olarak adlandırılır. R 'nin bir sol (ya da sağ) terslenebilir α endomorfizması varsa R 'ye sol

(ya da sağ) α -terlenebilir denir. Hem sol hem de sağ α -terlenebilir olan bir halkaya kısaca α -terlenebilir denir.

Herstein (1975)'e göre $\text{char}(R) = 0$ olması için gerek ve yeter koşul pozitif bir n tamsayısı ve $x \in R$ için $nx = 0$ olması $x = 0$ olmasını gerektirir. Bu ifade aşağıda ifade edilen sonuçların ispatında kullanılacaktır.

2.3 Önerme R zayıf SH-terlenebilir bir halka olsun. Bu durumda aşağıdaki özellikler sağlanır.

- (1) R terslenebilir ve α -terlenebilirdir.
- (2) α bir monomorfizmadır.
- (3) Herhangi $a, b \in R$ ve negatif olmayan m ve n tamsayıları için $\alpha\alpha^m(b) = 0 \Leftrightarrow ab = 0 \Leftrightarrow ba = 0 \Leftrightarrow b\alpha^n(a) = 0$ dir.
- (4) $\text{char}(R) = 0$ ise, herhangi $e^2 = e \in R$ için $\alpha(e) = e$ dir.

İspat: (1) $ab = 0$ olsun. (hR, α) 'da $f(x) = a$ ve $g(x) = b$ sabit skew Hurwitz polinomları için $f(x)g(x) = 0$ olup R zayıf SH-terlenebilir olduğundan $g(x)f(x) = 0$ ve buradan $ba = 0$ bulunur. Böylece R terslenebilirdir. Diğer yandan $ab = 0$ olsun. (hR, α) 'da $f(x) = a$ ve $g(x) = bx$ skew Hurwitz polinomları için $f(x)g(x) = 0$ olup R zayıf SH-terlenebilir olduğundan $g(x)f(x) = 0$ ve buradan $b\alpha(a) = 0$ olup R sağ α -terlenebilirdir. Benzer olarak $ab = 0$ iken R terslenebilir olduğundan $ba = 0$ olup (hR, α) 'daki $f(x) = b$ ve $g(x) = ax$ skew Hurwitz polinomları için $f(x)g(x) = 0$ olup R zayıf SH-terlenebilir olduğundan $g(x)f(x) = 0$ ve buradan $\alpha\alpha(b) = 0$ olur. R 'nin terslenebilir olmasından ise $\alpha(b)a = 0$, yani R ; α -terlenebilir elde edilir.

(2) Kabul edelim ki $\alpha(a) = 0$ olsun. Bu durumda (hR, α) 'daki $f(x) = x$ ve $g(x) = a$ skew Hurwitz polinomları için $f(x)g(x) = 0$ olup R zayıf SH-terlenebilir olduğundan $g(x)f(x) = 0$ ve buradan $a = 0$ bulunur. Böylece α bir monomorfizmadır.

(3) $a\alpha^m(b) = 0$ olsun. Bu durumda (hR, α) 'daki $f(x) = ax^m$ ve $g(x) = b$ skew Hurwitz polinomları için $f(x)g(x) = 0$ olup R zayıf SH -terslenebilir olduğundan $g(x)f(x) = 0$ ve buradan $ba = 0$ olur. R terslenebilir olduğundan $ab = 0$ elde edilir. (hR, α) 'daki $f(x) = a$ ve $g(x) = bx^n$ için $f(x)g(x) = 0$ olup R zayıf SH -terslenebilir olduğundan $g(x)f(x) = 0$ ve buradan $b\alpha^n(a) = 0$ elde edilir.

(4) $e^2 = e \in R$ idempotentini alalım. $f(x)g(x) = 0$ olacak şekilde $f = (1 - e) + \alpha(e - 1)x$, $g = e + ex \in (hR, \alpha)$ için, R zayıf SH -terslenebilir olduğundan $g(x)f(x) = 0$ ve buradan $\text{char}(R) = 0$ olduğundan $e\alpha(e) = e$ olur. (hR, α) 'daki $f'(x) = e + \alpha(e)x$ ve $g'(x) = (e - 1) + (e - 1)x$ skew Hurwitz polinomları için $f'(x)g'(x) = 0$ dır. R zayıf SH -terslenebilir olduğundan $g'(x)f'(x) = 0$ ve $\text{char}(R) = 0$ olduğundan $e\alpha(e) = \alpha(e)$ bulunur. Sonuç olarak $\alpha(e) = e$ elde edilir.

Önerme 2.3'ten zayıf SH -terslenebilir halkaların terslenebilir ve α -terslenebilir olduğu açıktır. Bu ifadenin karşıtının, halkanın bir SHA -halka olması durumunda, doğru olduğu aşağıdaki önermede görülür.

2.4 Önerme R bir SHA -halka olsun. Bu durumda R 'nin terslenebilir ve α -terslenebilir olması için gerek ve yeter koşul R 'nin zayıf SH -terslenebilir olmasıdır.

İspat: (\Leftarrow) Önerme 2.3 (1)'den açıktır.

(\Rightarrow) $f(x) = \sum_{i=0}^m a_i x^i$, $g(x) = \sum_{j=0}^n b_j x^j \in (hR, \alpha)$ için $f(x)g(x) = 0$ olsun. R ; SHA -halka olduğundan her bir i, j için $a_i b_j = 0$ olur. R terslenebilir olduğundan $b_j a_i = 0$ ve buradan R α -terslenebilir olduğundan $b_j \alpha(a_i) = 0$ bulunur. Bu süreç devam ettirilerek her t için $b_j \alpha^t(a_i) = 0$ elde edilir. Sonuç olarak $g(x)f(x) = 0$ olup R zayıf SH -terslenebilir elde edilir.

2.4 Lemma (Hashemi and Moussavi 2005) R α -katı bir halka ve $a, b \in R$ olsun. Bu durumda aşağıdaki ifadeler sağlanır.

(1) Her bir $n \in \mathbb{N}$ için $a\alpha^n(a) = 0$ ise, $a=0$ dır.

(2) $ab = 0$ ise, $a\alpha(b) = 0$ dır.

Kaynarca ve Yıldırım (2020), α -katı halkaların SH -terslenebilir olduğunu ifade etmiş ve karşıtının doğru olmadığını bir örnekle göstermişlerdir. Buna dayanarak aşağıdaki teoremi verebiliriz.

2.5 Teorem R halkası bir \mathbb{Z} -modül olarak burulmasız ve α ; R 'nin bir endomorfizması olsun. Bu durumda R 'nin α -katı olması için gerek ve yeter koşul R 'nin zayıf SH -terslenebilir ve indirgenmiş olmasıdır.

İspat: (\Leftarrow) R zayıf SH -terslenebilir ve indirgenmiş olsun. $a \in R$ için $a\alpha(a) = 0$ olduğunu kabul edelim. Bu durumda (hR, α) 'daki $f(x) = ax$, $g(x) = a$ skew Hurwitz polinomları için $f(x)g(x) = 0$ olur. R zayıf SH -terslenebilir olduğundan $g(x)f(x) = 0$ olup buradan $a^2 = 0$ ve R indirgenmiş olduğundan $a = 0$ bulunur.

(\Rightarrow) Kabul edelim ki R α -katı olsun. R 'nin indirgenmiş olduğu açıktır. $f(x)g(x) = 0$ olacak şekilde $f(x) = \sum_{i=0}^m a_i x^i$, $g(x) = \sum_{j=0}^n b_j x^j \in (hR, \alpha)$ alalım. Bu durumda $x^{k'}$ lı terimlerin katsayıları olan aşağıdaki eşitlikler vardır.

$$a_0 b_0 = 0 \quad (1)$$

$$a_0 b_1 + a_1 \alpha(b_0) = 0 \quad (2)$$

$$a_0 b_2 + 2a_1 \alpha(b_1) + a_2 \alpha^2(b_0) = 0 \quad (3)$$

$$a_0 b_3 + 3a_1 \alpha(b_2) + 3a_2 \alpha^2(b_1) + a_3 \alpha^3(b_0) = 0 \quad (4)$$

⋮

$$\binom{n}{0} a_0 b_n + \binom{n}{1} a_1 \alpha(b_{n-1}) + \dots + \binom{n}{n} a_n \alpha^n(b_0) = 0 \quad (n)$$

α -katı halkaların indirgenmiş ve terslenebilir olduğu göz önünde bulundurularak, (1) eşitliğinden $b_0 a_0 = 0$ bulunur. (2) eşitliği soldan b_0 , sağdan $\alpha(a_1)$ ile

çarpılarak $b_0 a_1 \alpha(b_0 a_1) = 0$ ve kabulden $b_0 a_1 = 0$ olur. R terslenebilir olduğundan $a_1 b_0 = 0$ olup Lemma 2.4 gereğince $a_1 \alpha(b_0) = 0$ dir. Bu ifade (2) eşitliğinde yerine yazılarak $a_0 b_1 = 0$ elde edilir. (3) eşitliği soldan b_0 sağdan $\alpha^2(a_2)$ ile çarpılırsa, $b_0 a_2 \alpha^2(b_0 a_2) = 0$ olup kabulden $b_0 a_2 = 0$ ve R terslenebilir olduğundan ve Lemma 2.4'den $a_2 \alpha^2(b_0) = 0$ bulunur. Bu ifade (3)'te yerine yazılırsa

$$a_0 b_2 + 2a_1 \alpha(b_1) = 0 \quad (5)$$

eşitliği elde edilir. (5) eşitliği soldan b_1 sağdan $\alpha(a_1)$ ile çarpılırsa $2b_1 a_1 \alpha(b_1 a_1) = 0$ bulunur. R ; \mathbb{Z} -modül olarak burulmasız ve α -katı olduğundan $b_1 a_1 = 0$ olur. Lemma 2.4'ten $a_1 \alpha(b_1) = 0$ olup (3) eşitliğinden $a_0 b_2 = 0$ elde edilir. Bu şekilde devam edilerek her bir i, j için $a_i b_j = 0$ bulunur. Lemma 2.4 gereğince $b_j \alpha(a_i) = 0$ olup buradan $g(x)f(x) = 0$, yani R zayıf SH-terlenebilir elde edilir.

Teorem 2.5 gereğince her α -katı halka zayıf SH-terlenebilirdir. Fakat bu ifadenin tersi Kaynarca ve Yıldırım (2020) Örnek 2.7'den doğru değildir.

3.Zayıf SH-Terslenebilir Halkaların Genişlemeleri

Bu bölümde zayıf SH-terlenebilir halkaların bazı genişlemelerinin zayıf SH-terlenebilir olup olmadığı incelenecektir.

R bir halka ve $u, r \in R$ olsun. $ur = 0$ iken $r = 0$ oluyorsa u 'ya *sağ düzenli* eleman denir. Sol düzenli eleman benzer şekilde tanımlanır. Hem sol düzenli hem de sağ düzenli (yani sıfır bölen olmayan) bir elemana kısaca *düzenli* denir. Δ ; R 'nin düzenli elemanlarının çarpımsal kapalı bir altkümesi olsun. $\Delta^{-1}R = \{u^{-1}a : u \in \Delta, a \in R\}$ kümesi bir halkadır. α ; R 'nin bir otomorfizması ve kabul edelim ki her $u \in \Delta$ için $\alpha(u) = u$ olsun. Bu durumda $\bar{\alpha}(u^{-1}a) = u^{-1}\alpha(a)$ ile tanımlı bir $\bar{\alpha} : \Delta^{-1}R \rightarrow \Delta^{-1}R$ otomorfizması vardır.

3.1 Önerme R bir halka ve $e^2 = e \in R$ bir idempotent olmak üzere aşağıdaki ifadeler birbirine denktir:

- (1) R zayıf SH-terlenebilirdir.
- (2) eR ve $(1 - e)R$ zayıf SH-terlenebilirdir.
- (3) $\Delta^{-1}R$ zayıf SH-terlenebilirdir.

İspat: (1) \Leftrightarrow (2) Zayıf SH-terlenebilir halkaların sınıfı alt halkalar ve sonlu dik toplamlar altında kapalı olduğundan ispat açıktır.

(3) \Rightarrow (1) R ; $\Delta^{-1}R$ 'nin bir alt halkası olduğundan ispat açıktır.

(1) \Rightarrow (3) Kabul edelim ki R zayıf SH-terlenebilir olsun. $(h\Delta^{-1}R, \bar{\alpha})$ 'da $f(x)g(x) = 0$ olacak şekilde $f(x) = \sum_{i=0}^m (u^{-1}a_i)x^i$ ve $g(x) = \sum_{j=0}^n (v^{-1}b_j)x^j$ skew Hurwitz polinomlarını alalım. $f(x)g(x) = 0$ olduğundan (hR, α) 'daki $f'(x) = \sum_{i=0}^m a_i x^i$, $g'(x) = \sum_{j=0}^n b_j x^j$ skew Hurwitz polinomları için $f'(x)g'(x) = 0$ elde edilir. R zayıf SH-terlenebilir olduğundan $g'(x)f'(x) = 0$ olup bu eşitliğin her iki tarafı $(vu)^{-1}$ ile çarpılarak $g(x)f(x) = 0$ bulunur. Böylece $\Delta^{-1}R$ zayıf SH-terlenebilir olur.

Bir R halkası üzerindeki Laurent polinomlar halkası; $a_i \in R$ ve $k \leq n$ olacak şekilde k ve n (negatif olabilen) tamsayılar olmak üzere tüm $\sum_{i=k}^n a_i x^i$ formal toplamlarından oluşur ve $R[x; x^{-1}]$ ile gösterilir. R 'nin bir α endomorfizması için $\bar{\alpha}(\sum_{i=k}^n a_i x^i) = \sum_{i=k}^n \alpha(a_i) x^i$ ile tanımlı bir $\bar{\alpha} : R[x; x^{-1}] \rightarrow R[x; x^{-1}]$ endomorfizması vardır.

3.2 Sonuç Bir R halkası için $R[x]$ zayıf SH-terlenebilirdir ancak ve ancak $R[x; x^{-1}]$ zayıf SH-terlenebilirdir.

İspat: $\Delta = \{1, x, x^2, \dots\}$ kümesi $R[x]$ 'in çarpımsal kapalı bir altkümesi olup $\Delta^{-1}R[x] = R[x; x^{-1}]$ olduğundan Önerme 3.1'in direkt bir sonucudur.

R bir halka ve α ; R 'nin bir endomorfizması olmak üzere $\alpha(I) \subseteq I$ özelliğini sağlayan R 'nin bir I ideali α -ideal olarak adlandırılır. I ; R 'nin bir α -ideali iken, R 'nin bir α endomorfizması; R/I bölüm

halkasının bir $\bar{\alpha}$ endomorfizmasına, her $a + I \in R/I$ için, $\bar{\alpha}(a + I) = \alpha(a) + I$ tanımıyla genişletilir. Ayrıca R' 'nin her sağ (sol) I idealine karşılık (hR, α) 'da bir sağ (sol)

$$(hI, \alpha) = \left\{ f = \sum_{i=0}^m a_i x^i \in (hR, \alpha) : a_i \in I \right\}$$

ideali vardır (Hassanein, 2007).

3.3 Önerme R halkası bir \mathbb{Z} -modül olarak burulmasız, α ; R' 'nin bir otomorfizması ve I ; R' 'nin bir α -ideali olsun. R/I zayıf SH -terslenebilir halka ve I ideali α -katı ise, R halkası zayıf SH -terslenebilirdir.

İspat: (hR, α) 'da $fg = 0$ olacak şekildeki $f = \sum_{i=0}^m a_i x^i$ ve $g = \sum_{j=0}^n b_j x^j$ skew Hurwitz polinomlarını alalım. Bu durumda $(h(R/I), \alpha)$ 'daki $\bar{f}(x) = \sum_{i=0}^m (a_i + I)x^i$ ve $\bar{g}(x) = \sum_{j=0}^n (b_j + I)x^j$ skew Hurwitz polinomları için $\bar{f}(x)\bar{g}(x) = \bar{0}$ olur. R/I zayıf SH -terslenebilir olduğundan $\bar{g}(x)\bar{f}(x) = \bar{0}$ ve buradan $g(x)f(x) \in (hI, \alpha)$ elde edilir. I ; α -katı olduğundan (Hassanein, 2007) gereğince (hI, α) indirgenmiş halkadır. Böylece (hI, α) 'da $(g(x)f(x))^2 = 0$ olduğundan $g(x)f(x) = 0$ bulunur. Sonuç olarak R zayıf SH -terslenebilirdir.

3.4 Önerme R ve S karakteristiği 0 olan iki halka olmak üzere α ; R' 'nin bir endomorfizması ve $\sigma: R \rightarrow S$ bir halka izomorfizması olsun. R' 'nin zayıf SH -terslenebilir olması için gerek ve yeter koşul S' 'nin zayıf SH -terslenebilir olmasıdır.

İspat: (hR, α) 'daki $p(x) = \sum_{i=0}^m a_i x^i$ ve $q(x) = \sum_{j=0}^n b_j x^j$ skew Hurwitz polinomlarına karşılık, α bir izomorfizma olduğundan her i, j için $\sigma(a_i) = a'_i$ ve $\sigma(b_j) = b'_j$ olmak üzere $(hS, \sigma\alpha\sigma^{-1})$ 'deki $p'(x) = \sum_{i=0}^m a'_i x^i$ ve $q'(x) = \sum_{j=0}^n b'_j x^j$ skew Hurwitz polinomları yazılabilir. Bu durumda

(hR, α) 'da

$$p(x)q(x) = 0 \Leftrightarrow \left(\sum_{i=0}^m a_i x^i \right) \left(\sum_{j=0}^n b_j x^j \right) = 0$$

$$\Leftrightarrow \sum_{k=0}^{m+n} \left(\sum_{l=0}^k \binom{k}{l} a_l \alpha^l(b_{k-l}) \right) x^k = 0$$

σ örten olduğundan

$$\Leftrightarrow \sum_{k=0}^{m+n} \left(\sum_{l=0}^k \binom{k}{l} \sigma(a_l \alpha^l(b_{k-l})) \right) x^k = 0$$

$$\Leftrightarrow \sum_{k=0}^{m+n} \left(\sum_{l=0}^k \binom{k}{l} \sigma(a_l) (\sigma\alpha^l\sigma^{-1}) \sigma(b_{k-l}) \right) x^k = 0$$

Herhangi bir pozitif t tamsayısı için $(\sigma\alpha\sigma^{-1})^t = \sigma\alpha^t\sigma^{-1}$ olduğu gözönüne alınarak

$$\Leftrightarrow \sum_{k=0}^{m+n} \left(\sum_{l=0}^k \binom{k}{l} a'_l (\sigma\alpha\sigma^{-1})^l (b'_{k-l}) \right) x^k = 0$$

olup $(hS, \sigma\alpha\sigma^{-1})$ 'de

$$\Leftrightarrow p'(x)q'(x) = 0$$

olduğundan ispat açıktır.

Bir R halkası ve bir M ; R - R -bimodülü verildiğinde R' 'nin M ile (trivial) aşikar genişlemesi; bileşensel toplama ve

$$(r_1, m_1)(r_2, m_2) = (r_1 r_2, r_1 m_2 + m_1 r_2)$$

ile tanımlı çarpma işlemiyle $R \oplus M$ halkasıdır. Bu halka; bilinen matris toplama ve çarpma işlemleriyle birlikte, $r \in R$ ve $m \in M$ olmak üzere $\begin{pmatrix} r & m \\ 0 & r \end{pmatrix}$ formundaki matrislerin halkasına izomorftur. R' 'nin bir α endomorfizması için, $T(R, R)$ aşikar genişlemesinin $\bar{\alpha}((a, b)) = (\alpha(a), \alpha(b))$ ile tanımlı bir $\bar{\alpha}$ endomorfizması vardır.

3.5 Önerme R ; karakteristiği 0 olan bir halka ve α ; R' 'nin bir endomorfizması olsun. R halkası α -katı ise, $T(R, R)$ zayıf SH -terslenebilirdir.

İspat: $(hT(R, R), \bar{\alpha})$ 'daki $p(x) = \sum_{i=0}^m (a_i, b_i)x^i$ ve $q(x) = \sum_{j=0}^n (c_j, d_j)x^j$ polinomları için $p(x)q(x) = 0$ olsun. (hR, α) 'daki $p_0(x) = \sum_{i=0}^m a_i x^i$, $p_1(x) = \sum_{i=0}^m b_i x^i$, $q_0(x) = \sum_{j=0}^n c_j x^j$ ve $q_1(x) = \sum_{j=0}^n d_j x^j$

skew Hurwitz polinomları için $p(x) = (p_0(x), p_1(x))$ ve $q(x) = (q_0(x), q_1(x))$ biçiminde yazılabilir. $p(x)q(x) = 0$ olduğundan (hR, α) 'da

$$p_0(x)q_0(x) = 0 \quad (1)$$

$$p_0(x)q_1(x) + p_1(x)q_0(x) = 0 \quad (2)$$

eşitlikleri elde edilir. R α -katı iken (hR, α) indirgenmiş ve böylece (hR, α) indirgenmiş olur (Hassanein, 2012). Bu durumda (1) eşitliğinden $q_0(x)p_0(x) = 0$ elde edilir. (2) eşitliği soldan $q_0(x)$ ile çarpılırsa $p_1(x)q_0(x) = 0$ olur. Bu ifade (2) eşitliğinde yerine yazılarak $p_0(x)q_1(x) = 0$ elde edilir. (hR, α) indirgenmiş iken terslenebilir olduğundan $q_0(x)p_1(x) = 0$ ve $q_1(x)p_0(x) = 0$ olup buradan $q(x)p(x) = 0$, yani $T(R, R)$ zayıf SH -terslenebilir bulunur.

R bir halka ve α ; R 'nin bir monomorfizması olmak üzere $R[x, x^{-1}; \alpha]$ skew Laurent polinom halkasının

$$A(R, \alpha) = \{x^{-i}rx^i : r \in R, i \geq 0\}$$

alt kümesini göz önüne alalım. $r \in R$ için $j > 0$ iken $x^j r = \alpha^j(r)x^j$ olması $rx^{-j} = x^j \alpha^j(r)$ olmasını gerektirdiğinden her bir $j \geq 0$ için

$$x^{-i}rx^i = x^{-(i+j)}\alpha^j(r)x^{i+j}$$

elde edilir. $r, s \in R$ ve $i, j \geq 0$ için

$$x^{-i}rx^i + x^{-j}sx^j = x^{-(i+j)}(\alpha^j(r) + \alpha^i(s))x^{i+j}$$

$$(x^{-i}rx^i)(x^{-j}sx^j) = x^{-(i+j)}(\alpha^j(r)\alpha^i(s))x^{i+j}$$

ile tanımlanan işlemlerle birlikte R 'nin bir üst halkası olan $A(R, \alpha)$ 'ya R 'nin α ile *Jordan genişlemesi* denir. Herhangi (R, α) çifti için, x 'in kuvvetlerinin kümesine göre $R[x; \alpha]$ skew polinom halkasının sol lokalizasyonu kullanılarak, $A(R, \alpha)$ Jordan genişlemesinin her zaman var olduğu Jordan (1982) tarafından ifade edilmiştir. α ; aynı zamanda $\alpha(x^{-i}rx^i) = x^{-i}\alpha(r)x^i$ ile tanımlanan $A(R, \alpha)$ 'nın bir otomorfizması olur.

3.6 Teorem R karakteristiği 0 olan bir halka ve α ; R 'nin bir monomorfizması olsun. R 'nin zayıf SH -terslenebilir olması için gerek ve yeter koşul $A(R, \alpha)$

Jordan genişlemesinin zayıf SH -terslenebilir olmasıdır.

İspat: Zayıf SH -terslenebilir halkalar alt halkalar altında kapalı olduğundan sadece gerek koşulu göstermek yeterlidir. Karışıklık olmaması adına $A(R, \alpha)$ 'daki x değişkeni yerine t kullanalım. Yani $A(R, \alpha) = \{t^{-i}rt^i : r \in R, i \geq 0\}$ biçiminde olsun. Kabul edelim ki R zayıf SH -terslenebilir olsun. $a'_i, b'_j \in R$ ve $v(i), u(j) \geq 0$ için $a_i = t^{-v(i)}a'_i t^{v(i)}$, $b_j = t^{-u(j)}b'_j t^{u(j)}$ olmak üzere $(hA(R, \alpha), \alpha)$ 'daki $p(x) = \sum_{i=0}^m a_i x^i$ ve $q(x) = \sum_{j=0}^n b_j x^j$ skew Hurwitz polinomları için $p(x)q(x) = 0$ olsun. Her bir $j \geq 0$ için $x^{-i}rx^i = x^{-(i+j)}\alpha^j(r)x^{i+j}$ özelliğinden ve α 'nın $A(R, \alpha)$ 'nın bir otomorfizması olmasından yararlanarak uygun $s \geq 0$ ve $a''_i, b''_j \in R$ için

$a_i = t^{-s}a''_i t^s$ ve $b_j = t^{-s}b''_j t^s$ biçiminde yazabiliriz. Böylece aşağıdaki eşitlikler düzenlenerek

$$\begin{aligned} 0 &= p(x)q(x) \\ &= \left(\sum_{i=0}^m a_i x^i\right) \left(\sum_{j=0}^n b_j x^j\right) \\ &= \sum_{k=0}^{m+n} \left(\sum_{l=0}^k \binom{k}{l} a_l \alpha^l(b_{k-l})\right) x^k \\ &= \sum_{k=0}^{m+n} \left(\sum_{l=0}^k \binom{k}{l} t^{-s} a''_l t^s \alpha^l(t^{-s} b''_{k-l} t^s)\right) x^k \\ &= \sum_{k=0}^{m+n} \left(\sum_{l=0}^k \binom{k}{l} t^{-s} a''_l t^s t^{-s} \alpha^l(b''_{k-l} t^s)\right) x^k \\ &= t^{-s} \left(\sum_{k=0}^{m+n} \left(\sum_{l=0}^k \binom{k}{l} a''_l \alpha^l(b''_{k-l})\right) x^k\right) t^s \end{aligned}$$

elde edilir. Buradan

$$\sum_{k=0}^{m+n} \left(\sum_{l=0}^k \binom{k}{l} a''_l \alpha^l(b''_{k-l})\right) x^k = 0$$

bulunur. Böylece (hR, α) 'daki $p'(x) = \sum_{i=0}^m a''_i x^i$ ve $q'(x) = \sum_{j=0}^n b''_j x^j$ skew Hurwitz polinomları için $p'(x)q'(x) = 0$ olur. R zayıf SH -terslenebilir olduğundan $q'(x)p'(x) = 0$ olup buradan $t^{-s}p'(x)t^s = p(x)$ ve $t^{-s}q'(x)t^s = q(x)$ olduğu

kullanılarak $q(x)p(x) = 0$ elde edilir. Sonuç olarak $A(R, \alpha)$ zayıf SH -terslenebilir olur.

4. Tartışma ve Sonuç

Halka teori alanında yeni tanımlanan bir halka sınıfı, daha önceden bilinen halka sınıflarıyla ilişkili olduğunda anlam ve önem kazanmaktadır. Yeni bir halka sınıfının tanımlandığı her makale göz önüne alındığında, ilk olarak neden böyle bir halka sınıfına ihtiyaç duyulduğu ifade edilerek tanımı yapılır ve diğer halka sınıflarıyla bağlantısı ortaya koyulur. Bundan başka, o halka üzerine kurulan polinom halkası, matris halkası, bölüm halkası, aşikar genişlemesi, Jordan genişlemesi, Dorroh genişlemesi, Ore genişlemesi gibi bir takım genişlemelerde de bu özelliğin sağlanıp sağlanmadığı incelenir. Bu açıdan bakıldığında, bu çalışma yukarıda açıklanan hedefleri kapsamaktadır. 2. Bölümde belirtildiği gibi zayıf SH -terslenebilir halka sınıfı; terslenebilir, α -terslenebilir, α -katı halka sınıflarıyla ilişkili olan yeni bir halka sınıfı oluşturmaktadır. Halkanın zayıf SH -terslenebilir olma özelliğinin taşınabildiği bazı genişlemeleri de 3. bölümde incelenmiştir.

5. Kaynaklar

- Ahmadi, M., Moussavi, A. and Nourozi, V., 2014. On skew Hurwitz serieswise Armendariz rings. *Asian-European Journal of Mathematics*, **7(3)**, 1450036.
- Başer, M., Hong, C. Y. and Kwak, T. K., 2009. On extended reversible rings. *Algebra Colloquium*, **16(1)**, 37-48.
- Cohn, P. M., 1999. Reversible rings. *Bulletin of the London Mathematical Society*, **31**, 641-648.
- Hashemi, E., Moussavi, A., 2005. Polynomial extensions of quasi-Baer rings, *Acta Mathematica Hungarica*, **3**, 207-224.
- Hassanein, A. M., 2007. Clean rings of skew Hurwitz series, *Le Matematiche*, **62(1)**, 47-54.
- Hassanein, A. M., 2012. On uniquely clean skew Hurwitz series, *Southeast Asian Bulletin of Mathematics*, **35**, 5-10.
- Herstein, I. N., 1975. Topics in Algebra, Xerox College Publishing Lexington, Massachusetts Toronto, 1-388.

- Hong, C. Y., Kim, N. Y., Kwak, T. K., 2000. Ore extensions of Baer and p.p-rings, *Journal of Pure and Applied Algebra*, **151(3)**, 215-226.
- Jin, H. L., Kaynarca, F. and Kwak, T. K., Lee, Y. 2017. On commutativity of skew polynomials at zero. *Bulletin of the Korean Mathematical Society*, **54**, 51-69.
- Jordan, D. A., 1982. Bijective extensions of injective rings endomorphism, *Journal of the London Mathematical Society*, **25(3)**, 435-448.
- Kaynarca, F., Yıldırım, M. A., 2020. Reversibility of skew Hurwitz series rings, accepted by *Hacettepe Journal of Mathematics and Statistics*.
- Keigher, W. F., 1975. Adjunctions and comonads in differential algebra, *Pacific Journal of Mathematics*, **59**, 99-112.
- Keigher, W. F., 1997. On the ring of Hurwitz series, *Communications in Algebra*, **25(6)**, 1845-1859.
- Kim, N. K., Lee, Y., 2003. Extensions of reversible rings, *Journal of Pure and Applied Algebra*, **185(1-3)**, 207-223.
- Krempa, J., 1996. Some examples of reduced rings, *Algebra Colloquium*, **3(4)**, 289-300.
- Paykan, K., 2017. Principally quasi-Baer skew Hurwitz series rings, *Bollettino dell'Unione Matematica Italiana*, **10(4)**, 607-616.
- Rege, M. B., Chhawchharia, S., 1997. Armendariz rings, *Proceedings of the Japan Academy, Ser. A, Mathematical Sciences*, **73(1)**, 14-17.
- Yang, G., Liu, Z. K., 2008. On weak reversible rings, *Taiwanese Journal of Mathematics*, **12(1)**, 129-136.

AKÜ FEMÜBİD 20 (2020) 065301 (991-1013)

AKU J. Sci. Eng. 20 (2020) 065301 (991-1013)

DOI: 10.35414/akufemubid.819645

Araştırma Makalesi / Research Article

Bulanık Mantık ile Sanayii Sektöründe ISO 50001 Enerji Yönetim Sistemi Uygulaması

Çetin Önder İNCEKARA ¹¹ BOTAŞ, Transit Boru Hatları Müdürü, Dr., ANKARA.e-posta: cetinincekara@gmail.com. ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-1927-8208>

Geliş Tarihi: 02.11.2020

Kabul Tarihi: 23.12.2020

Öz

Enerji; ülkelerin ekonomik büyümesi için olmazsa olmaz bir unsurdur. Günümüzde sanayide toplam üretim maliyetlerinin %50'sini enerji maliyetlerinin oluşturduğundan şirketlerde enerji maliyetlerini düşürmek ana hedef olmuştur. Bu kapsamda yapılması gereken en önemli uygulama enerji tasarrufuna, verimliliğine yatırımdır. Şirketler enerji kaynaklarını verimli kullanarak enerji maliyetlerini azaltabilirler. Bu durum etkin enerji yönetim sistemi ile mümkün olup sistem şirketler için (enerji maliyetleri açısından) bir zorunluluk olmuştur. Söz konusu çözüm sistemi ise uluslararası standart olan ISO 50001 Enerji Yönetim Standardı (EYS) dir. EYS standardı kapsamında; tesislerin enerji tükettiği önemli ünitelerin, ekipmanların (ısıtma ve soğutma sistemleri, kazanlar, pompalar, kompresörler, türbinler, fanlar, trafolar, motorlar vs.); enerji performansını izlemek için uygun enerji performans indikatörleri-EPI ve Referans Enerji Durumu-RES lerin tanımlanması gereklidir. Ayrıca tesisin enerji kullanımı, enerji tüketimi ile ilgili tesise uygun bir enerji veri periyodu ile baz değerleri belirlenir. Bu yüksek enerji tüketen yerlerin performansındaki her değişimin izlenmesi, yönetilmesi ve iyileştirilmesi anlamına gelmektedir. ISO 50001 EYS standardı kapsamında; elektrik tüketiminin azaltılması için ölçülebilir enerji hedeflerinin konulması ve sürekli iyileştirmelerin izlenmesi gerekmektedir. Çalışmada bir endüstriyel tesisinin ISO 50001 EYS uygulaması Karar Vericilerle (KV) görüşülerek değerlendirilmiş, tesiste enerji tüketen önemli ekipmanların enerji performans indikatörleri-EPI ve Referans Enerji Durumu-RES ler tanımlanmış, ekipmanların enerji verimliliği ve önemli enerji kullanımları (ÖEK) irdelenmiştir. Ayrıca tesiste kullanılan ÖEK formu ile İşletme Kriterleri formu oluşturulurken; çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemi olan Bulanık AHP (Analitik Hiyerarşi Prosesinden), Bulanık TOPSIS ve Bulanık VIKOR yöntemlerinden faydalanılmıştır. ISO 50001 EYS standardı ile endüstriyel tesislerde enerji verimliliğini artırarak küresel ısınma ile sera gazı salınımı sorunlarına çözüm getirmeyi amaçlamaktadır.

Anahtar kelimeler

Enerji Yönetim Sistemi;
Enerji Performans
İndikatörü-EPI;
Referans Enerji
Durumu-RES; Enerji
Yoğunluğu İndeksi-EDI;
Bulanık Mantık

ISO 50001 Energy Management System Application in Industrial Sector with Fuzzy Logic

Abstract

Energy; is the essential for economic development of countries. Today 50% of total production costs in industry are energy costs, therefore reducing energy costs in companies has been the main target. For this purpose the most important step is to make investments on energy saving and increase energy efficiency of equipment. Companies can reduce their energy costs by using their energy resources efficiently. This is only possible by applying an efficient energy management system that become a necessity for companies. The solution of it is to use the international standard ISO 50001 Energy Management Standard(EMS). Within the scope of EMS standard; the important equipment of the plants that consume most of the energy (heating and cooling systems, boilers, pumps, compressors, turbines, fans, transformers, etc.) are required to monitor their energy performance by using Energy Performance Indicators(EPI) and Reference Energy Situation-RES. As per EMS, energy base values are calculated by using an appropriate data period of energy usage and consumption of the facility. This means that high-energy consuming point's performance should be monitored. EMS's aim is to reduce the energy consumption amounts; measurable related targets should be set and the conditions of continuous improvements should be monitored. In the study EMS's applications in one of the industrial

Keywords

Energy Management
System; Energy
Performance Indicator-
EPI; Reference Energy
Situation-RES; Energy
Density Index-EDI;
Fuzzy Logic

plant is evaluated by conducting interviews with Decision Makers(DM); related EPIs and RES are defined, energy efficiency of the equipment and important energy usage(IEU) values are examined by using multi-criteria decision-making methods, i.e. Fuzzy AHP, Fuzzy TOPSIS and Fuzzy VIKOR. By using EMS, it aims to improve the energy efficiencies of the plant and bring solutions to global warming and greenhouse gas emissions.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Enerji; yaşamımızın her alanına girmiş olup yaşamımız içinde olmazsa olmaz temel unsur olmuştur. Ülkemizdeki nüfus artışı, insanın hayat standartlarının yükselmesi, teknolojik cihazların hayatımızın her aşamasında kullanılıyor olması sebebiyle enerji tüketimimiz hızla artmaktadır. Söz konusu enerji tüketimimizdeki artış fosil kaynakları - özellikle doğal gaz ve petrol gibi kaynaklar-kullanarak elde ettiğimiz enerjiden karşılanması sebebiyle hem ülkemiz enerji bakımından yurtdışına bağlı olmakta hem de ülke ekonomimiz üzerinde ağır bir yük oluşturmaktadır.

Türkiye bugüne kadar ekonomisinin büyümesi için ihtiyaç duyduğu enerjiyi yeni enerji kaynakları ile karşılamaya çalışmıştır. Ülkemizin elektrik kayıp ve kaçak oranları % 13,4'e ulaşmış (ETKB 2018) olmasına rağmen bu oranı azaltamamış, enerji tasarrufu ve verimlilik fırsatlarını değerlendirememiştir. Enerjide verimlilik, iklim değişikliği ve çevresel sorunlar, sera gazı salınımı konusu çok az dikkate alınarak enerji ihtiyacımızı karşılamak için çok pahalı fosil yakıtlı enerji santralleri yatırımları yapılmış, enerjideki dışa bağımlılığımız ciddi boyuta ulaşmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1 ISO 50001:2018 Enerji Yönetim Sistemi (EYS)

ISO 50001:2018 EYS kapsamında tesislerin enerji verimliliği, tasarrufu ve buna bağlı çevresel zararları, ilgili maliyetlerinin azaltılması hedeflenerek; tesiste gerekli iyileştirmelerin yapılmasına olanak sağlanır. Tesiste EYS kurulması ile; tesisin çevresel etkilerini, sera gazı, karbon salınımları, enerji maliyetlerinin düşmesi sağlanır. Bu sebeplerden dolayı günümüzde EYS tesisler için (özellikle AB ülkeleri için) bir zorunluluk olmuştur. Altmıştan fazla ülkeden kullanılan ISO 50001 EYS; endüstriyel tesislerde enerji tasarrufu yapılmasını, giderleri düşürülmesini ve çevre gerekliliklerinin karşılanmasını

sağlamaktadır. Bir ürünün maliyetini belirleyen en önemli kalem enerji maliyetidir. EYS ile söz konusu maliyeti kontrol altında tutarak kontrollü bir şekilde enerji tüketimi ve maliyeti azaltılabilir. Özellikle enerji yoğun çalışan sektörlerde ve sera gazı emisyonlarını azaltmak isteyen şirketlerde EYS kullanılması gerekmektedir. EYS ile tesisin enerji maliyetleri, sera gazı, karbon salınımları, çevreye etkisi ve zararı azaltılmış olacaktır.

EYS standardı 09.06.2011 tarihinde yayınlanarak yürürlüğe girmiştir. EYS standardı; tesiste kullanılan diğer yönetim sistemleri ile (ISO 14001:Çevre Yönetim Sistemi, BS EN 16001Enerji Yönetim Sistemi, ISO 9001:Kalite Yönetim Sistemi...) entegre olacak şekilde hazırlanmıştır. EYS amacı; tesis içindeki enerji performansını geliştirmektir. Bunun için gerekli adımları, sistemlerin kurulmasını sağlayarak tesisin enerji verimliliğini, kullanımını, yoğunluğunu ve tüketimini sürekli kontrol altında tutar.

EYS ile tesisin enerji tüketimi konusundaki gelişim performansı (enerji tüketen ekipmanlar/üniteler kontrol altında tutularak) sürekli olarak izlenerek şirket içindeki enerji verimliliği, enerji tüketim bilinci artar. Enerji Yönetim Sistemi ile tesisin uymakla yükümlü olduğu yasal mevzuatlar dikkate alınarak ISO 50001 EYS standardı çerçevesinde bir enerji politikası geliştirilir, ilgili aksiyon planları, adımları oluşturulur ve uygulanır (sürekli performansı izlenerek). Bu süreç yaklaşık olarak minimum 4-6 ay olup ISO14001 Çevre Yönetim Sistemine sahip tesislerde bu süre daha kısadır.

EYS standardı kapsamında çalışılmaya başlanıldığı zaman ilk önce enerji yönetimi çalışma ekibi kurulması gerekir. Devamında üst yönetim ile görüşülerek, onların desteği alınarak bir enerji politikası tespit edilir. Oluşturulacak şirket enerji politikası; minimumda enerji performansının gelişimini sağlamak için izlemeyi, sürekli iyileştirilmesini hedefleyerek tesis ile ilgili yasal

mevzuatlara uygun hareket etmeyi içerir. Enerji yönetimi çalışma takımı; şirketin enerji hedeflerine, yatırım planlarına göre şirket süreçlerini değerlendirip, gözden geçirip, ilgili talimatların hazırlanması çalışmalarını yapacaktır. Bu kapsamda; tesisin enerji tüketiminin detaylı ele alınarak, detaylı bir şekilde irdelenir. Enerji tüketimlerini azaltmak için aksiyon planlarının, enerji performans göstergelerinin, enerji hedeflerinin oluşturulmasını, enerji süreçlerinin, enerji performanslarının sürekli geliştirmelerini, tesisteki enerji kullanım miktarını, işletme maliyetlerini düşürmeyi hedefleyerek tesisin enerji tüketimini hesaplarken, enerji faktörlerinin de (dış ortam sıcaklığı gibi) hesaba katılmasını sağlar.

EYS sistemi kurulduktan sonra ise; şirketin enerji performansı izlenmelidir. Tesisteki enerji tüketim miktarı, enerji yoğunluğu, ekipmanların enerji kullanım miktarı, enerji verimliliği, performansı, sera gazı, karbon salınımları ile ilgili kriterlerin ölçülebilir, denetlenebilir, kontrol altında tutulabilir olduğu sürece şirket enerji hedeflerine ulaşabilecektir. Bu şekilde iyileştirme faaliyetleri amacına ulaşabilecektir. Tüm bu iyileştirmelerin sonucu olarak endüstriyel tesisin enerji verimliliğinin artırılması, enerji verimliliğinin geliştirmesi ve sera gazı emisyonlarının azaltılması sağlanarak, enerji güvenliği artacaktır. EYS; tesisin sera gazı ile enerji maliyetlerinin düşürülmesi için yol göstermektedir, bu şekilde düşük karbon salınımı sağlanarak, sera gazı salınımının düşürülmesi ile tesisin küresel ısınmaya ve çevre kirliliğine etkisi azaltılmış olacaktır. Bu şekilde tesisin çevre ile ilgili yükümlülüklerini yerine getirmesini sağlanarak tesisin “çevre dostu” bir tesis olması sağlanacaktır.

Enerji Yönetim Sisteminde; tesiste enerji verimliliğinin sürekli iyileştirilmesi beklenmektedir. Bu kapsamda tesisin enerji analizinin yapılmasını, enerji tüketim noktalarının tespit edilmesini, tasarruf edilebilecek yerlerde iyileştirmelerin yapılmasını, enerji verimliliğinin artırılmasını ve tesisin çalıştığı süre boyunca sürekli olarak kontrollerin ve iyileştirmelerin devam etmesi zorunludur. Bu doğrultuda “Planla-Uygula-Kontrol Et-Önlem Al (PUKÖ) döngüsünü” uygulamamız, tesis verimliliğini artırmamız ve yenilenebilir enerji kaynakları kullanımının artırılması beklenmektedir.

2.2 ISO 50001 EYS kapsamında Enerji Etüdü

ISO 50001 Enerji yönetim sistemi standardı gereği EYS formlarının aşağıda belirtilen hususları içermesi gerekmektedir:

- Tesisin uymakla yükümlü olduğu mevzuat çerçevesinde yasal zorunluluklar,
- Enerji gözden geçirme talimatı,
- Enerji referans çizgisi,
- Enerji tüketim trendleri,
- Enerji yoğunluğu indeksi,
- Enerji performans göstergeleri,
- Önemli Enerji Kullanımları,
- Amaç, hedefler ve aksiyon planları,
- Gözden geçirmeler

Sanayii sektöründe yukarıda belirtilen hususlar ilgili prosedürler ile izlenmelidir. ISO 50001 Enerji Yönetim Sistemi enerji etüdü kapsamında ilgili sanayii sektöründe oluşturulan prosedürler aşağıda sunulmuştur:

- Doküman Kontrol Prosedürü
- DÖF Prosedürü
- Enerji Etüdü Prosedürü
- Enerji Gözden Geçirme Prosedürü
- Enerji Planlama Prosedürü
- Enerji Referans Çizgisi Oluşturma Talimatı
- Enerji Yönetim Takımı Çalışma Talimatı
- Kalibrasyon ve Doğrulama Prosedürü
- Operasyonel Kontrol Prosedürü
- Satın Alma Prosedürü
- Öneri Prosedürü
- İzleme, Ölçme ve Analiz Prosedürü
- İç Tetkik/Denetim Prosedürü
- İç ve Dış İletişim Prosedürü

ISO 50001 Enerji Yönetim Sisteminde endüstriyel tesislerde enerji etüdü kapsamında doldurulması, takip edilmesi gereken ilgili formlar aşağıda sunulmuştur:

- Bakım Planı Formu
- DÖF Talep Formu
- Enerji Yönetim Sistemi Doküman Master Formu
- Enerji Amaç, Hedef, Aksiyon Planları Formu
- Enerji Performans Göstergeleri Formu
- Enerji Referans Çizgisi Formu
- Enerji Tüketim Formları
- Enerji Tüketim Trendleri Formu

- Enerji Verimliliği Tasarım Projeleri Formu
- EYS Öneri Formu
- Eğitim Planı Formu
- Faaliyet Raporu
- Kalibrasyon ve Doğrulama Planı Formu
- Kritik Operasyon Parametreleri Formu
- Satın Alma ve Tedarikçi Formu
- Teknik Etüt Formu
- Uygunsuzluk DÖF Takip Formu
- Yasal ve Diğer Gereklilikler Formu
- ÖEK Formu
- Öneri Takip ve Değerlendirme Formu
- İletişim ve Farkındalık Planı
- İzleme ve Ölçme Formu
- İç Tetkik/Denetim Plan ve Denetçi Listesi Formu
- İç Tetkik/Denetim Rapor Formu
- İç Tetkik/Denetim Soru Listesi Formu
- İşletme kriterleri Formu

ISO 50001 Enerji Yönetim Sisteminde enerji etüdü kapsamında ilk adımlardan biri tesisin enerji yöneticisini belirlemek diğeri ise tesisteki Önemli Enerji Kullanımları (ÖEK) tanımlanmasıdır. ÖEK olarak; tesiste her bir enerji türü için toplam enerji tüketiminin en az %8'ini tüketen ekipmanlar (ÖEK'ler için enerji tüketim miktarı toplam tüketime bölünür ve %8'den fazla olanlar) seçilir. Her Birim'deki ÖEK'lerin toplamı ilgili enerji türündeki tüketimin en az %80'i olmalıdır. Aynı zamanda ilgili ÖEK'lere ait Enerji Referans Çizgileri oluşturulur. Bu çizgiler, Enerji Yöneticileri tarafından Enerji Referans Çizgisi Oluşturma Talimatına göre oluşturulur ve gerekli koşullarda güncellenerek Enerji Referans Çizgisi Formları'nda kayıt altında tutulur. Seçilen ÖEK'lerde herhangi bir değişiklik olmadığı durumda, ilgili ÖEK'e ait mevcut durumdaki veriler Enerji Referans Çizgisi ile önceki dönemler ile kıyaslanır ve enerji performansındaki değişiklikler tespit edilerek her Yıllık Gözden Geçirme toplantısında değerlendirilir. ÖEK'lere ait Enerji Performans Göstergeleri (EPG), EPG Formu ile takip edilir. Enerji Performans göstergelerini belirlemek ve güncel tutmak; Enerji Yöneticisinin sorumluluğundadır. Enerji Performans Göstergeleri, üniteye ait performans değişkeni ve bu performans değişkeni için gerekli olan enerji tüketimlerinin değerlendirilebileceği, nicel bir değer olarak belirlenir. Enerji gözden geçirme talimatı ile tesisin ölçüm verileri ile enerji kullanım miktarları, ÖEK'ler değerlendirilir, iyileştirilmesi gereken üniteler ve ekipmanlar saptanır.

Ayrıca endüstriyel tesislerde enerji etüdü kapsamında çalışanlar, denetçiler ve uzmanlar tarafından yapılan EYS önerileri; EYS Amaç, Hedef ve

Aksiyon Planı formuna işlenir, yapılacak iş ve işlemler hakkında Enerji Yöneticisi tarafından gerekli süreçler mevzuat çerçevesinde yürütülür ve takip edilir. Bu formu hazırlamak ve güncel tutmak Enerji Yöneticisinin sorumluluğundadır. Enerji Yöneticisi tarafından, bir önceki yıla ait veriler müteakip yılın Ocak Ayı sonunda Yönetim Gözden Geçirme (YGG) toplantısında görüşülmek üzere Yönetim Temsilcisine sunulur. Amaç Hedef Aksiyon Planı formunda EYS önerisi hakkında; amaç, hedef, proje konusu, aksiyon, enerji türü, yatırım sınıfı, tasarruf miktarı (kWh/yıl), tasarruf (TL/yıl), CO2 (ton/yıl), tahmini tasarruf (yıllık) ve gerçekleşen tasarruf (yıllık), yatırım miktarı (TL), geri ödeme süresi (yıl), sorumlu kişi, hedef tamamlanma tarihi, ilerleme durumu, ilgili notlar, engeller, riskler, tasarruf miktarı tahmin methodu, proje tamamlanma tarihi, aksiyonlar için referans yıl tüketimi (kWh/yıl), aksiyon tasarruf oranı (%), hedefler için referans yıl tüketimi (kWh/yıl), hedef tasarruf oranı (%), amaçlar için referans yıl tüketimi (kWh/yıl), amaç tasarruf oranı (%) yer almaktadır.

Ayrıca ÖEK'lar, Enerji Performans Gösterge formu ile düzenli olarak takip edilir. Enerji performans göstergeleri; enerji yoğunluğu, enerji verimliliği, enerji kullanım ile tüketim miktarları v.b. verilerini içerir. ÖEK formu ile önemli enerji kullanıcısının (ÖEK) elektrik ve ısı enerjisi; tüketim-kWh/yıl, toplam tüketim içerisindeki % payı, hedef tüketim-kWh takip edilir. Tüm ÖEK'lerin enerji tüketim analizleri için Önemli Enerji Kullanım Formu kullanılır. Önemli Enerji Kullanım Formunu Enerji Yönetim Takımı gözden geçirir ve tesis Enerji Yöneticisine sunulur. İşletme Kriterleri formu ile önemli enerji kullanıcısının kontrol, metot, beklenti, düzeltici aksiyonu tespit edilir. ÖEK'lar, Enerji Referans Çizgisi formu ile enerji performans değişkeni, enerji tüketimi, beklenen tüketim, Enerji Yoğunluğu İndeksi (EDI) izlenir. Tesisin enerji tüketimi; enerji tüketim formu ile (elektrik (kWh/ay ve TL/ay), doğalgaz (Sm³/ay ve TL/ay)) düzenli olarak aylık takip edilir. Ayrıca her sabah (08:00 gibi) tesisin toplam elektrik tüketim miktarları Enerji İzleme Sisteminden (EİS) alınır ve günlük tüketim tablosuna kaydedilir. Kompresör-türbin paketi gibi kompleks ünitelerde günlük tüketim tablosuna türbin yakıt sarfiyatına etki edecek tüm değerlerin (Rezervuar Ortalama Basıncı, Ortalama Hat Basıncı, Günlük Debi, Ortalama Hava Sıcaklığı, Türbin Çalışma Saati, Harcanan Yakıt Gazı, Gaz Kompozisyonundaki Metanın Yüzdeleri Değeri... gibi) günlük ortalamaları eklenir.

Enerji Tüketim Trendleri formları ile elektrik (tüketim (kWh/yıllara sâri), maliyet (yıllara sâri), ilgili

ayın Ortalama Birim Fiyatı, Hedef kWh (%),doğalgaz (Sm³/yıllara sâri), maliyet (yıllara sâri), ilgili ayın Ortalama Birim Fiyatı, Hedef sm³ (%) aylık olarak takip edilir. (yıllara sâri tüketimler girilir ve tüketim ve maliyetlere ilişkin grafikler oluşturulur.) Kritik Operasyon Parametreleri formu ile ilgili parametrelerin (set, üst limit, alt limit) değerleri, ölçüm cihazı, kalibrasyon aralığı takip edilir. Tesislerde kullanılan diğer prosedür ise; düzeltici ve önleyici faaliyetler prosedürü, iç denetim prosedürü, yönetimin gözden geçirme prosedürü ve formu, operasyon kontrol noktaları formu vb. EYS yönetim sistemi prosedürleri ile formları bulunmaktadır.

Enerji Etüt Prosedürü ile tesisteki enerji tüketim ve enerji performans değişkeni (son üç yıla ait elektrik, doğal gaz, motorin vb.) ile ilgili tüm verilerin toplanması, gerekli durumlarda basit ölçümlerin yapılması ile verimli olmayan ekipmanlar ve üniteler gibi genellikle bakım ve onarım ile ilgili sorunların düşük maliyetli ve sonuçları kısa vadede gözlemlenebilecek çözümlerle giderilmesi amaçlanır. Prosedür kapsamında tüm proseslerin, enerji kullanım miktarları, ÖEK'ler, iyileştirilmesi gereken ekipmanlar saptanmalı, gerekli hesaplar yapılmalıdır. Enerji etüdü sırasında tesisteki şu temel ekipman ve sistemler detaylı incelenir;

- Kazanlar, ısıtma ve soğutma sistemleri,
- Pompalar, kompresörler, türbinler ve fanlar,
- Elektrik ve Doğalgaz Sistemleri,
- Motorin ve Diğer Akaryakıt Tüketimleri ve ilgili Tüketim Kaynakları,
- Elektrik Panoları,
- Elektrik Motorları,
- Trafolar,

EYS enerji etüdü kapsamında; ilk olarak tesisin enerji tüketim miktarları ile ekipmana ve üniteye uygun veri periyodu belirlenerek ilgili referans değerleri belirlenir. Ekipman ve ünitelerin performansındaki her değişim, enerji baz değerine göre ölçülür. Ekipmanın enerji performansını izlemek ve ölçmek için uygun Enerji Performans İndikatörleri-EPI ve Referans Enerji Durumu-RES' ler tanımlanmalıdır. Enerji performans indikatörlerinin değişimini tespit etmek ve güncellemek için yöntemleri kayıt altına alınmalı, sapmalar tespit edilmelidir. Detayları Bölüm 2.3. verilen PUKÖ Döngüsü uygulanmalıdır. ISO 50001 Enerji Yönetim Sistemi standardına göre endüstriyel tesislerde enerji etüdü kapsamında aşağıdaki adımlar atılmalıdır:

- Endüstriyel tesisteki makineleri enerji verimliliğini ve önemli enerji kullanımları (ÖEK) dikkate alınarak; sıcaklık ve basınç ayarları kontrol edilmeli, makinelerin arada kapatılması durumu gözden geçirilmelidir.
- Tesiste satın alma yapılırken enerji verimliliği açısından değerlendirilmelidir.
- Sorumlu anahtar kişilerin belirlenmesi gerekmektedir.
- Tesisteki enerji ile ilgili anahtar özellikler (Enerji Performans İndikatörleri-EPI ve Referans Enerji Durumu-RES) izlenmeli ve ölçülmelidir.
- EYS ilk olarak konu ile ilgili anahtar personele, sonrasında şirket geneline tanıtılmalıdır.
- Tesis ile ilgili tüm çözümlerin en kısası kullanılmalıdır.
- Tesis içi enerji ile ilgili kişiler tanımlanmalı, gerekli eğitimler verilmelidir.
- Tesisin tasarımı sırasında, minimum enerji harcayan verimli ekipmanlar satın alınmalıdır.
- Tesisin EYS standardına uygun kurulması gereklidir.
- Düzenli olarak tesiste denetimlerin gerçekleştirilmesi gereklidir.
- Tesis yönetiminin düzenli olarak gözden geçirmesi gereklidir. Bu şekilde tesis içi iyileştirme çalışmaları, kaynak ihtiyaçları gözden geçirilir, sistemin etkinliğini ve sürekliliğini sağlar.
- Tesiste EYS risklerinin değerlendirilmesi her yıl "Risk Değerlendirme Ekibi" tarafından gerçekleştirilmelidir.
- Tesiste risk değerlendirme ekibinin yapacağı seçim doğrultusunda 5x5 Matris (Tehlike Büyüklüğü * Tehlike Sıklığı) veya Fine Kinney risk değerlendirme metotları kullanılmalıdır.
- İç denetimler, verilerin dokümanite edilmesi, düzeltici ve önleyici faaliyetler, verimlilik kontrolleri vb. EYS prosedürlerine uyularak ilgili formlarının doldurulması sağlanmalıdır.

Tesisin kayıtları, EYS enerji etüdü kapsamında oluşturulan tüm formlar (Enerji Tüketim Formu, Enerji Referans Çizgisi Formu, EPG Formu, Amaç, Hedef ve Aksiyon Planları Formu...) Enerji Yöneticisi tarafından 10 yıl saklanmalıdır.

2.3 Petrokimya Tesisinin Enerji Kullanım Durumu ve Risk Hesabı

Çalışma kapsamında ülkemizdeki bir petrokimya tesisinin EYS uygulaması değerlendirilmiştir. EYS kapsamında tesisin elektrik tüketen önemli ekipmanlarının (kazanlar, brülörler, ısıtma ve soğutma sistemleri, fan-coil üniteleri, pompalar,

kompresörler, türbinler, fanlar, trafolar, motorlar); enerji performansını izlemek için uygun enerji performans indikatörleri-EPI ve Referans Enerji Durumu-RES ler tanımlanmış, ekipmanların enerji verimliliğini ve önemli enerji kullanımları (ÖEK) hesaplanmıştır. Ayrıca yüksek enerji tüketen ekipmanların performansındaki her değişimin izlenmesi, yönetilmesi ve iyileştirilmesi amacıyla; tesisin enerji tüketim miktarlarına uygun bir veri periyodu belirlenerek ekipmanların enerji referans değerleri belirlenmiştir. Bu kapsamda tesisin toplam elektrik tüketim miktarları Enerji İzleme Sisteminden (EİS) alınarak kontrol edilmiş; tesisin enerji hedefleri, referans yıl tüketimi (kWh/yıl), aksiyon tasarruf oranı (%), hedefler için referans yıl tüketimi (kWh/yıl), hedef tasarruf oranı (%), amaçlar için referans yıl tüketimi (kWh/yıl), amaç tasarruf oranı (%) yeniden belirlenmiştir.

Çalışma kapsamında petrokimya tesisinde kullanılan Önemli Enerji Kullanım (ÖEK) formu (Enerji Yönetim Takımı tarafından gözden geçirilmeden önce oluşturulan form) ile İşletme Kriterleri formu (önemli enerji kullanıcısının kontrol, metot, beklenti, saha uygulamaları ile kontrolü, düzeltici aksiyonu için oluşturulan form) oluşturulurken çok-kriterli-karar-verme (ÇKKV) yöntemli olan Bulanık AHP yönteminden faydalanılmıştır.

2.3.1 Bulanık Kümeler Teorisi

Teori ilk; Zadeh (Zadeh 1965) tarafından "Bulanık Kümeler" isimli makalede ele alınmıştır. Zadeh, makalesinde teorinin temel kavramları ile matematiksel özelliklerini incelemiştir. Zadeh tarafından bulanık küme; sürekli bir üyelik fonksiyonuyla (0 - 1 arasında değişen) tanımlanmıştır (Incekara 2019). Yöntemde bir problemin karmaşık olmayan çözümü doğrultusunda yaklaşık olarak modellemesinin yapılması hedeflenmektedir. Bulanık Kümeler teorisinde; karar vericilerden (KV) dilsel değişkenler ile problemin çözümüne katkı sağlaması hedeflenmiştir (Incekara 2020). AHP yöntemi ikili karşılaştırmalar yöntemi olarak kabul edilmekte olup; yöntemde karşılaştırmalar Uzmanlar/Karar Vericiler (KV) yardımıyla uzmanların tecrübelerini yansıtmakta olup karar verme aşamasında seçim

kriterlerini (kriterleri/alt kriterleri) birleştirme seçeneğini sunan bir yöntem olduğu için literatürde çok sık kullanılmaktadır (Incekara 2018). Çalışmada değerlendirmeler; petrokimya tesislerinde tecrübesi olan enerji konusunda uzman kamuda ve özel sektörde çalışan müdür, şef, başmühendis, mühendis, teknisyen, tekniker olan KV'ler tarafından (toplam 29 kişi ile görüşülmüştür) doldurulan anketler ve görüşmeler neticesinde değerlendirilerek, söz konusu formlar oluşturulmuştur.

2.3.2 Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP)

Bulanık AHP (Analytic Hierarchy Process), KV'lerin dilsel değişkenler ile problemi değerlendirmeleri ile problemin çözümüne katkı sağlamları ile AHP (Saaty 2008)'in avantajlarını bünyesinde barındıran bir yöntemdir. Bulanık yöntemin en büyük avantajı problemin çözümünde dilsel değişkenler kullanılması ile çok-kriterli-karar-verme yöntemlerinde karşılaşılan belirsizlikler giderilmektedir. İlk Zadeh ile başlayan bulanık mantık kullanımı sonrasında literatürde çok sık kullanılmış olup çok sayıda çalışma yapılmıştır. Çalışmada kullanılan Bulanık AHP yöntemi ile literatürde pek çok çalışma (Chan et al. 2007, Buckley 2003, Chang 1996, Chen et al. 1992, Chen 2001, Deng 1999, Kahraman et al. 2003, Klir 1995, Ghodsypour 1998, Leung 2000, Shukla 2014, Satrovic 2019, Junior et al. 2014, Thengane 2014, Wang 2008, İncekara 2018, Incekara 2019, Incekara 2020) yapılmıştır. Çalışmanın çözümünde üçgen bulanık sayılardan faydalanılmış olup çalışmada kullanılan dilsel ifadeler, karşılık gelen ilgili bulanık sayıları Çizelge 1'de sunulmuştur.

Çizelge 1. Çalışmada Kullanılan Dilsel ifadeler ve ilgili Bulanık Sayısı.

Dilsel Değişken	İlgili Bulanık Sayı	İlgili Ters Bulanık Sayı
Eşit Önem	[1,1,1]	[1,1,1]
Biraz Daha Önemli	[1,3,5]	[1/5,1/3,1]
Oldukça Önemli	[3,5,7]	[1/7,1/5,1/3]
Çok Önemli	[5,7,9]	[1/9,1/7,1/5]
Son Derece Önemli	[7,9,9]	[1/9,1/9,1/7]

Günlük hayatımızda karar problemleri belirsizlikler içerdiğinden, bu durum dikkate alındığında Bulanık AHP, AHP yöntemine göre daha güvenilir sonuçlar

vermektedir. Bulanık AHP bireysel kararlar yanında grup kararı vermeye uygun bir karar verme yöntemi olma özelliğini taşımaktadır. Çalışmada bulanık sayıların ağırlıklarının hesaplanmak için Bulanık AHP yöntemi adımları aşağıda özetlenmiştir (İncekara 2020).

$K = \{k_1, k_2, \dots, k_p\}$ nesne seti ve $L = \{l_1, l_2, \dots, l_r\}$ amaç seti; her amaç için "r ölçüde" analiz yapılmıştır.

$$X_{hi}^1, X_{hi}^2, \dots, X_{hi}^r \quad (i=1,2,\dots,p; j=1,2,\dots,r) \quad (1)$$

Burada, tüm X_{hi}^j ($i=1,2,\dots,r$) bulanık sayılar olup i için ilgili bulanık sentetik mertebesi formül (2) ile gösterilmiştir.

$$S_i = \sum_{j=1}^r X_{hi}^j \otimes \left[\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^r X_{hi}^j \right]^{-1} \quad (2)$$

$X_1 \geq X_2$ 'nin olabilirlik derecesi formül (3) ile gösterilmiştir.

$$B(X_1 \geq X_2) = \sup_{k \geq t} [\min(\mu_{X_1}(k), \mu_{X_2}(t))] \quad (3)$$

$h \geq t$ ve $\mu_{X_1}(k) = \mu_{X_2}(t)$ durumunu sağlayan (k, t) gibi bir çift varsa; $B(X_1 \geq X_2) = 1$ 'dir. X_1 ve X_2 ; konveks bulanık sayılardır;

$$X_1 \geq X_2 ; B(X_1 \geq X_2) = \mu_{X_1}(e) \quad (4)$$

Burada e, μ_{X_1} ve μ_{X_2} arasında en yüksek kesişim noktası E'nin ordinatıdır.

$X_1 = (a_1, b_1, c_1)$ ve $X_2 = (a_2, b_2, c_2)$ olduğunda; E'nin ordinatı Denklem (5) ile hesaplanır.

$$B(X_2 \geq X_1) = \frac{a_1 - c_2}{(b_2 - c_2) - (b_1 - a_1)} \quad (5)$$

X_1 ve X_2 'nin karşılaştırılmasının yapılabilmesi için $B(X_1 \geq X_2)$ ve $B(X_2 \geq X_1)$ değerlerine ihtiyaç vardır.

$$\begin{aligned} B(X \geq X_1, X_2, \dots, X_f) &= B[(X \geq X_1)] \text{ ve } [(X \geq X_2)] \\ &\text{ve...ve } [(X \geq X_f)] \\ &= \min B(X \geq X_i), \quad (i=1,2,3,\dots,f) \quad (6) \end{aligned}$$

$d'(A_i) = \min B(S_i \geq S_j)$ ve $k = 1,2,3,\dots,v$; $f \neq i$ ağırlık vektörü Denklem (7) ile gösterilmiştir.

$$W' = (d'(Z_1), d'(Z_2), \dots, d'(Z_f))^T \quad (7)$$

"W" bulanık olmayan bir sayı olup; normalize ağırlık vektörü Denklem (8) ile gösterilmiştir:

$$W = (d(Z_1), d(Z_2), \dots, d(Z_f))^T \quad (i=1,2,\dots,f) \quad (8)$$

2.3.3. Bulanık TOPSIS Yöntemi

TOPSIS (The Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) yönteminde; ideal çözümden (pozitif ve negatif) kararların (noktaların) uzaklıkları hesaplanarak sıralaması yapılır. Chen (2000) Bulanık TOPSIS yöntemini seçim probleminin çözümü için kullanmıştır. Bulanık TOPSIS nicel ve nitel çok kriterli karar problemlerinde alternatiflerin seçim sıralama ve değerlendirilmesinde yararlanılan bir karar verme yöntemidir. Bulanık nitelikteki durum ve olaylarda TOPSIS yönteminin kullanılması halinde insan yargı ve düşüncelerini çözüme yansıtma mümkün olmamaktadır. Bulanık TOPSIS; karar problemlerinde bulanık ortamlarda karar verilebilmesine imkân vermektedir. Bulanık TOPSIS ve Bulanık VİKOR yöntemlerinde alternatiflerin sıralaması yapılırken Q ve yakınlık katsayısı (CC_i) indeksinin değerlerine bakılır. VİKOR yönteminde Q_i indeksinin "0" değerine yakın olması, TOPSIS yönteminde ise CC_i'nin "1" değerine yakın olması istenir. Yöntemin uygulanması sırasında karar vericiler, karar kriterleri ve alternatiflerle ilgili değerlendirmelerini dilsel olarak ifade ederler. Karar vericilerin kriterler ve alternatiflerle ilgili değerlendirmeleri bulanık sayılara dönüştürülerek alternatifler için yakınlık derecesi hesaplanır. Hesaplanan yakınlık katsayıları yardımıyla alternatifler sıralanarak çözüm ortaya konur. Çalışmada kullanılan alternatiflerin değerlendirilmesinde kullanılan dilsel ifadeler ile karşılık gelen ilgili bulanık sayıları Çizelge 2'de sunulmuştur (İncekara 2020).

Çizelge 2. Değerlendirilmede Kullanılan Sözel Değişkenler ve ilgili Bulanık Sayısı.

Dilsel Değişken	İlgili Bulanık Sayı
Çok Kötü	[0,0,1]
Kötü	[0,1,3]
Biraz Kötü	[1,3,5]
Orta	[3,5,7]
Biraz İyi	[5,7,9]
İyi	[7,9,10]
Çok İyi	[9,10,10]

Çalışmada bulanık sayıların ağırlıklarını hesaplanmak için Bulanık TOPSIS yöntemi adımları aşağıda özetlenmiştir (İncekara 2020).

w_j^K için j nci karar kriterlerinin önem ağırlığı formül (9) ile gösterilmiştir.

$$\tilde{w}_{ij} = \frac{1}{K} [\tilde{w}_{ij}^1 \oplus \tilde{w}_{ij}^2 \oplus \tilde{w}_{ij}^K] \quad (9)$$

X_{ij}^K nın i nci önem ağırlığı formül (10) ile gösterilmiştir:

$$\tilde{X}_{ij} = \frac{1}{K} [\tilde{X}_{ij}^1 \oplus \tilde{X}_{ij}^2 \oplus \tilde{X}_{ij}^K] \quad (10)$$

Çok kriterli bir karar verme problemi formül (11) ile gösterilmiştir:

$$\tilde{D} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_{11} & \dots & \tilde{x}_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{x}_{m1} & \dots & \tilde{x}_{mn} \end{bmatrix}, \tilde{W} = [\tilde{w}_1, \tilde{w}_2 \dots \tilde{w}_n] \quad (11)$$

Burada \tilde{x}_{ij} ve \tilde{w}_j dilsel değişkenlerdir. $A_1, A_2, A_3, \dots, A_m$, alternatifler, $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ karar kriterleri gösterir. Burada \tilde{W} bulanık matrisi ifade etmektedir, bulanık sayılar ise $\tilde{x}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij})$ ve $\tilde{w}_j = (w_{j1}, w_{j2}, w_{j3})$ dir. Bulanık karar matrisi oluşturulur, sonrasında formül (12) ile gösteren normalize edilmiş karar matrisi (bulanık) elde edilir:

$$\tilde{N} = [\tilde{n}_{ij}]_{p \times r} \quad i=1,2, \dots, p \quad j=1,2, \dots, r \quad (12)$$

Normalize edilmiş karar matrisi (bulanık) hesaplanması; formül (13 ve 14) ile gösterilmiştir.

$$\tilde{n}_{ij} = \left(\frac{a_{ij}}{c_j^+}, \frac{b_{ij}}{c_j^+}, \frac{c_{ij}}{c_j^+} \right), \quad c_j^+ = \max c_{ij} \quad (13)$$

$$\tilde{n}_{ij} = \left(\frac{a_j^-}{c_{ij}^-}, \frac{a_j^-}{b_{ij}^-}, \frac{a_j^-}{a_{ij}^-} \right), \quad a_j^- = \min a_{ij} \quad (14)$$

Formülden de görüleceği gibi normalize edilmiş karar matrisinde (bulanık); bulanık sayı değerleri [0,1] aralığındadır. Kriterlerin önem ağırlığı ile $\tilde{V} = [\tilde{v}_{ij}]_{m \times n}$ şeklinde gösterilen (weighted) ağırlıklandırılarak normalize edilmiş karar matrisi hesaplanır (formül (8) ile).

$$\tilde{v}_{ij} = \tilde{n}_{ij} \cdot \tilde{w}_j \quad (15)$$

\tilde{V} matrisi hesabı; formül (16) ile gösterilmiştir.

$$\tilde{V} = \begin{bmatrix} \tilde{w}_1 \tilde{n}_{11} & \dots & \tilde{w}_r \tilde{n}_{1r} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{w}_1 \tilde{n}_{p1} & \dots & \tilde{w}_r \tilde{n}_{pr} \end{bmatrix} \quad (16)$$

\tilde{V} matrisinin hesabından sonra pozitif ideal çözüm (bulanık) A^+ ile negatif ideal çözüm (bulanık) A^- hesaplanır:

$$A^+ = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_r^+\}$$

$$A^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_r^-\},$$

$$\tilde{v}_j^* = \max_i \{v_{ij3}\} \text{ ve } \tilde{v}_j^- = \min_i \{v_{ij1}\} \quad (17)$$

$i=1,2,3, \dots, p$ ve $j=1,2,3, \dots, r$

ile hesaplanır. Formül (17) ile hesaplanan A^+ ve A^- dan sonra d uzaklıkların formül (18 ve 19) ile hesabı yapılır.

$$d_i^+ = \sum_{j=1}^n d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^+); i=1,2, \dots, p \quad (18)$$

$$d_i^- = \sum_{j=1}^n d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-); i=1,2, \dots, p \quad (19)$$

Vertex metodu kullanılarak ideal çözüme yakınlıkları hesaplanır. İki üçgen bulanık sayı olan $\tilde{A}=(a_1, a_2, a_3)$ ve $\tilde{B}=(b_1, b_2, b_3)$ arasındaki uzaklık(d) hesaplanması; formül (20) ile gösterilmiştir.

$$d_v(\tilde{a}, \tilde{b}) = \sqrt{\frac{1}{3}[(a_1 - b_1)^2 + (a_2 - b_2)^2 + (a_3 - b_3)^2]} \quad (20)$$

Alternatifler arasında karşılaştırma yapılabilmesi için yakınlık katsayıları(CC) hesaplanması; formül (21) ile gösterilmiştir (Chen et al. 2006).

$$CC_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (21)$$

Alternatifler için yakınlık katsayısı CC_i değerlerine göre sıralanarak karar verilir.

2.3.4. Bulanık VIKOR Yöntemi

Vikor yöntemi, Opricovic (1998) tarafından çok ölçütlü kompleks sistemlerin optimizasyonu için geliştirilen Çok Kriterli Karar Verme yöntemlerinden biridir. Yöntemin amacı; alternatiflerin sıralanması ve seçimi aşamasında, maksimum grup faydası (çoğunluk kuralı ile) ve minimum bireysel pişmanlığı

sağlayarak uzlaştırmacı çözüme ulaşmaktır. VIKOR Yöntemi; alternatifler arasından yapılan seçim sürecinde nihai karar üzerinde birden fazla kriterin dikkate alınması zorunluluğunun olduğu haller için önerilmektedir (Opricovic ve Tzeng 2004). Bulanık küme teorisinin VIKOR yöntemine uygulanma sonucu oluşan bulanık VIKOR yöntemi, bulanık çevrede nihai karar üzerinde belirleyici olan ve birbirleriyle çatışan farklı kriterlerin olması durumunda kullanılması uygun olan bir yöntemdir. Söz konusu bu yöntem; bulanık bir ortamda, kriter ve ağırlıklarının her ikisini de bulanıklaştırmaktadır (Opricovic 2011). Opricovic ve Teng (2004) tarafından kullanılan çalışmada kullanılan formüller aşağıda sunulmuştur. Çok Kriterli Karar Verme problemlerinde bulanık VIKOR yönetimi kullanıldığında; problemin çözümünde aşağıda adımlar takip edilir:

Adım 1: “n” sayıda uzman kişiden oluşan bir karar verici grubu oluşturulur.

Adım 2: “k” adet değerlendirme kriteri ve “m” adet alternatif belirlenir.

Adım 3: Bu adımda kriterlerin ve alternatiflerin değerlendirilmesi için uygun dilsel değişkenler belirlenir. Kriter ağırlıklarının ve alternatiflerin önem derecelerinin belirlenmesi için kullanılan dilsel değişkenler ve bunlara karşılık gelen bulanık sayılar Çizelge 3’de gösterilmiştir.

Çizelge 3. Değerlendirilmede Kullanılan Dilsel Değişkenler ve Bulanık Sayı Değerleri.

Kriter Ağırlıkları için Dilsel Değişkenler		Alternatiflerin Derecelendirilmesi için Dilsel Değişkenler	
Dilsel Değişkenler	Bulanık Sayılar	Dilsel Değişkenler	Bulanık Sayılar
Çok Düşük (ÇD)	(0.00, 0.00, 0.10)	Çok Kötü (ÇK)	(0.00, 0.00, 1.00)
Düşük (D)	(0.00, 0.10, 0.30)	Kötü (K)	(0.00, 1.00, 3.00)
Orta Düşük (OD)	(0.10, 0.30, 0.50)	Orta Kötü (OK)	(1.00, 3.00, 5.00)
Orta (O)	(0.30, 0.50, 0.70)	Orta (O)	(3.00, 5.00, 7.00)
Orta Yüksek (OY)	(0.50, 0.70, 0.90)	Orta İyi (Oİ)	(5.00, 7.00, 9.00)
Yüksek (Y)	(0.70, 0.90, 1.00)	İyi (İ)	(7.00, 9.00, 10.00)
Çok Yüksek (Y)	(0.90, 1.00, 1.00)	Çok İyi (Çİ)	(9.00, 10.00, 10.00)

Adım 4: Her bir kriterin ve alternatifin bulanık ağırlıkları formül (22) ve (23) ile eşitlikler yardımıyla hesaplanır. Eşitliklerdeki “n” gruptaki karar verici sayısını ifade etmektedir.

$$\tilde{w}_j = \frac{1}{n} [\sum_{y=1}^n \tilde{w}_j^y], j = 1, 2, \dots, k \quad (22)$$

$$\tilde{x}_{ij} = \frac{1}{n} [\sum_{y=1}^n \tilde{x}_{ij}^y], i = 1, 2, \dots, m \quad (23)$$

\tilde{x}_{ij} , “j” kriterine göre; “i” alternatifinin derecesi ve \tilde{w}_j ise; “j” kriterinin önem ağırlığıdır.

Adım 5: Formül (24) ve (25) yardımıyla problemin bulanık karar matrisi oluşturulur.

$$\tilde{D} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_{11} & \dots & \tilde{x}_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{x}_{i1} & \dots & \tilde{x}_{ij} \end{bmatrix}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (24)$$

$$\tilde{W} = [\tilde{w}_1, \tilde{w}_2 \dots \tilde{w}_n] \quad (25)$$

Burada \tilde{x}_{ij} , j. kriterine göre i. alternatifin derecesi ve \tilde{w}_n ise n.kriterin önem ağırlığıdır.

\tilde{D} ise bulanık karar matrisini ifade etmektedir.

Adım 6: Tüm kriter fonksiyonlarının, bulanık en iyi ve en kötü değerleri belirlenir (i=1,2,...,n). Formül (26) ile eşitliğin en iyi, formül (27) ile eşitliğin en kötü değerlerin hesaplanması için kullanılmaktadır.

$$\tilde{f}_i^* = \max_j x_{ij} \quad (26)$$

$$\tilde{f}_i^- = \min_j x_{ij} \quad (27)$$

Adım 7: \tilde{S}_j ; Formül (28) ile ve \tilde{R}_j ; formül (29) ile j=1, 2, ..., n için hesaplanır.

$$\tilde{S}_j = \sum_{i=1}^m [\tilde{w}_i (\tilde{f}_i^* - x_{ij}) / (\tilde{f}_i^* - \tilde{f}_i^-)], \quad (28)$$

$$\tilde{R}_j = \max_i [\tilde{w}_i (\tilde{f}_i^* - x_{ij}) / (\tilde{f}_i^* - \tilde{f}_i^-)] \quad (29)$$

Burada \tilde{w}_i kriterlerin ağırlığını ve önemini ifade ederken, \tilde{S}_j , “i” alternatifinin bütün kriterlere en iyi bulanık değerlere uzaklığının toplamını, \tilde{R}_j değeri ise

“j.” kriterine göre “i” alternatifinin, bulanık en kötü değerlere maksimum uzaklığıdır.

Adım 8: Maksimum grup faydasını ifade eden $\tilde{S}_j, \tilde{S}_j^*$: Formül (30) ile, \tilde{R}_j, \tilde{R}^* : Formül (31) ile ve \tilde{Q}_i : Formül (32) ile; ilgili değerleri hesaplanır.

$$\tilde{S}^* = \min_i \tilde{S}_i, \tilde{S}^- = \max_i \tilde{S}_i \quad (30)$$

$$\tilde{R}^* = \min_i \tilde{R}_i, \tilde{R}^- = \max_i \tilde{R}_i \quad (31)$$

$$\tilde{Q}_i = v \frac{\tilde{S}_i - \tilde{S}^*}{(\tilde{S}^- - \tilde{S}^*)} + (1 - v) (\tilde{R}_i - \tilde{R}^*) / (\tilde{R}^- - \tilde{R}^*) \quad (32)$$

\tilde{S}^* ; uzlaştırıcı çoğunluk kuralını ve \tilde{R}^* ise farklı görüştekilerin minimum bireysel pişmanlığını ifade etmektedir. Bu hesaplamalardan sonra \tilde{Q}_i indeksi elde edilir; bu indeks grup faydası ile bireysel pişmanlığın birlikte değerlendirilmesi ile hesaplanır. “v” değeri ise, kriterlerin çoğunluğunu veya maksimum grup faydasını (v = 0.5) sağlayan stratejinin önemine dikkat çekerken, “1-v” bireysel pişmanlık değerine karşılık gelmektedir (Opricovic 2011).

Adım 9: Üçgensel bulanık sayılar durulaştırılır ve alternatifler “ \tilde{Q}_i ” indeksine göre sıralanır. Bu indeksin, en küçük değeri en iyi alternatifi gösterir. Bu çalışmada, Hsieh (2004) tarafından önerilen formül (33) eşitliğinde verilen BNP (Best Nonfuzzy Performance Value) durulaştırma yöntemi kullanılmıştır.

$$BNP_i = [(u_i - 1) + (m_i - l_i)] / 3 + l_i \quad (33)$$

Adım 10: Uzlaştırıcı çözümü belirlemek için aşağıda belirtilen iki koşulun uygunluğu kontrol edilir.

1.Koşul: Kabul edilebilir avantaj

$$Q(a'') - Q(a') \geq DQ \quad (34)$$

$DQ = 1 / (m-1)$ (eğer $m \leq 5$ ise $DQ=0.25$); m alternatif sayısını ifade eder.

2.Koşul: Karar vermede kabul edilebilir istikrar Alternatif a', S ve/veya R değerlerine göre yapılan sıralamada en iyi alternatif olmalıdır.

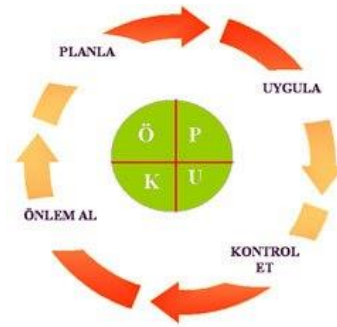
Eğer 1. koşul sağlanmaz ve $Q(a^{(m)}) - Q(a') \leq DQ$ olursa, $a^{(m)}$ ve a' aynı uzlaştırıcı çözüm olur.

Eğer 2. koşul kabul edilmez ve her ne kadar (a') 'nın nispi bir avantajı olsa da, karar vermede tutarsızlık vardır. Bundan dolayı (a') ve (a'') nin uzlaştırıcı çözümleri aynıdır.

Adım 11: “Q” değeri minimum olan en iyi alternatifi seçilir.

2.3.5. PUKÖ Döngüsü

EYS standardı; “Planlanması-Uygulanması-Kontrol Edilmesi-Önlemin Alınması(PUKÖ)” yönetim metodolojisini temel almaktadır. PUKÖ; William Edwards Deming (1982) tarafından geliştirilmiş olup toplam kalite yönetimi kapsamında pek çok çalışması mevcuttur. Deming; kalite kültürünün bir şirket kültürü olması gerektiğini belirtmiştir (Imai 2004). Deming tarafından geliştirilen PUKÖ döngüsü ile; tesis hedeflerinin ne ölçüde ulaşıldığı tespit edilir. ISO 50001 Enerji Yönetim Sistemi ile tesis içindeki ÖEK’ler için yapılan uygulamalarda; yukarıdaki paragrafta detaylı anlatılan Toplam Kalite Yönetimi’nin temellerinden Şekil-1’de gösterilen PUKÖ döngüsü uygulanır.



Şekil 1. PUKÖ Döngüsü

ISO 50001 EYS tesisin enerji ve çevresel performansı için sürekli iyileştirme sürecine (PUKÖ) odaklanır. Şekil 1’ de gösterilen PUKÖ döngüsü kısaca aşağıda özetlenmiştir:

- **Planla:** EYS tesis üst yönetiminin desteği altında bir enerji politikası ile hedefi oluşturularak, çalışma

ekibi kurulması sağlanır. Tesisin belirlenen enerji politikasına uygun olarak tesisteki tüketim değerleri, enerji hedefleri, amaçları, enerji referans çizgisi, EPG'ler ile aksiyon planları oluşturulur.

- **Uygula:** Tesiste enerji hedef ve süreçleri doğrultusunda oluşturulan enerji yönetim faaliyet planları uygulanır. Bu adımda tesis planlarının çalışanlar, üst yönetim, denetleyenler tarafından uygulanması sağlanır.

- **Kontrol et:** Tesiste enerji ile ilgili yapılan değişikliklerin kontrol edildiği bir adımdır. Şirket enerji politikasına ve hedeflerine uygun enerji performansını (Enerji Performans İndikatörleri-EPI ve Referans Enerji Durumu-RES) sağlayan temel karakteristikleri, süreçleri tanımlanır, ilgili kontrol noktalarının raporları oluşturulur.

- **Önlem al:** Tesisin enerji ve çevresel performansı; şirket enerji politikaları kapsamında alınması gereken düzeltici işlemler ile önlemler bu adımda tanımlanmıştır.

EYS standardı; PUKÖ metodolojisi ile tesis içi günlük uygulamaları denetlenerek, iyileştirir.

3. Bulgular

3.1 Uygulama

Çalışmada Bulanık AHP ile Bulanık TOPSIS yöntemleri kullanılarak; bir karar destek sistemi önerilmiştir. Enerji sektöründe çalışanlar(KV) ile bir anket çalışması yapılmıştır. Bu kapsamda petrokimya tesisinde kullanılan Önemli Enerji Kullanım (ÖEK) formu (Enerji Yönetim Takımı tarafından gözden geçirilmeden önce oluşturulan form) ile İşletme Kriterleri formu (önemli enerji kullanıcısının kontrol, metot, beklenti, saha uygulamaları kontrolü, düzeltici aksiyonu için oluşturulan form) oluşturulurken çok-kriterli-karar-verme (ÇKKV) yönteminden faydalanılmıştır; konu Bulanık AHP ve Bulanık TOPSIS kullanılarak araştırılmış, değerlendirilmiştir. Çalışmada; karar vermede etkili olan kriterlerin önem ağırlıkları Bulanık AHP ile belirlenmiş, alternatiflerin sıralaması ise Bulanık TOPSIS yöntemi ile yapılmıştır. Çalışmada enerji sektöründe yönetici olan 28 kişi ile görüşülerek çalışmanın kriter/alt kriterleri (7 ana/32 alt kriterler) belirlenmiştir. Görüşülen kişilerin dağılımı şu şekildedir: özel sektörde çalışan enerji şirketi yöneticilerinin sayısı 15 (7' i 15 yıl ve üzeri, 4'

ü 10-15 yıl, 4' ü 8-10 yıl tecrübeli) dir, ETKB enerji şirketlerinde çalışan yöneticilerinin sayısı ise 13 (5' i 15 yıl ve üzeri, 5' i 10-15 yıl, 3' ü 8-10 yıl tecrübeli) dir. Çalışma kapsamında oluşturulan 7 ana kriterler ve 32 alt kriterleri değerlendirmek için enerjide uzman 65 kişiye yönelik bir anket çalışması (dilsel ifadelerin yer aldığı bir anket çalışması) yapılmıştır. Bulanık AHP (sözel karşılaştırma matrisi oluşturulmuş, değerlerin ortalaması alınmış, bulanık üçgen sayıların geometrik ortalaması bulunmuş, bulanık ağırlık değerleri hesaplanmış, durulaştırılmış, son aşamada normalize edilmiştir) ve Bulanık TOPSIS yöntemleri (kriterler KV'ler vasıtasıyla öncelikleri değerlendirilmiş bulanık sayılara dönüştürülmüş, yakınlık katsayısı hesaplanmış, hesaplanan yakınlık katsayıları yardımıyla alternatifler sıralanarak çözüm hesaplanmıştır) kullanılarak doldurulan anketler ve görüşmeler neticesinde değerlendirilerek, tesisin EYS kontrol formları maddeleri oluşturulmuştur. Çalışmada Bulanık TOPSIS yöntemi kullanılarak, en uygun seçim kararının alınması hedeflenmiştir.

Çalışma kapsamında ilk olarak tespit edilen kriterler Bulanık AHP yöntemi ile ağırlıklandırılmış, sonrasında Bulanık TOPSIS yöntemi ile çözümün alternatif çözümleri ideal çözüme yakınlık değerleri hesaplanarak, çözümlerin öncelik ilişkisi değerlendirilmiştir. Söz konusu alternatifler için ideal çözüm tablosu oluşturulmuş Bulanık TOPSIS yöntemi kullanarak alternatifler sıralanmış ve tesise en uygun EYS kontrol formları, maddeleri (önem sırasına göre) oluşturulmuştur.

Çalışmada uzman KV'lerin değerlendirmeleri sonucunda incelenen Petrokimya tesisinde EYS kapsamında etkili olduğu tespit edilen kriterler (C) ve alt kriterler (CA) Çizelge 4.'te sunulmuştur.

Çizelge 4. Petrokimya tesisi EYS Seçim Kriterleri

Petrokimya Tesisinin EYS Kriterleri ve ilgili Alt Kriterleri

C1.Enerji maliyetleri

C1.1.Yatırım maliyeti (CA1)

C1.2.Ham madde maliyeti (CA2)

C1.3.İşletme maliyetleri (CA3)

C1.4.Enerji verimliliği (CA4)

C1.5.Tesisin çalıştığı süre (CA5)

C2.Enerji durumu

C2.1.Enerji kullanım oranı (CA6)

C2.2.Enerji tasarruf oranı (CA7)

C2.3.Enerji iyileştirmeleri (CA8)

C2.4.Enerji tasarruf planlaması (CA9)

C3.Karlılık

C3.1.Yerli ham madde maliyeti (CA10)

C3.1.Başa-baş noktası (CA11)

C3.1.Üretim maliyeti (CA12)

C3.1.Dışsal maliyetler (CA13)

C4.Performans	
C4.1.Enerji Yoğunluğu İndeksi (EDI) oranı (CA14)	
C4.2.Enerji Tüketim Trendleri (CA15)	
C4.3.Enerji Performans İndikatörleri-EPI (CA16)	
C4.3.Referans Enerji Durumu-RES (CA17)	
C4.4.Önemli Enerji Kullanımı (ÖEK) etkisi (CA18)	
C4.5.Enerji referans çizgisi (CA19)	
C4.6.Enerji gözden geçirmeler (CA20)	
C5.Teknoloji	
C5.1.Kullanılan teknolojinin güvenilirliği (CA21)	
C5.2.Teknolojik iyileştirmeler (CA22)	
C5.3.Kapasite kullanım oranı (CA23)	
C6.Bakım Personelinin Teknik Yeterlilikleri	
C6.1.Teknik bilgi ve uygulama becerisi (CA24)	
C6.2.Öğrenme becerisi (CA25)	
C6.3.Planlama becerisi (CA26)	
C6.4.Bilgilerini güncelleyerek kendini geliştirme (CA27)	
C6.5.Mevzuatları/teknolojiyi yakından takip etme (CA28)	
C6.6.Tecrübe (CA29)	
C7.Çevresel etkiler	
C7.1.Sera gazı salınımı (CA30)	
C7.2.Küresel ısınmaya ve çevre kirliliğine etkisi (CA31)	
C7.3.Atıklar (CA32)	

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
C1	(1,1,1)	(1/7,1/5,1/3)	(1,3,5)	(3,5,7)	(1,3,5)	(1/9,1/7,1/5)	(7,9,9)
C2	(3,5,7)	(1,1,1)	(5,7,9)	(1/9,1/7,1/5)	(1,3,5)	(1/9,1/7,1/5)	(1/9,1/7,1/5)
C3	(1/5,1/3,1)	(1/9,1/7,1/5)	(1,1,1)	(1/9,1/7,1/5)	(3,5,7)	(1/9,1/7,1/5)	(1/9,1/7,1/5)
C4	(1/7,1/5,1/3)	(5,7,9)	(5,7,9)	(1,1,1)	(1/9,1/7,1/5)	(1/5,1/3,1)	(1,3,5)
C5	(1/5,1/3,1)	(1/5,1/3,1)	(1/7,1/5,1/3)	(5,7,9)	(1,1,1)	(1,3,5)	(3,5,7)
C6	(5,7,9)	(7,9,9)	(5,7,9)	(1,3,5)	(1/5,1/3,1)	(1,1,1)	(7,9,9)
C7	(1/9,1/7,1/5)	(5,7,9)	(5,7,9)	(1/5,1/3,1)	(1/7,1/5,1/3)	(1/9,1/7,1/5)	(1,1,1)

Çalışma kapsamında incelenen petrokimya tesisindeki üniteleri aşağıda belirtilmiştir:

- Etilen Üretim Ünitesi (Ü1),
- Aromatik Ürünlerin Üretim Ünitesi (Ü2),
- Klor Alkali (CA) Üretim Ünitesi (Ü3),
- Vinil Klorür Monomer (VCM) Üretimi Ünitesi (Ü4),
- Termoplastik Üretimi Ünitesi (Ü5),
- Alçak Yoğunluk Polietilen (AYPE) Üretim Ünitesi(Ü6),
- Yüksek Yoğunluk Polietilen (YYPE) Üretim Ünitesi(Ü7),
- Polipropilen (PP) Üretimi Ünitesi (Ü8),
- Ftalik Anhidrit (PA) Üretimi Ünitesi (Ü9),
- Tubular Alçak Yoğunluk Polietilen (AYPE-T) Üretimi Ünitesi (Ü10),
- Elyaf Hammadde Üretimi Ünitesi (Ü11),
- Saf Treftalik Asit (PTA) Üretimi Ünitesi (Ü12),
- Etilen Oksit Etilen Glikol(EO/EG) Üniteleri (Ü13).

İncelenen petrokimya tesisindeki söz konusu üretim üniteleri çalışma kapsamında detaylı bir şekilde incelenmiştir. Çizelge 1’de verilen bulanık ikili karşılaştırma ölçeği kullanılarak enerji sektöründe uzman olan karar vericilerin yaptığı değerlendirmelere göre ana kriter ve alt kriterlerin önem ağırlıkları Bulanık AHP yöntemine göre hesaplanmıştır. Çizelge 5’te yer alan ana amaca göre ikili karşılaştırmalar matrisindeki bulanık değerler; AHP yöntemine göre (Denklem (1)...(9) kullanılarak hesaplanmıştır.

Çizelge 5. Ana Kriterlerin Göre Bulanık İkili Karşılaştırmalar Matrisi

Bulanık ikili karşılaştırma matrisleri elde edildikten sonra Bulanık AHP yöntemi ile tüm kriterlerin önem ağırlıkları elde edilmiştir. Bulanık AHP ile elde edilen kriter ağırlıklarına göre Bulanık TOPSIS yöntemi ile KV’ lerle görüşülerek oluşturulan 7 kriter değerlendirilmiş, kriterler arasında sıralama ve seçim gerçekleştirilmiştir. Bulanık VIKOR ve Bulanık TOPSIS yöntemlerinin ilk beş aşaması, karar vericilerin oluşturulması, alternatiflerin ve değerlendirme kriterlerinin belirlenmesi, kriter ağırlıkları ve alternatifler için dilsel değişkenlerin belirlenmesi, bulanık ağırlıkların hesaplanması, bulanık karar matrisinin oluşturulması açısından aynı olmakla birlikte, altıncı aşamadan itibaren iki yöntem farklılaşmaktadır. Bulanık TOPSIS yönteminde yedinci aşamadan itibaren, normalize edilmiş bulanık karar matrislerinin elde edilmesi, ağırlıklı normalize bulanık karar matrisinin hesaplanması, her bir alternatif için bulanık pozitif ideal çözüm ve bulanık negatif ideal çözüm arası uzaklığın hesaplanması, yakınlık katsayılarının hesaplanması, en uygun yakınlık katsayısına ait alternatifin seçilmesi aşamaları takip edilmekte iken, Bulanık VIKOR yönteminde yedinci aşamadan itibaren sırasıyla; tüm kriter fonksiyonlarının en iyi ve en kötü değerlerinin belirlenmesi, bulanık en iyi ve en kötü değerlere uzaklık değerlerinin hesaplanması, diğer hesaplamaların yapılması, bulanık sayıların durulaştırılması, kabul koşullarının kontrol edilmesi ve “Q” değeri en küçük alternatifin seçilmesi aşamaları izlenmektedir. Petrokimya tesisindeki ünitelerin EYS kriterleri seçiminde etkili olan kriterlere göre KV’ lerin değerlendirilmeleri sırasında kullanılan sözel değişkenlerin bulanık değer karşılıkları Çizelge 5’ te sunulmuştur.

Kriterlerin minimum olabilirlik dereceleri belirlenerek; normalize ağırlık vektörü Denklem (8) ile hesaplanmıştır.

$$W=(0,162; 0,171; 0,097; 0,184; 0,141; 0,151; 0,094)^T$$

olarak hesaplanmıştır. Ana kriterler ve ilgili alt kriterlere ait hesaplanan önem ağırlıkları Çizelge 6' da gösterilmiştir.

Çizelge 6. Kriterlerin Önem Ağırlıkları

Kriterler ve ilgili Alt Kriterleri	Ana Kriter Önem Ağırlık	Alt Kriter Önem Ağırlık	Kriter Genel Ağırlık
C1.Enerji maliyetleri	0,162		
C1.1.Yatırım maliyeti		0,236	0,0382
C1.2.Ham madde maliyeti		0,271	0,0439
C1.3.İşletme maliyetleri		0,211	0,0342
C1.4.Enerji verimliliği		0,193	0,0313
C1.5.Tesisin çalıştığı süre		0,089	0,0144
C2.Enerji durumu	0,171		
C2.1.Enerji kullanım oranı		0,241	0,0412
C2.2.Enerji tasarruf oranı		0,275	0,0470
C2.3.Enerji iyileştirmeleri		0,282	0,0482
C2.4.Enerji tasarrufları		0,202	0,0345
C3.Karlılık	0,097		
C3.1.Ham madde maliyeti		0,297	0,0288
C3.1.Başa-baş noktası		0,273	0,0265
C3.1.Üretim maliyeti		0,337	0,0327
C3.1.Dışsal maliyetler		0,093	0,0090
C4.Performans	0,184		
C4.1.Enerji Yoğunluğu İndeksi (EDI) oranı		0,146	0,0269
C4.2.Enerji Tüketim Trendleri		0,126	0,0232
C4.3.Enerji Performans İndikatörleri-EPI		0,145	0,0267
C4.3.Referans Enerji Durumu-RES		0,148	0,0272
C4.4.Önemli Enerji Kullanımı (ÖEK) etkisi		0,165	0,0304
C4.5.Enerji referans çizgisi		0,148	0,0272
C4.6.Enerji gözden geçirmeler		0,122	0,0224
C5.Teknoloji	0,141		
C5.1.Kullanılan teknolojinin güvenilirliği		0,368	0,0519
C5.2.Teknolojik iyileştirmeler		0,429	0,0605
C5.3.Kapasite kullanım oranı		0,203	0,0286
C6.Bakım Personelinin Teknik Yeterlilikleri	0,151		
C6.1.Teknik bilgi ve uygulama becerisi		0,168	0,0254
C6.2.Öğrenme becerisi		0,163	0,0246
C6.3.Planlama becerisi		0,143	0,0216
C6.4.Bilgilerini güncelleyerek kendini geliştirme		0,176	0,0266
C6.5.Mevzuatları/teknolojiyi yakından takip etme		0,172	0,0260
C6.6.Tecrübe		0,178	0,0269
C7.Çevresel etkiler	0,094		
C7.1.Sera gazı salınımı		0,351	0,0330
C7.2.Küresel ısınmaya ve çevre kirliliğine etkisi		0,277	0,0260
C7.3.Atıklar		0,372	0,0350

Toplam

100

Daha sonra bu kriter ağırlıkları kullanılarak Petrokimya tesisindeki Üniteler Çizelge 2'deki ölçeğe göre Bulanık TOPSIS yöntemi ile değerlendirilmeleri yapılmıştır. Petrokimya tesisindeki Ünitelerin pozitif ideal çözüme ve negatif ideal çözüme olan uzaklıkları ve bu değerlerle hesaplanan yakınlık katsayıları hesaplanmıştır. Yakınlık katsayısı 1'e en yakın değer en uygun ve aranan niteliklerdeki Üniteyi ifade ederken "0" değerine en yakın değer ise uygun olmayan Üniteyi ifade etmektedir.

Karar probleminin çözümünde Bulanık AHP ile kriterin önem ağırlıkları bulunduktan sonra Bulanık TOPSIS yöntemi ile alternatiflerin bu kriterlere göre değerlendirilmesi yapılmıştır. Petrokimya tesisindeki ünitelerin kriterlere göre KV'ler tarafından kriterler bazında değerlendirilmesinde kullanılan sözel değişkenlerin bulanık sayı olarak ifadelerine göre üniteler için aşağıdaki Çizelge 7'de görülen bulanık karar matrisi oluşturulmuştur.

Çizelge 7. Bulanık Karar Matrisi

Ünite	CA1	CA2	CA3	CA4	CA5	CA6
Ü1	(0, 1, 3)	(0, 0, 1)	(0, 0, 1)	(0, 1, 3)	(3, 5, 7)	(0, 0, 1)
Ü2	(1, 3, 5)	(0, 0, 1)	(0, 1, 3)	(0, 0, 1)	(3, 5, 7)	(0, 0, 1)
Ü3	(1, 3, 5)	(0, 0, 1)	(0, 1, 3)	(0, 0, 1)	(5, 7, 9)	(0, 0, 1)
Ü4	(1, 3, 5)	(0, 0, 1)	(0, 1, 3)	(0, 0, 1)	(7, 9, 10)	(0, 1, 3)
Ü5	(0, 1, 3)	(0, 1, 3)	(1, 3, 5)	(0, 1, 3)	(7, 9, 10)	(0, 1, 3)
Ü6	(0, 1, 3)	(0, 1, 3)	(0, 1, 3)	(0, 1, 3)	(7, 9, 10)	(3, 5, 7)
Ü7	(0, 1, 3)	(1, 3, 5)	(1, 3, 5)	(1, 3, 5)	(7, 9, 10)	(3, 5, 7)
Ü8	(3, 5, 7)	(0, 1, 3)	(1, 3, 5)	(1, 3, 5)	(3, 5, 7)	(3, 5, 7)
Ü9	(3, 5, 7)	(0, 1, 3)	(3, 5, 7)	(1, 3, 5)	(3, 5, 7)	(3, 5, 7)
Ü10	(3, 5, 7)	(1, 3, 5)	(3, 5, 7)	(0, 1, 3)	(9, 10, 10)	(1, 3, 5)
Ü11	(3, 5, 7)	(0, 1, 3)	(3, 5, 7)	(0, 1, 3)	(7, 9, 10)	(5, 7, 9)
Ü12	(5, 7, 9)	(1, 3, 5)	(1, 3, 5)	(3, 5, 7)	(9, 10, 10)	(5, 7, 9)
Ü13	(3, 5, 7)	(1, 3, 5)	(3, 5, 7)	(3, 5, 7)	(7, 9, 10)	(3, 5, 7)

Çizelge 7'nin devamı

Ünite	CA7	CA8	CA9	CA10	CA11	CA12
Ü1	(0, 0, 1)	(1, 3, 5)	(0, 0, 1)	(0, 1, 3)	(5, 7, 9)	(0, 0, 1)
Ü2	(0, 0, 1)	(1, 3, 5)	(0, 0, 1)	(0, 0, 1)	(0, 0, 1)	(0, 0, 1)
Ü3	(0, 0, 1)	(1, 3, 5)	(0, 0, 1)	(0, 0, 1)	(0, 0, 1)	(3, 5, 7)
Ü4	(0, 0, 1)	(1, 3, 5)	(0, 0, 1)	(0, 1, 3)	(0, 0, 1)	(0, 1, 3)
Ü5	(0, 0, 1)	(1, 3, 5)	(0, 0, 1)	(3, 5, 7)	(5, 7, 9)	(0, 1, 3)
Ü6	(3, 5, 7)	(1, 3, 5)	(0, 0, 1)	(3, 5, 7)	(5, 7, 9)	(3, 5, 7)
Ü7	(0, 1, 3)	(0, 0, 1)	(0, 0, 1)	(0, 1, 3)	(5, 7, 9)	(5, 7, 9)
Ü8	(0, 1, 3)	(0, 0, 1)	(0, 1, 3)	(1, 3, 5)	(0, 1, 3)	(5, 7, 9)
Ü9	(0, 0, 1)	(3, 5, 7)	(0, 1, 3)	(0, 0, 1)	(0, 1, 3)	(3, 5, 7)
Ü10	(0, 1, 3)	(3, 5, 7)	(0, 1, 3)	(0, 0, 1)	(3, 5, 7)	(9, 10, 10)
Ü11	(3, 5, 7)	(3, 5, 7)	(0, 1, 3)	(1, 3, 5)	(5, 7, 9)	(9, 10, 10)
Ü12	(3, 5, 7)	(0, 0, 1)	(1, 3, 5)	(1, 3, 5)	(5, 7, 9)	(5, 7, 9)
Ü13	(3, 5, 7)	(0, 0, 1)	(0, 1, 3)	(0, 0, 1)	(3, 5, 7)	(3, 5, 7)

Çizelge 7'nin devamı

Ünite	CA13	CA14	CA15	CA16	CA17	CA18
Ü1	(0, 1, 3)	(1, 3, 5)	(5, 7, 9)	(5, 7, 9)	(1, 3, 5)	(5, 7, 9)
Ü2	(0, 1, 3)	(5, 7, 9)	(5, 7, 9)	(5, 7, 9)	(1, 3, 5)	(5, 7, 9)
Ü3	(3, 5, 7)	(3, 5, 7)	(5, 7, 9)	(5, 7, 9)	(1, 3, 5)	(5, 7, 9)
Ü4	(0, 1, 3)	(3, 5, 7)	(3, 5, 7)	(3, 5, 7)	(1, 3, 5)	(3, 5, 7)
Ü5	(3, 5, 7)	(5, 7, 9)	(7, 9, 10)	(7, 9, 10)	(3, 5, 7)	(7, 9, 10)
Ü6	(5, 7, 9)	(5, 7, 9)	(5, 7, 9)	(5, 7, 9)	(3, 5, 7)	(5, 7, 9)
Ü7	(0, 1, 3)	(7, 9, 10)	(7, 9, 10)	(5, 7, 9)	(3, 5, 7)	(5, 7, 9)
Ü8	(0, 1, 3)	(7, 9, 10)	(7, 9, 10)	(5, 7, 9)	(3, 5, 7)	(5, 7, 9)
Ü9	(0, 1, 3)	(7, 9, 10)	(9, 10, 10)	(7, 9, 10)	(3, 5, 7)	(7, 9, 10)
Ü10	(3, 5, 7)	(5, 7, 9)	(5, 7, 9)	(5, 7, 9)	(3, 5, 7)	(5, 7, 9)
Ü11	(5, 7, 9)	(3, 5, 7)	(9, 10, 10)	(7, 9, 10)	(5, 7, 9)	(5, 7, 9)
Ü12	(3, 5, 7)	(5, 7, 9)	(5, 7, 9)	(5, 7, 9)	(5, 7, 9)	(5, 7, 9)
Ü13	(5, 7, 9)	(3, 5, 7)	(7, 9, 10)	(5, 7, 9)	(5, 7, 9)	(7, 9, 10)

Çizelge 7'nin devamı

Ünite	CA19	CA20	CA21	CA22	CA23	CA24
Ü1	(1, 3, 5)	(1, 3, 5)	(7, 9, 10)	(5, 7, 9)	(5, 7, 9)	(5, 7, 9)
Ü2	(5, 7, 9)	(1, 3, 5)	(7, 9, 10)	(5, 7, 9)	(5, 7, 9)	(5, 7, 9)
Ü3	(5, 7, 9)	(7, 9, 10)	(9, 10, 10)	(5, 7, 9)	(5, 7, 9)	(9, 10, 10)
Ü4	(5, 7, 9)	(1, 3, 5)	(9, 10, 10)	(7, 9, 10)	(5, 7, 9)	(9, 10, 10)
Ü5	(3, 5, 7)	(3, 5, 7)	(7, 9, 10)	(5, 7, 9)	(9, 10, 10)	(7, 9, 10)
Ü6	(5, 7, 9)	(3, 5, 7)	(7, 9, 10)	(5, 7, 9)	(9, 10, 10)	(7, 9, 10)
Ü7	(3, 5, 7)	(3, 5, 7)	(9, 10, 10)	(5, 7, 9)	(9, 10, 10)	(7, 9, 10)
Ü8	(3, 5, 7)	(3, 5, 7)	(7, 9, 10)	(5, 7, 9)	(9, 10, 10)	(7, 9, 10)
Ü9	(7, 9, 10)	(7, 9, 10)	(7, 9, 10)	(7, 9, 10)	(9, 10, 10)	(7, 9, 10)
Ü10	(5, 7, 9)	(3, 5, 7)	(9, 10, 10)	(5, 7, 9)	(9, 10, 10)	(7, 9, 10)
Ü11	(7, 9, 10)	(7, 9, 10)	(9, 10, 10)	(5, 7, 9)	(3, 5, 7)	(7, 9, 10)
Ü12	(5, 7, 9)	(3, 5, 7)	(9, 10, 10)	(7, 9, 10)	(3, 5, 7)	(7, 9, 10)
Ü13	(5, 7, 9)	(5, 7, 9)	(9, 10, 10)	(5, 7, 9)	(3, 5, 7)	(7, 9, 10)

Çizelge 7'nin devamı

Ünite	CA25	CA26	CA27	CA28	CA29	CA30
Ü1	(7, 9, 10)	(9, 10, 10)	(3, 5, 7)	(0, 1, 3)	(0, 1, 3)	(0, 0, 1)
Ü2	(7, 9, 10)	(9, 10, 10)	(1, 3, 5)	(1, 3, 5)	(0, 1, 3)	(0, 0, 1)
Ü3	(7, 9, 10)	(9, 10, 10)	(3, 5, 7)	(0, 1, 3)	(3, 5, 7)	(0, 1, 3)
Ü4	(7, 9, 10)	(9, 10, 10)	(7, 9, 10)	(3, 5, 7)	(5, 7, 9)	(0, 1, 3)
Ü5	(7, 9, 10)	(9, 10, 10)	(5, 7, 9)	(7, 9, 10)	(3, 5, 7)	(1, 3, 5)
Ü6	(3, 5, 7)	(3, 5, 7)	(9, 10, 10)	(7, 9, 10)	(3, 5, 7)	(0, 1, 3)
Ü7	(7, 9, 10)	(7, 9, 10)	(5, 7, 9)	(3, 5, 7)	(3, 5, 7)	(1, 3, 5)
Ü8	(5, 7, 9)	(7, 9, 10)	(1, 3, 5)	(5, 7, 9)	(7, 9, 10)	(1, 3, 5)
Ü9	(9, 10, 10)	(7, 9, 10)	(3, 5, 7)	(3, 5, 7)	(3, 5, 7)	(1, 3, 5)
Ü10	(9, 10, 10)	(9, 10, 10)	(3, 5, 7)	(9, 10, 10)	(5, 7, 9)	(0, 1, 3)
Ü11	(9, 10, 10)	(9, 10, 10)	(9, 10, 10)	(7, 9, 10)	(3, 5, 7)	(1, 3, 5)
Ü12	(9, 10, 10)	(9, 10, 10)	(7, 9, 10)	(7, 9, 10)	(7, 9, 10)	(1, 3, 5)
Ü13	(9, 10, 10)	(9, 10, 10)	(9, 10, 10)	(9, 10, 10)	(7, 9, 10)	(1, 3, 5)

Çizelge 7'nin devamı

Ünite	CA31	CA32
Ü1	(0, 1, 3)	(0, 1, 3)
Ü2	(0, 1, 3)	(0, 1, 3)
Ü3	(0, 1, 3)	(0, 1, 3)
Ü4	(1, 3, 5)	(1, 3, 5)
Ü5	(1, 3, 5)	(1, 3, 5)
Ü6	(0, 1, 3)	(1, 3, 5)
Ü7	(1, 3, 5)	(0, 1, 3)
Ü8	(1, 3, 5)	(0, 1, 3)
Ü9	(1, 3, 5)	(1, 3, 5)
Ü10	(0, 1, 3)	(1, 3, 5)
Ü11	(1, 3, 5)	(1, 3, 5)
Ü12	(1, 3, 5)	(3, 5, 7)
Ü13	(1, 3, 5)	(3, 5, 7)

Çizelge 8. Normalize Bulanık Karar Matrisi

Ünite	CA1	CA2	CA3	CA4	CA5	CA6
Ü1	(0; 0,1; 0,3)	(0; 0; 0,1)	(0; 0; 0,1)	(0; 0,1; 0,3)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0; 0; 0,1)
Ü2	(0,1; 0,3; 0,5)	(0; 0; 0,1)	(0; 0,1; 0,3)	(0; 0,0; 0,1)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0; 0; 0,1)
Ü3	(0,1; 0,3; 0,5)	(0; 0; 0,1)	(0; 0,1; 0,3)	(0; 0; 0,1)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0; 0; 0,1)
Ü4	(0,1; 0,3; 0,5)	(0; 0; 0,1)	(0; 0,1; 0,3)	(0; 0; 0,1)	(0,7; 0,9; 1)	(0; 0,1; 0,3)
Ü5	(0; 0,1; 0,3)	(0; 0,1; 0,3)	(0,1; 0,3; 0,5)	(0; 0,1; 0,3)	(0,7; 0,9; 1)	(0; 0,1; 0,3)
Ü6	(0; 0,1; 0,3)	(0; 0,1; 0,3)	(0; 0,1; 0,3)	(0; 0,1; 0,3)	(0,7; 0,9; 1)	(0,3; 0,5; 0,7)
Ü7	(0; 0,1; 3)	(1; 0,3; 0,5)	(0; 0,1; 0,3; 0,5)	(0,1; 0,3; 0,5)	(0,7; 0,9; 1)	(0,3; 0,5; 0,7)

Ü8	(0,3; 0,5; 0,7)	(0; 0,1; 0,3)	(0,1; 0,3; 0,5)	(0,1; 0,3; 0,5)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,3; 0,5; 0,7)
Ü9	(0,3; 0,5; 0,7)	(0; 0,1; 0,3)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,1; 0,3; 0,5)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,3; 0,5; 0,7)
Ü10	(0,3; 0,5; 0,7)	(1; 0,3; 0,5)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0; 0,1; 0,3)	(0,9; 1; 1)	(0,1; 0,3; 0,5)
Ü11	(0,3; 0,5; 0,7)	(0; 0,1; 0,3)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0; 0,1; 0,3)	(0,7; 0,9; 1)	(0,5; 0,7; 0,9)
Ü12	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,1; 0,3; 0,5)	(0,1; 0,3; 0,5)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,9; 1; 1)	(0,5; 0,7; 0,9)
Ü13	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,1; 0,3; 0,5)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,7; 0,9; 1)	(0,3; 0,5; 0,7)

Çizelge 8'in devamı

Ünite	CA7	CA8	CA9	CA10	CA11	CA12
Ü1	(0; 0; 0,1)	(0,1; 0,3; 0,5)	(0; 0; 0,1)	(0; 0,1; 0,3)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0; 0; 0,1)
Ü2	(0; 0; 0,1)	(0,1; 0,3; 0,5)	(0; 0; 0,1)	(0; 0; 0,1)	(0; 0; 0,1)	(0; 0; 0,1)
Ü3	(0; 0; 0,1)	(0,1; 0,3; 0,5)	(0; 0; 0,1)	(0; 0; 0,1)	(0; 0; 0,1)	(0,3; 0,5; 0,7)
Ü4	(0; 0; 0,1)	(0,1; 0,3; 0,5)	(0; 0; 0,1)	(0; 0,1; 0,3)	(0; 0; 0,1)	(0; 0,1; 0,3)
Ü5	(0; 0; 0,1)	(0,1; 0,3; 0,5)	(0; 0; 0,1)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0; 0,1; 0,3)
Ü6	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,1; 0,3; 0,5)	(0; 0; 0,1)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,3; 0,5; 0,7)
Ü7	(0; 0,1; 0,3)	(0; 0; 0,1)	(0; 0; 0,1)	(0; 0,1; 0,3)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,5; 0,7; 0,9)
Ü8	(0; 0,1; 0,3)	(0; 0; 0,1)	(0; 0,1; 0,3)	(0,1; 0,3; 0,5)	(0; 0,1; 0,3)	(0,5; 0,7; 0,9)
Ü9	(0; 0; 0,1)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0; 0,1; 0,3)	(0; 0; 0,1)	(0; 0,1; 0,3)	(0,3; 0,5; 0,7)
Ü10	(0; 0,1; 0,3)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0; 0,1; 0,3)	(0; 0; 0,1)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,9; 1; 1)
Ü11	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0; 0,1; 0,3)	(0,1; 0,3; 0,5)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,9; 1; 1)
Ü12	(0,3; 0,5; 0,7)	(0; 0; 0,1)	(0,1; 0,3; 0,5)	(0,1; 0,3; 0,5)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,5; 0,7; 0,9)
Ü13	(0,3; 0,5; 0,7)	(0; 0; 0,1)	(0; 0,1; 0,3)	(0; 0; 0,1)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,3; 0,5; 0,7)

Çizelge 8'in devamı

Ünite	CA13	CA14	CA15	CA16	CA17	CA18
Ü1	(0; 0,1; 0,3)	(0,1; 0,3; 0,5)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,1; 0,3; 0,5)	(0,5; 0,7; 0,9)
Ü2	(0; 0,1; 0,3)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,1; 0,3; 0,5)	(0,5; 0,7; 0,9)
Ü3	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,1; 0,3; 0,5)	(0,5; 0,7; 0,9)
Ü4	(0; 0,1; 0,3)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,1; 0,3; 0,5)	(0,3; 0,5; 0,7)
Ü5	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,7; 0,9; 1)	(0,7; 0,9; 1)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,7; 0,9; 1)
Ü6	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,5; 0,7; 0,9)
Ü7	(0; 0,1; 0,3)	(0,7; 0,9; 1)	(0,7; 0,9; 1)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,5; 0,7; 0,9)
Ü8	(0; 0,1; 0,3)	(0,7; 0,9; 1)	(0,7; 0,9; 1)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,5; 0,7; 0,9)
Ü9	(0; 0,1; 0,3)	(0,7; 0,9; 1)	(0,9; 1; 1)	(0,7; 0,9; 1)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,7; 0,9; 1)
Ü10	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,5; 0,7; 0,9)

Ü11	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,9; 1; 1)	(0,7; 0,9; 1)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,5; 0,7; 0,9)
Ü12	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,5; 0,7; 0,9)
Ü13	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,7; 0,9; 1)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,7; 0,9; 1)

Çizelge 8'in devamı

Ünite	CA19	CA20	CA21	CA22	CA23	CA24
Ü1	(0,1; 0,3; 0,5)	(0,1; 0,3; 0,5)	(0,7; 0,9; 1)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,5; 0,7; 0,9)
Ü2	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,1; 0,3; 0,5)	(0,7; 0,9; 1)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,5; 0,7; 0,9)
Ü3	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,7; 0,9; 1)	(0,9; 1; 1)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,9; 1; 1)
Ü4	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,1; 0,3; 0,5)	(0,9; 1; 1)	(0,7; 0,9; 1)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,9; 1; 1)
Ü5	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,7; 0,9; 1)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,9; 1; 1)	(0,7; 0,9; 1)
Ü6	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,7; 0,9; 1)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,9; 1; 1)	(0,7; 0,9; 1)
Ü7	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,9; 1; 1)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,9; 1; 1)	(0,7; 0,9; 1)
Ü8	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,7; 0,9; 1)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,9; 1; 1)	(0,7; 0,9; 1)
Ü9	(0,7; 0,9; 1)	(0,7; 0,9; 1)	(0,7; 0,9; 1)	(0,7; 0,9; 1)	(0,9; 1; 1)	(0,7; 0,9; 1)
Ü10	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,9; 1; 1)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,9; 1; 1)	(0,7; 0,9; 1)
Ü11	(0,7; 0,9; 1)	(0,7; 0,9; 1)	(0,9; 1; 1)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,7; 0,9; 1)
Ü12	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,9; 1; 1)	(0,7; 0,9; 1)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,7; 0,9; 1)
Ü13	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,9; 1; 1)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,7; 0,9; 1)

Çizelge 8'in devamı

Ünite	CA25	CA26	CA27	CA28	CA29	CA30
Ü1	(0,7; 0,9; 1)	(0,9; 1; 1)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0; 0,1; 0,3)	(0; 0,1; 0,3)	(0; 0; 0,1)
Ü2	(0,7; 0,9; 1)	(0,9; 1; 1)	(0,1; 0,3; 0,5)	(0,1; 0,3; 0,5)	(0; 0,1; 0,3)	(0; 0; 0,1)
Ü3	(0,7; 0,9; 1)	(0,9; 1; 1)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0; 0,1; 0,3)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0; 0,1; 0,3)
Ü4	(0,7; 0,9; 1)	(0,9; 1; 1)	(0,7; 0,9; 1)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0; 0,1; 0,3)
Ü5	(0,7; 0,9; 1)	(0,9; 1; 1)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,7; 0,9; 1)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,1; 0,3; 0,5)
Ü6	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,9; 1; 1)	(0,7; 0,9; 1)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0; 0,1; 0,3)
Ü7	(0,7; 0,9; 1)	(0,7; 0,9; 1)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,1; 0,3; 0,5)
Ü8	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,7; 0,9; 1)	(0,1; 0,3; 0,5)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,7; 0,9; 1)	(0,1; 0,3; 0,5)

Ü9	(0,9; 1; 1)	(0,7; 0,9; 1)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,1; 0,3; 0,5)
Ü10	(0,9; 1; 1)	(0,9; 1; 1)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,9; 1; 1)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0; 0,1; 0,3)
Ü11	(0,9; 1; 1)	(0,9; 1; 1)	(0,9; 1; 1)	(0,9; 1; 1)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,1; 0,3; 0,5)
Ü12	(0,9; 1; 1)	(0,9; 1; 1)	(0,7; 0,9; 1)	(0,9; 1; 1)	(0,9; 1; 1)	(0,1; 0,3; 0,5)
Ü13	(0,9; 1; 1)	(0,9; 1; 1)	(0,9; 1; 1)	(0,9; 1; 1)	(0,9; 1; 1)	(0,1; 0,3; 0,5)

Çizelge 8'in devamı

Ünite	CA31	CA32
Ü1	(0; 0,1; 0,3)	(0; 0,1; 0,3)
Ü2	(0; 0,1; 0,3)	(0; 0,1; 0,3)
Ü3	(0; 0,1; 0,3)	(0; 0,1; 0,3)
Ü4	(0,1; 0,3; 0,5)	(0,1; 0,3; 0,5)
Ü5	(0,1; 0,3; 0,5)	(0,1; 0,3; 0,5)
Ü6	(0; 0,1; 0,3)	(0,1; 0,3; 0,5)
Ü7	(0,1; 0,3; 0,5)	(0; 0,1; 0,3)
Ü8	(0,1; 0,3; 0,5)	(0; 0,1; 0,3)
Ü9	(0,1; 0,3; 0,5)	(0,1; 0,3; 0,5)
Ü10	(0; 0,1; 0,3)	(0,1; 0,3; 0,5)
Ü11	(0,1; 0,3; 0,5)	(0,1; 0,3; 0,5)
Ü12	(0,1; 0,3; 0,5)	(0,3; 0,5; 0,7)
Ü13	(0,1; 0,3; 0,5)	(0,3; 0,5; 0,7)

Bulanık karar matrisi denklem (13) kullanılarak normalize edilmiştir. Bulanık karar matrisinin normalize edilmesinden sonra Çizelge 6'da gösterilen karar kriterlerinin önem ağırlıkları ile çarpılmasıyla ağırlıklı normalize edilmiş bulanık karar matrisi elde edilmiştir. Ağırlıklı normalize edilmiş bulanık karar matrisinden pozitif ideal çözüm ve negatif ideal çözüm noktaları elde edilir. Ağırlıklı normalize edilmiş bulanık karar matrisinden elde edilen bulanık pozitif ideal çözüm ve bulanık negatif ideal çözüm noktaları denklem (17)' e göre hesaplanmıştır.

Bulanık pozitif ideal çözüm ve bulanık negatif ideal çözüm noktalarının belirlenmesinden sonra her alternatifin tüm kriterler için bulanık pozitif ideal çözüm ve bulanık negatif ideal çözüme uzaklıkları hesaplanır. Bulanık sayılar arasındaki uzaklıkların hesaplanmasında petrokimya tesisindeki ünitelerin ilk kritere göre bulanık pozitif ideal çözümden ve bulanık negatif ideal çözüme olan uzaklıkları denklem (20) e göre hesaplanmıştır. Petrokimya tesisindeki ünitelerin diğer karar kriterleri içinde bulanık pozitif ideal çözümden ve bulanık negatif ideal çözüme olan uzaklıklarının aynı şekilde hesaplanması sonucu bulunan değerler hesaplanmıştır.

Ünitelerin bütün kriterler için bulanık pozitif ideal çözümden ve bulanık negatif ideal çözüme olan uzaklıklarının bulunmasından sonra her 13 ünite için d_i^+ ve d_i^- değerleri hesaplanmıştır. Petrokimya tesisindeki ünitelerin yakınlık katsayıları sırasıyla denklem (21)' e göre hesaplanmıştır.

Bulanık VIKOR yönteminin çözümünde, tüm kriter fonksiyonlarının, bulanık en iyi formül (26) ve en kötü değerleri formül (27) no'lu formüllerle hesaplanmıştır. Sonraki adımda; formül (28) ve formül (29) formülleri kullanılarak her bir alternatifin en iyi bulanık ve en kötü bulanık değerlere uzaklıkları hesaplanmıştır. Maksimum grup faydası formül (30) ve minimum bireysel pişmanlık, formül (31) formülleri kullanılarak hesaplanmıştır. Son adımda uzlaşık çözüm veren \tilde{Q}_i formül (32) ile ilgili değerleri hesaplanır. Ayrıca bulanık sayılar durulaştırılarak formül (12); S_i , R_i ve Q_i indeks değerleri hesaplanmıştır. Bulunan indeks değerlerine göre alternatifler arasında küçükten büyüğe doğru bir sıralama yapılmıştır. İndeks değeri en küçük olan en iyi alternatifi göstermektedir. Bulanık VIKOR yöntemine göre; Ü12 ünitesi 1. sırada ve Ü10 ünitesi ise 2. sırada yer almıştır. Ü12 alternatifinin en iyi çözüm olup olmadığını test etmek için Adım 10 'da yer alan iki koşulun uygunluğunda kontrol edilerek, kabul edilebilir avantaj koşulu ise formül (34) ile kontrol edilmiştir. Ü12 alternatifi kabul edilebilir avantaj koşulunu sağlamıştır.

Petrokimya tesisinin ünitelerinin değerlendirilmesi problemi bir sıralama ve seçim problemidir. Modelde öncelikle Petrokimya tesisindeki 13 ünite için seçimde etkili olan ve daha önce belirlenen kriterler, karar verici tarafından dilsel yargılar ile değerlendirilmiştir. Daha sonra bu değerlendirmelerin bulanık sayı karşılıkları ile bulanık karar matrisi oluşturulmuştur. Kriterlerin önem ağırlıklarının belirlenmesinden sonra ünitelerin kriterlere göre dilsel değerlendirmeleri kullanılarak yakınlık katsayıları hesaplanmıştır. Belirlenen kriter ağırlıklarına göre üniteler Bulanık TOPSIS yöntemi ile sıralanmıştır. Ünitelerin yakınlık katsayıları Çizelge 9'da sunulmuştur.

Çizelge 9. d_i^+ , d_i^- ve CC_i Değerlerinin Hesaplanması

	Ü1	Ü2	Ü3	Ü4	Ü5	Ü6
d_i^+	0,719	0,781	0,592	0,583	0,641	0,338
d_i^-	0,257	0,337	0,253	0,324	0,422	0,426
$d_i^+ + d_i^-$	0,976	1,118	0,845	0,907	1,063	0,764
CC_i	0,263	0,301	0,299	0,357	0,397	0,558

Çizelge 9'un devamı

	Ü8	Ü9	Ü10	Ü11	Ü12	Ü13
d_i^+	0,468	0,391	0,219	0,406	0,194	0,294
d_i^-	0,601	0,481	0,326	0,622	0,836	0,709
$d_i^+ + d_i^-$	1,069	0,872	0,545	1,028	1,030	1,003
CC_i	0,562	0,552	0,598	0,605	0,812	0,707

Bulanık TOPSIS yöntemi ile Petrokimya tesisindeki 13 ünite için değerlendirme yapılmıştır. Ü1, Ü2 ve Ü3 bütün kriterler için en kötü puanlamaya sahip petrokimya tesisi içindeki üniteler olurken sırasıyla Ü12, Ü10, Ü11, Ü6 ve Ü8 ise yüksek puanlamaya sahip üniteler olmuştur. Söz konusu üniteler içinden yakınlık katsayısı en yüksek olan (en uygun olan) Ünite 0,812 ile Ü12 olmuştur.

Bulanık TOPSIS ve VIKOR yöntemlerin sonuçları karşılaştırıldığında; her iki yöntemde de 1. sırada Ü12 ünitesi ve 2. sırada Ü10 ünitesi çıkmıştır. Sadece Ü11 ve Ü6 alternatiflerinin sıralamalarında bir değişiklik olduğu gözlenmiştir. Bu bağlamda her iki yöntemin uygulanması sonucunda Ü12 ünitesinin seçilmesi uygun görülmüştür.

Çalışmada risk analizi ise; ilk adımda tehlikeler KV'lerle birlikte saptanarak Fine-Kinney yöntemi ile tehlikelerin risk puanları ve bu puanların karşılık geldiği risk seviyeleri belirlenmiştir. Daha sonra aynı uygulama bulanık Fine Kinney yöntemi ile tekrar hesaplanmıştır. Çalışma kapsamında sahadaki uygulamaların risk takip sistemi revize edilmiş ve operasyon sırasındaki risklerin azaltılması sağlanmıştır. Ayrıca tesiste uygulanan acil durum planının uygulama adımlarının ve ilgili iş aktivitesi risk analizlerinin üzerinden geçilmiş bu kapsamda tesiste uygulanan tatbikatlara (2 adet) ilave olarak yılda en az bir defa elektrik yangınları ile ilgili tatbikat yapılmasına karar verilmiştir.

ISO 50001 EYS standardı endüstriyel tesislerde enerji verimliliğinin sürekli iyileştirilmesini, geliştirilmesini hedeflemekte; sera gazı ile karbon salınımları vb. çevresel sorunlara çözüm getirmeyi de amaçlamaktadır. Bu kapsamda; elektrik tüketiminin azaltılması için ölçülebilir enerji hedeflerinin konulması, sürekli iyileştirmelerin izlenmesi kapsamında; PUKÖ yönetim metodolojisi ile tesis içi günlük faaliyetler gözden geçirilmiştir. ISO 50001 EYS standardı sayesinde tesisler; LEED (Enerji ve Çevre Dostu Tasarımda Liderlik) in enerji verimliliği, düşük enerji tüketim oranı ve tasarruf kriterlerini sağlayarak dünya çapında geçerli saygın, çevre ve enerji verimlilik sertifikası olarak kabul

edilen LEED-Gold sertifikasını kolaylıkla alabilmektedir.

4. Tartışma ve Sonuç

Ülkemizde AB mevzuatına uyum kapsamında hazırlanan "Enerji Kaynaklarının ve Enerjinin Kullanımında Verimliliğin Artırılmasına dair Yönetmelik(2011)" in (değişiklik 27.01.2020) 18. maddesinde a bendinde yer alan "ISO 50001 Enerji Yönetim Sistemi-Kullanım Kılavuzu ve Şartlar Standardı belgesine sahip olma" ve birinci madde kapsamında "endüstriyel işletmenin üç yıl içerisinde enerji yoğunluğunu ortalama olarak en az % 10 oranında azaltmayı taahhüt etmesi" ana şartları aranmaktadır. ISO 50001 Enerji Yönetim Sisteminin endüstriyel tesislerde kullanıldığı zaman hem söz konusu şartı sağlamayı hem de aşağıda belirtilen hususların sağlanmasını garanti altına almış oluruz:

- Şirketin enerji ve çevre politikası resmîyet kazanır.
- Tesisin enerji maliyetleri azaltarak enerji verimliliğini artırır. Tesisteki enerji tüketimi belirlenerek; EYS sistemi ile sistematik bir yaklaşım ile enerji maliyetleri azaltılır.
- Tesisin seragazı emisyonları ve çevresel etkileri azaltılarak yasal yükümlülöklere, ilgili mevzuatlara uyumu garanti altına alınır.
- Tesisin enerji risklerini belirlendiği için enerji temininde güveni artırır.
- Tesisteki teknik çözümlere sistematik bir yaklaşım sağlayarak, ilgili çözümleri önceliklendirerek enerji kullanım miktarlarını azaltarak tesisin verimliliğinin artırılmasına katkı sağlar.
- Üst yönetimin katılımı ile enerji yönetimi tesis için yapılacak yatırımların ivedilikle yapılması sağlar.
- Şirket içinde yürütölen enerji politikalarını resmileştirir.
- Çevre korunarak, kaynakların etkin kullanımı sağlanır.
- Enerji Yönetim sistemi mevcut yönetim sistemleri ile entegre edilerek bir kurum kültürü oluşur.
- Tesisin karbon salınımını azaltarak daha çevreci bir tesis olmasını sağlar.
- Tesiste kullanılması planlanan diğere uluslararası yönetim sistemleri ile (BS EN 16001 Enerji Yönetim Sistemi, ISO14001 Çevre Yönetim Sistemi, ISO9001

Kalite Yönetim Sistemi,...) uyumludur, kolayca uygulanabilir.

EYS sayesinde endüstriyel tesisteki makinelerin enerji verimliliğini ve önemli enerji kullanımları (ÖEK) dikkate alınarak; basınç ayarları, sıcaklık ayarları, operasyonel kontrol kriterleri gözden geçirilir. Tesisteki enerji verimliliği artırarak, tüketilen enerjide tasarruf edilmesini ve çevre etki ve maliyetlerinin azaltılmasını, enerji performanslarının geliştirilmesi için gerekli sistemlerini ve proseslerini kurulmasını sağlar. Söz konusu EYS ile; tesisin yol açtığı çevresel etkiler, sera gazı ile karbon salınımları, ilgili enerji maliyetlerinin düşmesi sağlanır. Tesisteki enerji ile ilgili ÖEK'lerin anahtar özellikler (Enerji Performans İndikatörleri-EPI ve Referans Enerji Durumu-RES) sorumlu anahtar kişilerin belirlenmesi ile izlenir, ölçülür ve takip edilir. Çalışmada bir petrokimya tesisinin ISO 50001 Enerji Yönetim Sistemini uygulaması değerlendirilmiş, tesiste enerji tüketen önemli ekipmanların enerji performans indikatörleri-EPI ve Referans Enerji Durumu-RES ler tanımlanmış, ekipmanların enerji verimliliği ve önemli enerji kullanımları (ÖEK) hesaplanmış ve irdelenmiştir. Ayrıca yüksek enerji tüketen ekipmanların performansındaki her değişimin izlenmesi, yönetilmesi ve iyileştirilmesi amacıyla; tesisin enerji tüketim miktarlarına uygun bir veri periyodu belirlenerek ekipmanların enerji referans değerleri hesaplanmıştır. Bu kapsamda tesisin toplam elektrik tüketim miktarları Enerji İzleme Sisteminden (EİS) alınarak kontrol edilmiş; tesisin enerji hedefleri, referans yıl tüketimi, aksiyon tasarruf oranı, hedefler için referans yıl tüketimi, hedef tasarruf oranı, amaçlar için referans yıl tüketimi, amaç tasarruf oranı yeniden belirlenmiştir. Tesisin elektrik tüketiminin azaltılması için ölçülebilir enerji hedeflerinin konulması, sürekli iyileştirmelerin izlenmesi kapsamında; PUKÖ yönetim metodolojisi ile tesis içi günlük uygulamaları gözden geçirilmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında; ülkemizde bir petrokimya tesisinde kullanılan Önemli Enerji Kullanım (ÖEK) formu ile İşletme Kriterleri formu oluşturulurken çok-kriterli-karar-verme (ÇKKV) yöntemlerinden Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesinden (AHP) yönteminden faydalanılmıştır

(ÇKKV yöntemler içinde çok sık kullanıldığından bu yöntem seçilmiştir). Bulanık AHP yönteminde karşılaştırmalar Karar Vericiler (KV) yardımıyla uzmanların tecrübelerini yansıtmakta olup karar verme aşamasında seçim kriterlerini (kriterleri/alt kriterleri) birleştirme seçeneğini sunan bir yöntem olduğu için literatürde çok sık kullanılmaktadır. Çalışmada değerlendirmeler; petrokimya tesislerinde tecrübesi olan enerji konusunda uzman kamuda ve özel sektörde çalışan müdür, şef, başmühendis, mühendis, teknisyen, tekniker olan KV'ler tarafından doldurulan anketler ve görüşmeler (toplam 24 kişi ile görüşülmüştür) neticesinde Bulanık AHP ve Bulanık TOPSIS yöntemleri ile değerlendirilerek, söz konusu formlar oluşturulmuştur. Oluşturulan formlar sahada EYS için kontrol listesi olarak da kullanılmıştır. Bu kapsamda tesiste çalışanlar için gerekli EYS eğitimleri planlanmış, tesis kontrollerinin geliştirilmesi adına önleyici bir yapı (proaktif bir anlayışla) ile yürütülmesi sağlanmıştır.

Çok-kriterli-karar-verme (ÇKKV) yöntemlerinde; karar problemlerinin çözümünde nicel bilgi ve kriterler yanında nitel bilgi ve kriterler de kullanılmaktadır. Ancak problemlerin yapısı gereği karar vericilerin sübjektif değerlendirmeleri ve nitel bilgilerin bulunması halinde karar ortamı bulanıklaşmaktadır. Bulanık mantık ve bulanık küme teorisi kesin olmayan bulanık bilgilerin kullanılmasına ve matematiksel modeller kurulmasına imkân sağlamaktadır. Bir karar problemi olarak bir petrokimya tesisindeki 13 ünite için değerlendirmesi yapılmıştır. Ünitenin seçiminde nitel kriterlerin bulunması ve karar vericilerin sübjektif değerlendirmeleri nedeniyle belirsizlik ve bulanıklık içermektedir. Bu nedenle ünitenin seçiminde bulanıklık içeren kriterler bulanık mantık ve dilsel değişkenlerin kullanılması ile modellenerek karar sürecine katılmıştır. Önerilen karar destek modeli ile daha gerçekçi bir karar analizi yapılmıştır. Çalışmada petrokimya tesisindeki ünite seçimi karar probleminin ve benzer problemlerin çözümü için Bulanık AHP ve Bulanık TOPSIS yöntemlerinin birlikte kullanıldığı bir karar destek modeli önerilmiştir. Önerilen modelde ünitenin seçiminde etkili olan ana kriter ve alt kriterler dilsel değişkenler kullanılarak bulanık sayılar ile karşılaştırılmış ve

önem ağırlıkları hesaplanmıştır. Daha sonra KV'ler kriterlere göre ünitelerin dilsel değişkenler kullanılarak bulanık sayılar ile değerlendirilmesi yapılmıştır. Bulanık TOPSIS yöntemi alternatifleri kendi arasında pozitif ideal çözüm ve negatif ideal çözüm noktalarını dikkate alarak değerlendirmiştir. TOPSIS yöntemi alternatifleri kendi aralarında değerlendirmektedir. Diğer bir ifadeyle en yakın ve en uzak geometrik uzaklıkları referans olarak çözümleme yapmaktadır. Dolayısıyla idealize çözümlere göre değerlendirme yapmak yerine hazırda bulunan alternatif değerleri kullanılmaktadır. Karar probleminde alternatifler ideal pozitif çözüm ve ideal negatif çözüm noktalarına göre sıralanmıştır. Bulanık TOPSIS ve Bulanık VIKOR yöntemlerinde alternatiflerin sıralaması yapılırken Q ve yakınlık katsayısı (CC_i) indeksinin değerlerine bakılır. VIKOR yönteminde Q_i indeksinin "0" değerine yakın olması, TOPSIS yönteminde ise CC_i 'nin "1" değerine yakın olması istenir. Bulanık TOPSIS ve Bulanık VIKOR yöntemlerine göre petrokimya tesisindeki her bir ünite için hesaplanan yakınlık katsayılarına göre üniteler arasından seçim yapılmıştır. Çalışmada bulanık mantık kullanılarak bütünleşik bir karar destek modeli olarak kullanılan yöntemin nitel karar kriterlerinin bulunduğu bulanık karar problemlerinde uygulanarak EYS kontrol formları oluşturulmuştur.

Çalışma kapsamında ülkemizdeki bir uluslararası bir enerji tesisinde enerji ile ilgili kaza risklerini düşürmek için alınması gereken eylemler, alınması gereken ilave tedbirler, ilgili EYS için kontrol formları oluşturulurken çok-kriterli-karar-verme (ÇKKV) yöntemi olan; Bulanık AHP ile Bulanık TOPSIS yöntemlerinden faydalanılmıştır. Bulanık AHP (sözel karşılaştırma matrisi oluşturulmuş, değerlerin ortalaması alınmış, bulanık üçgen sayıların geometrik ortalaması bulunmuş, bulanık ağırlık değerleri hesaplanmış, durulaştırılmış, son aşamada normalize edilmiştir) ve Bulanık TOPSIS yöntemleri (Alternatiflerin ideal çözüme (pozitif ve negatif değerlere) uzaklıkları ile bu değerlerle hesaplanan yakınlık katsayıları hesaplanmıştır. Yakınlık katsayısı; hesaplanan seçenek bir civarındaki (veya bire en yakın olan) değer en uygun ve aranan niteliklerdeki çözümü ifade ederken; '0' değerine en yakın değer

ise uygun olmayan çözümü ifade etmektedir) kullanılarak doldurulan anketler ve görüşmeler neticesinde değerlendirilmiştir. Kontrol listesindeki kriterlerinin ağırlıkları Bulanık AHP yöntemi ile belirlenirken, sıralaması Bulanık TOPSIS yöntemi ile yapılmıştır. Çalışmada Bulanık TOPSIS yöntemi kullanılarak, en uygun seçim kararının alınması hedeflenmiştir. Çalışmada petrokimya tesisindeki 13 ünite için kriterlerin önem ağırlıklarının belirlenmesinden sonra ünitelerin kriterlere göre dilsel değerlendirmeleri kullanılarak yakınlık katsayıları hesaplanmıştır. Belirlenen kriter ağırlıklarına göre üniteler Bulanık TOPSIS yöntemi ile sıralanmıştır. Ünitelerin yakınlık katsayıları hesaplanarak Çizelge 9'da sunulmuştur. Bulanık TOPSIS yöntemi ile Petrokimya tesisindeki 13 ünite için değerlendirme yapılmıştır. Ü1, Ü2 ve Ü3 bütün kriterler için en kötü puanlamaya sahip petrokimya tesisi içindeki üniteler olurken sırasıyla Ü12, Ü10, Ü1, Ü6 ve Ü8 ise yüksek puanlamaya sahip üniteler olmuştur. Söz konusu üniteler içinden yakınlık katsayısı en yüksek olan (en uygun olan) Ünite 0,812 ile Ü12 olmuştur.

İncelenen Petrokimya tesisinin üniteleri EYS kriterleri altında seçim problemi; Bulanık VIKOR ve Bulanık TOPSIS yöntemleriyle çözümü neticesinde, Ü12 ünitesinin diğer alternatifler arasında birinci sırada seçilmiştir. Bulanık TOPSIS ve VIKOR yöntemiyle elde edilen sonuçların sıralaması birbirine çok yakındır. Her iki yöntemde; 1. sırada Ü12 ünitesi ve 2. sırada Ü10 ünitesi çıkmıştır. Sadece bulanık VIKOR yönteminde üçüncü ve dördüncü üniteler olan Ü11 ve Ü6 alternatiflerinin sıralamalarında bir değişiklik olduğu gözlenmektedir. Bunun sebebi ise alternatiflerin sıralanması ve seçim aşamasında, maksimum grup faydası (çoğunluk kuralı) ve minimum bireysel pişmanlığı sağlayacak uzlaştırıcı çözüm aranmasıdır. ÇKKV tekniği olan TOPSIS ve VIKOR yöntemlerinin her ikisi de "ideal çözüme yakınlık" referans noktasına dayanmaktadır. VIKOR lineer normalizasyonu kullanırken TOPSIS vektör normalizasyonunu kullanmaktadır.

Endüstriyel tesisler için risk değerlendirmesi; risk ve tehlike seviyesine göre değişmekte olup çok tehlikeli seviyede en geç iki yılda bir, tehlikeli seviyede dört yılda bir, az tehlikeli tesislerde altı yılda bir

yenilenmelidir. Tesiste enerji ile ilgili kazaları önlemek için gerekli sorumluluk ve kontrol bilinci, tesisin enerjilendirilmesi ile ilgili birim sorumlularından başlayarak en alt birimde tüm kademedeki personele verilmesi sağlanmıştır. Çalışma kapsamında ülkemizdeki uluslararası enerji tesisinin risk ve tehlike seviyeleri yeniden gözden geçirilerek, gerekli değişiklikler ile düzenlemeler yapılmıştır.

Endüstriyel tesislerde tehlikeli riskler; 5x5 Risk Matrisi ile Fine Kinney Metodu'na göre değerlendirilir. 5x5 Matris Metodu'nda tesisin risk değerlendirmesi; risk değerlendirme ekibinin "Tehlike Büyüklüğü" ve "Tehlike Sıklığı" puanlamasına göre "Risk Derecelendirme Matrisine" göre hesaplanır. Çıkan risk seviyesi "Riski Kontrol Altına Alma Yöntemleri" ile tesisin, ilgili ünitenin risk seviyesi düşürülmelidir. Fine Kinney Metodu'nda tesisin risk değeri; $R = O \times S \times \xi$ (R: Risk, O: Olasılık, S: Sıklık, ξ : Şiddet) ile hesaplanır. Bu yöntemde hesaplanan "R: Risk Değeri"ne göre risk düşürme eylem planı uygulanmalıdır. Endüstriyel tesiste "riski düşürme eylem planı" kapsamında; alınacak önlemlerde öncelik hiyerarşisine uygun bir eylem planı (tedbirler alma, ortadan kaldırma, mühendislik kontrolleri ve uygulamalar, ikame eylem yöntemleri, dikkatle izleme, işaret ve uyarı levhaları kullanma, saha kontrolleri, işe özel kişisel koruyucu donanım kullanma, detaylı uygulama planı (MoS) hazırlama ve uygulama, çalışmaya ara verme) ile riskin durumu ile ilgili "takip sistemi" oluşturularak risklerin azaltılması sağlanmalıdır. Endüstriyel tesisteki EYS performansı düzenli bir şekilde ilgili prosedürler doğrultusunda izlenmeli, ölçülmeli ve üst yönetime düzenli olarak raporlanmalıdır. Çalışma kapsamında ülkemizdeki bir uluslararası enerji tesisinin risk değerlendirmesi yapılmıştır. Tesiste yapılan çalışmaların; Fine Kinney Metodu ile (klasik ve bulanık yöntemler kullanarak) Risk Değerleri hesaplanmıştır. Çalışmada risk analizi için ilk adımda tehlikeler (KV' lerle birlikte) saptanarak Fine Kinney yöntemi ile tehlikelerin risk puanları ve bu puanların karşılık geldiği risk seviyeleri belirlenmiştir. Daha sonra aynı uygulama bulanık Fine Kinney yöntemi ile tekrar hesaplanmış ve değerlendirilmiştir. Çalışmada girdiler ve çıktı karar kurallarında detayları Bölüm 2.3.2. de verilen

Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesinden (AHP) yönteminden faydalanılmıştır. Bu kapsamda tesiste riskli ve çok tehlikeli bölgeler enerji altında kıvılcım ve kaza riskini (Zone 0) düşürmek için alınması gereken eylemler, gözden geçirilerek, ilave tedbirler (sahada alınan tedbirler, riski ortadan kaldırma eylem planları, eylemlerin dikkatle izleme, eğitimler planlama, var olan işaret ve uyarı levhaları yenilerinin eklenmesi, saha uygulama planı (MoS) gözden geçirilerek ilaveler yapılmıştır) irdelenmiştir. Değerlendirme sonucu "Risk Değeri: R" $R > 400$ olan "Çok Yüksek Risk" olan EYS iş aktivitelerinde (yüksek gerilim kontrol rölesi ve devre bağlantısı, topraklaması kapsamında) çalışmaya ara verilerek derhal tedbir alınmıştır. "Riski Kontrol Altına Alma Yöntemleri" nde yer alan "Kontrol Altına Alma Yöntemleri" vasıtasıyla "Çok Yüksek Risk" seviyesindeki önlemler vasıtasıyla (sahada alınan önlemler: devre kesiciler, sigortalar, topraklama, aşırı akım rölesi, ikaz regülatörü önlemleri, gerekli eğitimler, işbaşı eğitimleri, ilave KKD ve uyarı levhaları, DF, acil durum planlaması ve ilave tatbikatlar, çalışma koşullarının iyileştirilmesi, işbaşı performans ölçümü ve izleme) ile risk kontrol altına alınmış ve risk seviyesi "Önemli Riskler" seviyesine düşürülmüştür. Tesiste uygulanan acil durum planının uygulama adımları ve ilgili iş aktivitesi risk analizleri gözden geçirilmiş; bu kapsamda tesiste uygulanan tatbikatlara (2 adet) ilave olarak yılda en az bir defa elektrik yangınları ile ilgili tatbikat yapılmasına karar verilmiştir. Tesisin PUKÖ metodolojisi ile uygulamalar denetlenerek, sahadaki uygulamaların risk takip sistemi revize edilmiş, ilgili iyileştirmeler yapılmış ve operasyon sırasındaki risklerin azaltılması sağlamak amacıyla; işletmenin yıllık aksiyon planları revize edilerek, ilgili adımlar revize edilmiştir. Ayrıca iş aktivitelerinin risk değerlendirmesi sonucu; tesiste pek çok aktivitenin "çok tehlikeli" sınıfta olduğu tespit edilmiştir. Bu kapsamda özellikle tesisler enerji altındayken kıvılcım ve kaza riskini (Zone 0: gazlı ortam) düşürmek için alınması gereken önlemler için işletmecilerle firma yetkilileri ile görüşülmüş, söz konusu aktivitenin yılda bir değerlendirmesinin yeniden yapılmasına, gözden geçirilmesine karar verilmiştir. 2011 yılında yürürlüğe giren (Değişik: 27.01.2020) "Enerji Kaynaklarının ve Enerjinin Kullanımında

Verimliliğin Artırılmasına dair Yönetmelik” in beşinci bölümünde ise “Endüstriyel İşletmelerde Verimlilik Artırıcı Projelerin (VAP) Desteklenmesi” ile ilgili başvuru, değerlendirme, desteklerin uygulanması esasları detaylı anlatılmaktadır. (destek proje bedeli KDV hariç bir milyon Türk Lirasıdır) Ülkemizdeki endüstriyel tesislerin ISO 50001 Enerji Yönetim Sistemine geçmesi ile AB destekli VAP Projelerine kolayca başvurulabilecek ve söz konusu VAP desteğinin kısa sürede alınması için diğer ülkelerin projelerinden birkaç adım önde olacaktır.

2017 yılında ülkemizdeki sanayi tesislerinde toplam 485 enerji verimliliği projesi gerçekleştirilmiş olup 111.722 TEP (ton eşdeğer petrol) tasarruf edilmiştir (645.474 ton karbondioksit salınımı azaltılmıştır). Ülkemizde son yıllarda enerji verimliliği açısından çok önemli gelişmeler sağlanmasına rağmen hâlâ AB'nin (özellikle Almanya, İngiltere...) gerisindeyiz ve pek çok sanayii tesisinde iyileştirmelerin yapılması gerekmektedir. Ayrıca endüstriyel tesisler sahip oldukları ISO 50001 Enerji Yönetim Sistemi belgesi sayesinde; tesislerinin enerji verimliliğinin iyileştirilmesine ilişkin projeler kapsamında ETKB, AB ve Dünya Bankası tarafından verilen çeşitli kredi ve hibelere, teşviklere kolaylıkla başvurabileceklerdir.

5. Kaynaklar

- Buckley, J. J., 1985. Fuzzy Hierarchical Analysis. *Fuzzy Sets and Systems*, **17**, 233-247.
- Buckley, J. J., 2003. Fuzzy Probabilities. *New Approach and Applications*, Physica-Verlag, New York.
- Chan, F. T. S., Kumar, N., 2007. Global Supplier Development Considering Risk Factors Using Fuzzy Extended AHP-based Approach. *Omega International Journal of Management Science*, **35**, 417-431.
- Chang, D. Y., 1996. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, **95**, 649-655.
- Chen, S. J., Hwang, C. L., 1992. Fuzzy Multiple Attribute Decision Making Methods and Applications. Berlin Heidelberg, Springer
- Chen, C. T., 2000. Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. *Fuzzy Sets and Systems*, 114-119.

- Chen, C. T., 2001. A Fuzzy Approach to Select the Location of the Distribution Center. *Fuzzy Sets and Systems*, **118**, 65-73.
- Chen, G., Pham, T. T., 2001. Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Control Systems. CRC Press, USA.
- Chen, C. T., Lin, C. T., Huang, S. F., 2006. A fuzzy approach for supplier evaluation and selection in supply chain management. *International Journal of Production Economics*, **102**, 289-301.
- Chen, L. Y., Wang, T. C., 2009. Optimizing Partners Choice in IS/IT Outsourcing Projects: The Strategic Decision of Fuzzy VIKOR. *International Journal of Production Economics*, 120(1), 233-242.
- Deng, H., 1999. Multicriteria Analysis with Fuzzy Pairwise Comparison. *International Journal of Approximate Reasoning*, **21**, 215-231.
- Deming, W. E., 1982. Quality, Productivity and Competitive Position. MIT. *Center of Advance Engineering*, Cambridge, MA.
- Enerji Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB), 2018. Enerji Raporu, 25-38.
- Imai, M., 2004. Kaizen, Kalder Yayınları.
- ISO 50001, 2018. Enerji Yönetim Sistemi Standardı.
- Ghodsypour, S. H., O'Brien, C., 1998. A decision support system for supplier selection using an integrated analytic hierarchy process and linear programming. *Int. J. Production Economics*, 56-57.
- Hu, Y., Wu, S., Cai, L., 2009. Fuzzy Multi-Criteria Decision-Making TOPSIS for Distribution Center Location Selection. *International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing IEEE*, 707-710.
- Incekara, C. O., 2020. Türkiye' nin Elektrik Üretiminde Doğalgaz Talep Tahminleri. *Journal of Turkish Operations Management*, Cilt 3, **2**, 298-313.
- Incekara, C. O., 2020. Turkey's Natural Gas Demand Projections. *EJONS International Journal On Mathematics, Engineering & Natural Sciences*, Volume (4), Issue (15): 489-505.

- Incekara, C. O., 2020. Evaluation of Turkey's International Energy Projects by Using Fuzzy Multi-Criteria Decision Making Methods. *Euroasia Journal of Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences*, Volume (8), Issue (9): 206-217.
- Incekara, C. O., 2020. Enerji Sektöründe Faaliyet Gösteren Bir İşletmede İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetim Sistemi. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Uygulamalı Bilimler Dergisi*, Cilt 4, 1, 152-177.
- Incekara, C. O., 2019. Use of an Optimization Model for Optimization of Turkey's Energy Management by inclusion of Renewable Energy Sources. *International Journal of Environmental Science and Technology*, Springer, 121-133.
- Incekara, C. O., 2019. Türkiye ve AB'nin Enerji Stratejileri ve Politikaları. *Journal of Turkish Operations Management*, Cilt 3, 2, 298-313.
- Incekara, C. O., 2019. Turkey's Energy Management Plan by using Fuzzy Modeling Approach. *Scholars' Press*, Book, 38-52.
- İncekara, Ç. Ö., 2018. Ülkemizdeki Enerji Santral Yatırımlarının AHP Yöntemi ile Değerlendirilmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33, 4, 185-196.
- Incekara, C. O., Oğulata, S. N., 2017. Turkey's energy planning considering global environmental concerns. *Ecological Engineering*, Elsevier, 589-595.
- İncekara, Ç. Ö., 2013. Turkey's Energy Strategies. *SOSBİLKO 2013*, 113-129.
- Junior, F. R. L., Osiro, L., Carpinetti, L. C. R., 2014. A comparison between Fuzzy AHP and Fuzzy TOPSIS methods to supplier selection. *Applied Soft Computing*, 21, 194-209.
- Kahraman, C., Cebeci, U., Ulukan, Z., 2003. Multi-Criteria Supplier Selection Using Fuzzy AHP. *Logistics Information Management*, 16, 6, 382-394.
- Klir, G. J., 1995. *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic Theory and Applications*. Prentice Hall PTR, New Jersey.
- Kumar, Sahu, A., Datta, S., Mahapatra, S. S., 2016. Evaluation and selection of resilient suppliers in fuzzy environment. *Benchmarking: An International Journal*, 23, 3, 651-673.
- Leung, L., Cao, D., 2000. On Consistency and Ranking of Alternatives in Fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, 124, 102-113.
- Opricovic, S., 2011. Fuzzy VIKOR with an application to water resources planning. *Expert Systems with Applications*, 38, 12983-12990.
- Opricovic, S., 1998. *Multi Criteria Optimization of Civil Engineering Systems*. Faculty of Civil Engineering, Belgrade.
- Opricovic, S., Tzeng, G. H., 2004. The compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*, 156(2), 445-455.
- Saaty, T. L., 2008. Decision making with the analytic hierarchy process. *Int. J. Services Sciences*, 1, 1, 83-98.
- Satrovic, E., Dag, M., 2019. Energy consumption, urbanization and economic growth relationship: an examination on OECD countries, *Dicle Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, Vol. 11(22), 315-324.
- Shukla, R. K., Gray, D., Agarwal, A., 2014. An integrated approach of Fuzzy AHP and Fuzzy TOPSIS in modeling supply chain coordination. *Production & Manufacturing Research*, 2(1): 415-437.
- Tavakkoli-Moghaddam, R., Mousavi, S., Heydar, M., 2011. An Integrated AHP-VIKOR Methodology for Plant Location Selection. *International Journal of Engineering*, 24 (2), 127-137.
- Thengane, S. K., Hoadley, A., Bhattacharya, M. S., Bandyopadhyay, S., 2014. Cost-benefit analysis of different hydrogen production technologies using AHP and Fuzzy AHP. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39, 152-159.
- Wang, Y. M., Luo, Y., Hua, Z., 2008. On the Extent Analysis Method for Fuzzy AHP and its Applications. *European Journal of Operational Research*, 186, 735- 747.
- Zadeh, L. A., 1965. Fuzzy Algorithms, Information and Control. 12(2), 94-102.

Zarte, M., Pechmann, A., Nunes, I. L., 2018. Sustainable Evaluation of Production Programs Using A Fuzzy Inference Model—A Concept. *Procedia CIRP*, **73**, 241-246.

Deprem ve Troposfer İlişkisi: Şili Örneği

Gökhan GÜRBÜZ¹, Kübra KOÇYİĞİT¹

¹Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, Zonguldak.

Sorumlu yazar e-posta: gokhan.gurbuz@beun.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5491-4623>
kocyigitkubra01@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2805-0777>

Geliş Tarihi: 09.11.2020

Kabul Tarihi: 23.12.2020

Öz

Depremler ile ilgili yapılan çalışmalarda yer ve uydu tabanlı birçok teknik kullanılmakta ve deplasman miktarları, fay karakteristikleri, gerilim aktarımları gibi konular araştırılmaktadır. Ayrıca, deprem uyarı sistemleri kurulmakta ve deprem tahmini konusunda tüm Dünya'da adımlar atılmaktadır. Örnek olarak; GNSS çalışmaları için önemli hata kaynaklarından biri olan atmosferin üst katmanındaki (iyonosfer) değişimler, deprem öncesi, deprem sırası ve deprem sonrası sürekli incelenmektedir. Ancak, GNSS ölçümlerinde oluşturduğu hata miktarı iyonofere göre daha az olan atmosferin alt katmanındaki (troposfer) değişimler ile ilgili sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmada, 2010 Maule ve 2015 Illapel depremlerinin ardından troposferdeki değişimler, GNSS gözlemlerinden hesaplanan troposferik zenit gecikmeleri (Zenith Total Delay - ZTD) kullanılarak incelenmiştir. Sonuçlar, depremlerin merkez üssüne en yakın GNSS istasyonlarında, ana şok sırasında ve sonrasında ciddi troposferik anomaliler olduğunu göstermektedir. Deprem öncesi ve deprem sonrasındaki günlerde atmosferik parametreler incelendiğinde, ZTD değerlerindeki bu değişimlerin atmosferik basıncıdaki değişimlerle doğrudan ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Nazca tektonik plakasının Güney Amerika plakasının altına doğru hareketi sonucu oluşan fay kırılması, atmosferde ölçülen basınç değerlerinde değişime sebep olmuş ve dolayısı ile ZTD değişimlerini tetiklemiştir. Şili'de gerçekleşen iki farklı depremde de benzer sonuçlara rastlanması, fay kırılması sonucu çalışma bölgesini düşeyde etkileyen depremler ile ilgili yapılan çalışmalarda, troposferik parametrelerin incelenmesinin önemini ortaya çıkarmıştır.

Anahtar kelimeler

GNSS;
Şili Depremleri;
Troposfer; Troposferik
Zenit Gecikmesi

Relation Between Earthquake and the Troposphere: Chile Example

Abstract

In studies related to earthquakes, many ground and satellite-based techniques are used and subjects such as surface displacements, fault characteristics, stress transfers are investigated. In addition, earthquake warning systems are established and steps are taken all over the world about earthquake prediction. As an example, changes in the upper layer of the atmosphere (ionosphere), which is one of the important error sources for GNSS studies, are continuously examined before, during, and after the earthquakes. In this regard, the changes in the ionosphere before the earthquake have been frequently examined and anomalies have been found before some of the earthquakes. However, there is a limited number of studies on the changes in the lower layer of the atmosphere (troposphere), which causes less amount of error in GNSS measurements than the ionosphere. In this study, the changes in the troposphere following the 2010 Maule and 2015 Illapel earthquakes, using zenith tropospheric delays (ZTD) calculated from GNSS observations, were investigated. The results showed that the GNSS stations closest to the epicenter of the earthquakes experienced severe tropospheric anomalies during and after the mainshock. Further investigations carried out using atmospheric parameters before and after the earthquake, it was found that these changes in ZTD values were directly related to changes in atmospheric pressure. Finding similar results in two different earthquakes in Chile has revealed the importance of tropospheric parameters in studies related to earthquakes that affect the study area vertically as a result of fault rupture.

Keywords

GNSS; Chile
Earthquakes;
Troposphere;
Zenith Tropospheric
Delay

1. Giriş

Şili, Nazca ve Güney Amerika tektonik plakalarının kesiştiği hat üzerinde bulunmaktadır. Nazca levhası ve Güney Amerika levhası arasındaki eğimli arayüz boyunca 7 mm/yıl hızı ile oluşan kayma nedeniyle levhalar arasında sık sık depremler meydana gelmektedir. Bu sebeple, geçmişte bölgede büyük ve yıkıcı depremler yaşanmıştır. Yaşanan bu depremlerin ortak özellikleri, 0 – 70 km aralığında sığ derinliklerde, yüz kilometre ve daha uzun fayların kırılması ile oluşmasıdır (Heidarzadeh et al. 2016). Bu depremlere örnek olarak; 2010 (8.8 Mw) ve 2015 (8.3 Mw) yıllarında yaşanan Şili depremleri gösterilebilir. Belirtilen depremler ile ilgili Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) verileri ve Global Navigation Satellite System (GNSS) gözlemleri kullanılarak farklı türlerde jeodezik çalışmalar yapılmıştır (Ho et al. 2013, Oikonomou et al. 2016, Ye et al. 2016, Klein et al. 2017). Gerçekleşen depremler sırasında ve sonrasında yüzeyde oluşan deformasyonların belirlenmesine ek olarak, deprem bölgesinde atmosfer ile ilgili çalışmalar da yapılmıştır (Akhoondzadeh et al. 2009, Afraimovich et al. 2010). GNSS sinyalleri, uydudan alıcıya ulaşana kadar atmosfer katmanlarında (iyonosfer ve troposfer) gecikmeye uğramaktadır. İyonosferde yaşanan gecikme, ionosferde bulunan toplam elektron içeriği ile ilişkili iken troposferik gecikme, havadaki partiküllerin hareketleri ve troposferik koşullardaki değişimler (örnek olarak; sıcaklık, basınç, nemlilik ve su buharı) ile ilişkilidir (Gurbuz et al. 2015, Gurbuz and Jin 2017, Jin et al. 2008a, 2008c, 2011). Her GNSS uydusundan alıcıya ulaşan sinyallerin, troposferde izlediği yol boyunca maruz kaldıkları eğik gecikmeler, izdüşüm fonksiyonları kullanılarak zenit yönü doğrultusunda hesaplanmaktadır. Bu değer, troposferik zenit gecikmesi (ZTD) olarak adlandırılmaktadır (Saastamoinen 1972, Askne and Nordius 1987, Davis et al. 1985).

Maule depremi olarak bilinen 2010 Şili depremi, 27 Şubat Cumartesi günü yerel saatle 03:34:14'te (06:34:14 UTC) Concepcion yakınlarında (35.909°G, 72.733°B) 8.8 Mw büyüklüğünde meydana gelmiştir. Şili'de gerçekleşen bu deprem, 9.5 Mw büyüklüğündeki 1960 Valdivia depreminden 9.0 Mw

büyüklüğündeki 2011 Tōhoku depremine kadar dünya çapında yaşanmış en güçlü depremdir (Castaños and Lomnitz 2012). Büyük ölçüde açık denizde yaşanan fay kırılması, 100 km genişliğini aşmakla birlikte kıyıya paralel olarak yaklaşık 300 km uzunluğunda gerçekleşmiştir (Jin et al. 2011). Kırılma, kıyıların derinliklerinde başlamış ve batıya, kuzeye ve güneye doğru yayılmıştır. Fayın kırılması sonucunda geniş bir bölgede deprem hissedilmiştir. Fayın kırılması aynı zamanda okyanus tabanını da bükerek fay kırılma alanı boyunca tsunami yaratmıştır. GNSS gözlem sonuçları, maksimum yatay yer değiştirmelerin 35°G ve 37°G arasında oluştuğunu ve 5 metreden fazla olarak hesaplanan zirve değerlerinin, Constitucion'un kuzeyinde ve Santa Maria adasında gerçekleştiğini göstermektedir (Heidarzadeh et al. 2016). Deprem merkezi çevresinde oluşan genel yatay deplasman miktarı 3 m olarak hesaplanmıştır. Yüzeyde gerçekleşen deplasmanlara ek olarak 2010 Şili depremi ile ilgili yapılan birkaç çalışmada deprem sırasında ve öncesinde gerçekleşen iyonosferik anomaliler saptanmıştır. Bunun sebebinin yerküre ve atmosfer arasındaki etkileşim olduğu öne sürülmüştür (Jin et al. 2011). Yapılan araştırmalar, kimi depremler için sismo-iyonosferik anomalilerin depremlerden 1-6 gün önce ortaya çıktığını göstermektedir (Liu et al. 2000, 2001, 2004a, 2004b, 2006, Chen et al. 2004, Akhoondzadeh et al. 2010a, 2010b, Le et al. 2011). Ancak, Pisa vd. (2011) 2010 Şili depremi ile ilgili çalışmalarında Detection of Electro-Magnetic Emissions Transmitted from Earthquake Regions (DEMETER) ile edilen sismo-iyonosferik anomalilerin diğer çalışmalarında belirtilenden farklı olarak depremden 10-20 gün önce ortaya çıktığını savunmuşlardır. Ho vd. (2013) çalışmasında 1999-2011 yılları arasında Şili ve çevresinde gerçekleşen depremlerde GNSS ile elde edilen toplam elektron içeriği değerlerindeki anomalileri araştırmış ve bölgedeki toplam elektron içeriğindeki anomalilerin depremlerden 18-26 gün önce ortaya çıktığını göstermişlerdir.

Illapel depremi olarak bilinen 2015 Şili depremi, 16 Eylül günü yerel saat ile 19:54:32'de (16 Eylül, 22:54:32 UTC) Coquimbo yakınlarında (31.573°G, 71.674°B) 22.4 km derinliğinde 8.3 Mw

büyükliğinde yaşanmıştır. Depremde kırılan fayın, 100 km genişliğinde ve yaklaşık 230 km uzunluğunda olduğu belirtilmiştir (Klein et al. 2017). Deprem sonrasında bölgede heyelanlar gerçekleşmiş ve boyu 4.5 metreyi aşan tsunami dalgaları deprem merkezinin kuzey ve güney kıyılarında etkili olmuştur (Heidarzadeh et al. 2016). 2010 yılında gerçekleşen 8.8 Mw büyüklüğündeki depremden sonra ülkede yaşanan en büyük deprem 2015 depremi olarak kayıtlara geçmiştir. GNSS gözlem sonuçları, deprem sırasındaki maksimum yatay yer değiştirmelerin 30.2°G ve 32°G arasında oluştuğunu ve 2 metreden fazla olarak hesaplanan maksimum değerlerinin, Lingua de Vaca yarımadasında gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Deprem merkezi çevresinde oluşan genel yatay deplasman miktarı 7 m olarak hesaplanmıştır (Ye et al. 2016). Deprem sırasında gözlemlenen maksimum düşey yer değiştirmenin yaklaşık 20 cm olduğu belirtilmiştir (Klein et al. 2017). Zhang vd. (2016) InSAR verilerinden yararlanarak yaptıkları çalışmada fayın kuzeybatısında gerçekleşen toplam atımı oluşturan parametrelerin, 1.5 m sağ yanal atım, yaklaşık 8 m eğim atım şeklinde olduğunu belirtmişlerdir. Yüzeyde gerçekleşen deplasmanlar dışında 2015 Illapel depremi ile ilgili yüzeydeki stres birikimi, tsunami ve atmosferde gerçekleşen anomaliler ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Heidarzadeh vd. (2016) çalışmalarında 2015 Illapel depremi sonrasında Japonya kıyılarında 1 m dalga boyuna ulaşan tsunami görüldüğünü; Coquimbo'da ise bu değer 4-5 m arasında olduğunu belirtmişlerdir. Oikonomou vd. (2016) çalışmalarında GNSS verilerinden yararlanarak depremin merkez üssü ve etrafındaki toplam elektron içeriği değerlerini incelemişlerdir. 2015 Illapel depreminden 1-5 gün önce iyonosferde gözlemlenen anomalilerin yanında depremden birkaç saat önce 2-5 dakikalık periyota sahip anomalilerin tespit edildiğini belirtmişlerdir. Reddy vd. (2016) çalışmalarında 2015 Illapel depreminden 10 dakika sonra GNSS ile elde edilen toplam elektron içeriği değerlerinde yaklaşık 1.4 TECU'luk anomalilere rastlandığını belirtmişlerdir. Daneshvar ve Freund (2017) yaptıkları çalışmada 2015 Illapel depreminden 35-40 gün önce atmosferik parametrelerde (bulutluluk oranı, yağış miktarı, atmosfer basıncı ve rüzgar vektörleri) 25-30

gün önce iyonosferde anomalilerin bulunduğunu belirtmişlerdir.

Deprem sırasında ve sonrasında meydana gelen hava dalgalarının yerden üst atmosfere yayılmaları durumunda, alt atmosferi de (troposfer) etkileme olasılıkları olduğu düşünülmektedir. Ancak, troposfer üzerindeki bu tür olası etkiler yalnızca bir kez incelenmiş ve deprem sırası ve sonrası gerçekleşen troposferik anomalilerin atmosferik basınç ile ilişkili olduğu belirtilmiştir (Jin et al. 2011).

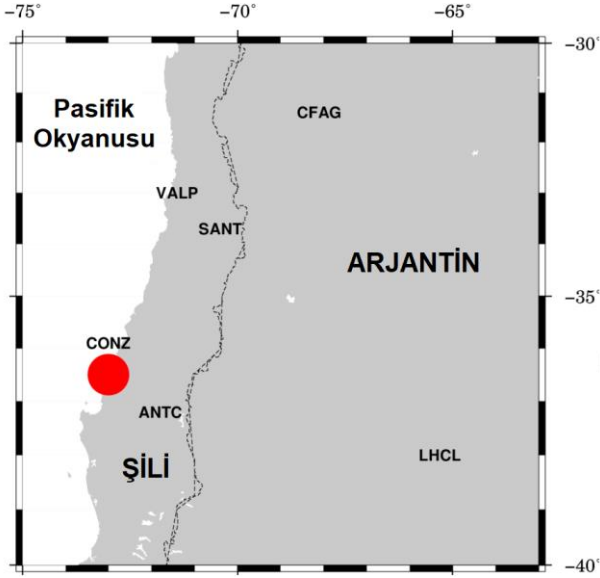
Bu çalışma kapsamında 2010 ve 2015 yıllarında gerçekleşen Maule ve Illapel depremleri sırasında ve sonrasında meydana gelen olası troposferik değişimler GNSS gözlem verileri kullanılarak incelenmiştir. Ayrıca elde edilen sonuçlar, GNSS istasyonlarına en yakın meteorolojik istasyonlardan elde edilen atmosferik basınç ve sıcaklık verileri ile ilişkilendirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2010 Maule ve 2015 Illapel depremleri ile troposfer arasındaki ilişkinin incelenmesi için deprem tarihlerinden beş gün önceki ve sonraki GNSS verileri elde edilerek (2010 için yılın 53-63 günleri, 2015 için yılın 255-265 günleri), toplam zenit gecikmesi (ZTD) ve diğer parametreleri en küçük kareler yöntemine göre çözümleyen GAMIT/GlobK yazılımı kullanılarak değerlendirme yapılmıştır (Herring et al. 2015). Yapılan değerlendirmede sadece Global Positioning System (GPS) uydu sistemine ait veriler kullanılmıştır. Değerlendirme sürecinde kullanılan 30 saniye kayıt aralıklı GNSS gözlem verileri, Centro Sismológico Nacional (CSN), Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS) ve International GNSS Service (IGS) ağına ait istasyonlardan elde edilmiştir. 2010 Maule depremi için yapılan değerlendirmede SANT, CONZ, COPO, COYQ, LHCL, VALP, CFAG ve ANTC istasyonlarına ait veriler kullanılmıştır (Şekil 1). 2015 Illapel depremi değerlendirmesinde ise, IGS ağına ait SANT istasyonu ve Şili ulusal GNSS ağına ait CNBA, LVIL ve ZAPA istasyonlarına ait veriler kullanılmıştır.

Değerlendirme kapsamında IGS hassas yörünge bilgileri, International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) Dünya dönüklük parametreleri, 2014 IGS anten faz merkezi modeli

kullanılmış ve uydu yükseklik açısı 10° olarak alınmıştır. Okyanus yüklenme etkisi için FES2004 modeli (Lyard et al. 2006) kullanılırken, yüzey modeli için Saastamoinen (Saastamoinen 1972) ve kuru-ıslak zenit gecikmesi için Vienna izdüşüm fonksiyonu (VMF1) kullanılmıştır (Boehm et al. 2006). İyonosferik gecikmenin giderilmesi için iyonosferden bağımsız baz çözümü kullanılırken, yüksek dereceli iyonosferik etki göz ardı edilmiştir. Değerlendirme sonucunda 10 dakika zamansal çözünürlüğe sahip ZTD değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 1. 2010 Maule depremi değerlendirme aşamasında kullanılan GNSS istasyonları (Şekildeki kırmızı nokta depremin merkezini ve 4 harflik kısaltma isimler değerlendirmede kullanılan GNSS istasyonlarını göstermektedir).

GAMIT/GlobK yazılımı toplam zenit gecikmesi (T_d) değerlerinin kestiriminde kullandığı formülasyon Denklem 1'deki gibidir (Herring et al. 2015).

$$T_d = T_{Wd} + T_{Dd} = T_{ZWd} MF_{wet}(\varepsilon) + T_{ZDd} MF_{dry}(\varepsilon) + A_{d(\varepsilon, \alpha)} \quad (1)$$

Denklem 1'de verilen T_{Wd} ıslak troposferik gecikmeyi ve T_{Dd} kuru troposferik gecikmeyi göstermektedir. MF_{wet} ve MF_{dry} sırasıyla ıslak ve kuru gecikme için kullanılan izdüşüm fonksiyonlarına karşılık gelmekte ve ε ise uydu yükseklik açısı olarak kullanılmaktadır. $A_{d(\varepsilon, \alpha)}$ ise atmosferik gecikmenin azimutsal asimetrisi etkisi olarak modele eklenmiştir. Kuru troposferik

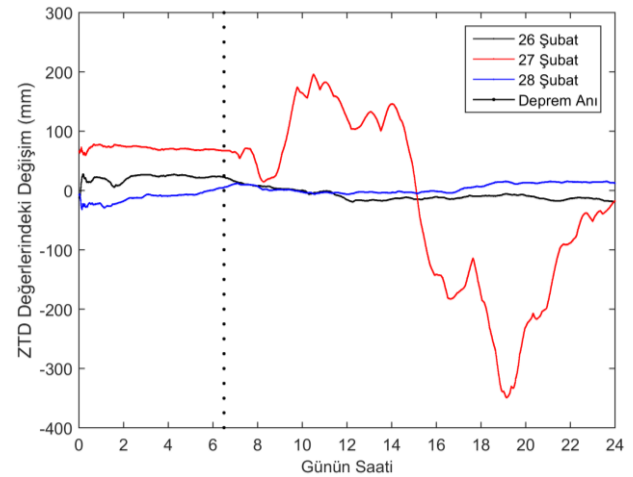
gecikme Denklem 2'de verilen formül kullanılarak elde edilmektedir (Saastamoinen 1972).

$$T_d = \frac{0.0022767 * P}{1 - 0.0026 * \cos 2\varphi - 0.00028 * h} \quad (2)$$

Denklem 2'de verilen φ elipsoidal enlem, h km cinsinden elipsoidal yükseklik ve P ise hPa cinsinden toplam yüzey basıncı olarak kullanılmaktadır. Denklem 2'de işleme çarpan olarak giren basınç parametresi doğrudan kuru zenit gecikmesini etkilemektedir.

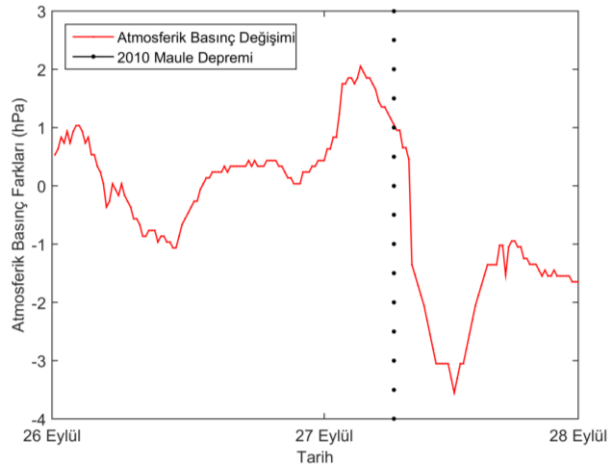
3. 2010 Maule Depremi Bulguları

2010 yılı 53-63 günlerini kapsayan 11 günlük değerlendirme kapsamında 10 dakika aralıklarla tüm GNSS istasyonları için ZTD değerleri elde edilmiştir. Deprem öncesi ve sonrasına ait 5 günlük veri değerlendirmesi sonucunda ZTD değerlerinin gün içindeki değişimlerinin aynı karakterde olduğu görülmüş, dolayısı ile deprem gününe ek olarak, depremden önce ve sonra birer güne ait sonuçlar paylaşılmıştır. Değerlendirme sonucunda elde edilen ZTD değişimleri (ZTD – günlük ortalama) ve gün içindeki basınç değişimi (basınç – gün içi ortalama) Şekil 2'de gösterilmiştir. Şekil 2'deki düşey kesikli çizgi deprem anını gösterirken, kırmızı çizgi deprem gününe (27 Şubat) ait sonuçları göstermektedir. 2010 Maule depremi ana şoku sonrası sahil şeridinde bulunan CONZ istasyonuna ait ZTD değerlerinde artış gözlenirken, deprem sonrası ZTD miktarında önemli miktarda dalgalanma görülmektedir. 26 Şubat tarihinde CONZ istasyonu ZTD değerlerinde herhangi bir anomali görülmemektedir (Şekil 2).



Şekil 2. 2010 Maule depremi değerlendirmesinde kullanılan CONZ istasyonuna ait ZTD değişimleri (ZTD – gün içi ortalama).

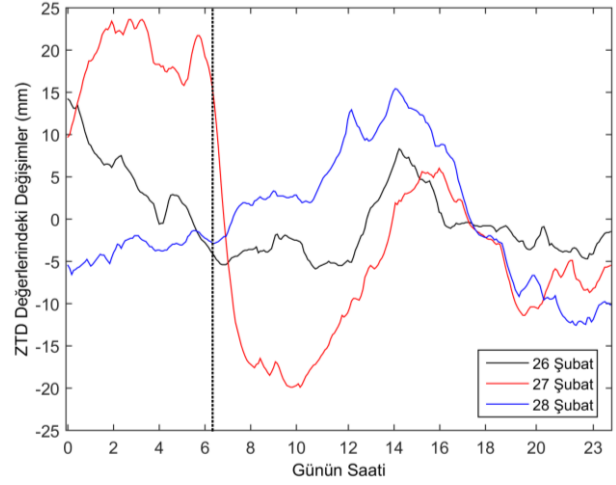
CONZ istasyonuna en yakın Comodoro Arturo Merino Benítez Havalimanı meteoroloji istasyonundan alınan atmosferik basınç verileri de depremden önceki gün ve deprem günü için incelenmiştir. Depremden önceki gün içindeki basınç değişimlerinde anomali görülmezken, deprem günü saatlik atmosferik basınç miktarları incelendiğinde deprem öncesi atmosferik basınç miktarında 3 hPa'lık bir artış olmuş ve depremin gerçekleşmesinin peşi sıra atmosferik basınç değerlerinde 6 hPa'lık ani bir düşüş olduğu görülmektedir. (Şekil 3). CONZ GNSS istasyonunun yaklaşık 1 km yakınındaki meteoroloji istasyonunun depremin merkezine çok yakın (yaklaşık 30 km) olması ve depremin büyüklüğü sebebiyle oluşan elektrik kesintileri sonucunda deprem sonrası gün (28 Şubat) veri toplanamamıştır.



Şekil 3. 2010 Illapel depremi değerlendirilmesinde kullanılan Comodoro Arturo Merino Benítez havalimanı meteoroloji istasyonuna ait saatlik atmosferik basınç verileri (Basınç – gün içi ortalama).

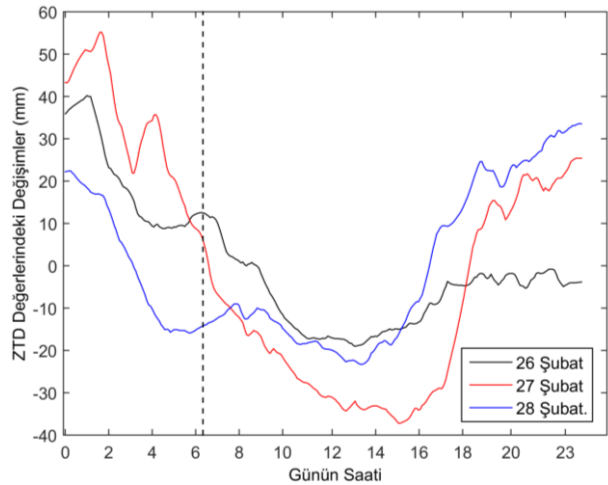
Aynı şekilde Concepcion şehrinin yaklaşık 400 km kuzeyindeki Valparaiso şehrinde bulunan sahil şeridinde yakın VALP GNSS istasyonuna ait ZTD farklarına ait değerler Şekil 4'te görselleştirilmiştir. Deprem öncesi ve sonrası günlerde (26 Şubat ve 28 Şubat) ZTD değerleri aynı karakteristiğe sahipken, depremin gerçekleşmesinin ardından önemli derecede düşüş yaşamıştır. VALP GNSS istasyonunun yaklaşık 15 km yakınındaki

meteoroloji istasyonundan elde edilen veriler incelendiğinde, deprem sonrası atmosferde 2 hPa'lık ani basınç artışı yaşandığı ve ancak saatler sonra basınç seviyesinin gün içi normal seviyelere düştüğü görülmüştür.



Şekil 4. 2010 Maule depremi değerlendirilmesinde kullanılan VALP istasyonuna ait ZTD değişimleri (ZTD – gün içi ortalama).

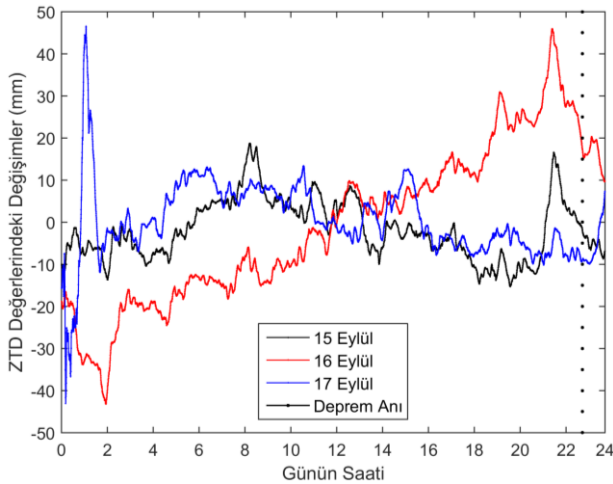
CONZ ve VALP istasyonlarına ek olarak deprem merkezine yaklaşık 120 km uzaklıktaki ANTC istasyonuna ait ZTD değişimleri Şekil 5'te verilmiştir. ANTC GNSS istasyonuna ait ZTD değerleri incelendiğinde, deprem öncesi ve sonrası günlere yakın ZTD değerleri görülmüş olup deprem sebebi ile büyük bir değişime rastlanmamıştır. ANTC GNSS istasyonunun yaklaşık 3 km yakınındaki meteoroloji istasyonu verileri incelendiğinde basınç değerlerinde de önemli bir değişim görülmemiştir.



Şekil 5. 2010 Maule depremi değerlendirilmesinde kullanılan ANTC istasyonuna ait ZTD değişimleri (ZTD – gün içi ortalama).

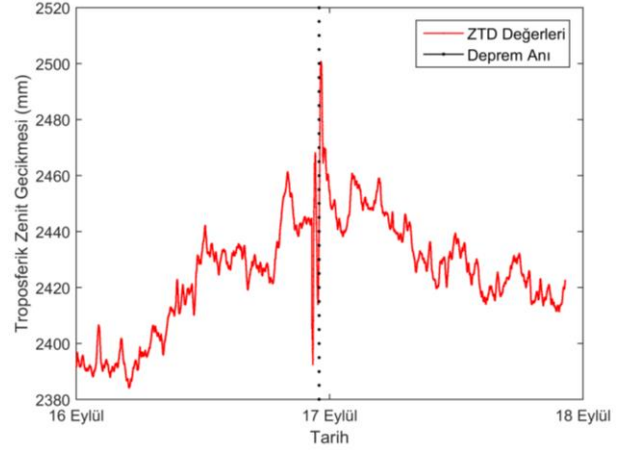
4. 2015 Illapel Depremi Bulguları

2015 yılı 255-265 günlerini kapsayan 11 günlük değerlendirme kapsamında deprem merkezine 45 km uzaklıktaki LVIL, 70 km uzaklıktaki ZAPA ve 80 km uzaklıktaki CNBA GNSS istasyonları ve diğer istasyonlara göre deprem merkezine daha uzakta bulunan (yaklaşık 200 km) SANT IGS istasyonu kullanılarak 10 dakika aralıklarla tüm GNSS istasyonları için ZTD değerleri elde edilmiştir. Deprem öncesi ve sonrasına ait 5 günlük veri değerlendirmesi sonucunda ZTD değerlerinin gün içindeki değişimlerinin aynı karakterde olduğu görülmüş, dolayısı ile deprem gününe ek olarak, depremden önce ve sonra birer güne ait sonuçlar paylaşılmıştır. Değerlendirme sonucunda deprem merkezi yakınındaki istasyonlarda depremin ardından ZTD değerlerindeki değişim açıkça görülürken, deprem merkezinden uzaktaki SANT istasyonunda etkinin düşük seviyede olduğu görülmüştür. Depremin merkezine en yakın Los Vilos'ta bulunan LVIL istasyonuna ait ZTD sonuçları incelendiğinde, deprem günü ZTD değerlerinin deprem öncesi ve sonrası günlere göre farklı davranış sergilediği görülmüştür (Şekil 6). Depremin gerçekleşmesinin ardından ZTD değerlerinde ani bir düşüş ve bir sonraki günün ilk saatlerinde ZTD değerlerinde yaklaşık 90 mm'lik dalgalanma görülmüştür. 16 Eylül'de gerçekleşen depremin ardından, ZTD değerleri depremden önceki güne göre yüksek devam etmesine rağmen, günlük ZTD davranışları aynıdır (Şekil 6).



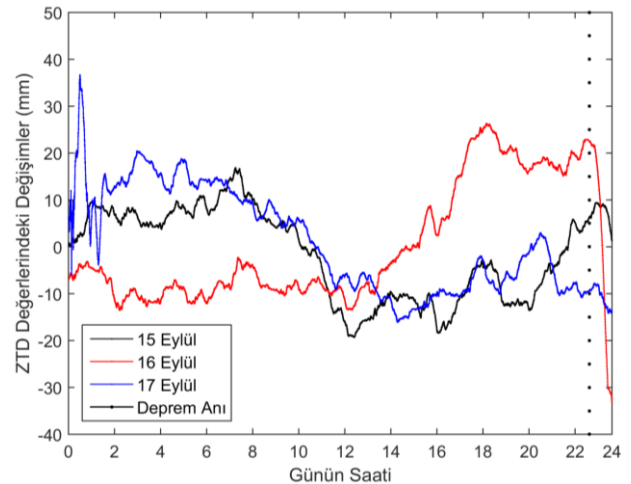
Şekil 6. 2015 Illapel depremi değerlendirilmesinde kullanılan LVIL istasyonuna ait ZTD değişimleri (ZTD – gün içi ortalama).

Deprem merkezinin güneyindeki Zapallar'da bulunan ZAPA istasyonu ZTD değerleri, LVIL istasyonlarındaki ZTD davranışı ile aynı davranışı göstermiştir. Depremin gerçekleşmesinin ardından ZTD değerlerinde ani düşüş ve bir sonraki gün ZTD değerlerinde yaklaşık 100 mm'lik dalgalanma görülmüştür. Depremden sonraki gün boyunca, ZTD değerleri normalden yüksek seyretmiş ve günün sonuna doğru normal değerlere inmiştir (Şekil 7).



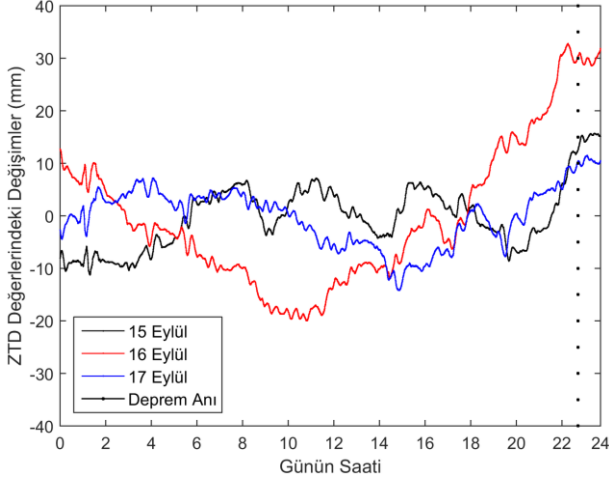
Şekil 7. 2015 Illapel depremi değerlendirilmesinde kullanılan ZAPA istasyonuna ait ZTD değerleri.

Sahil şeridinde bulunan LVIL ve ZAPA istasyonlarına göre, iç kesimlerdeki Canela Baja'da bulunan CNBA istasyonuna ait ZTD değerleri incelendiğinde, deprem sonrası ZTD değerlerindeki değişimin aynı karakterde olduğu ancak, LVIL ve ZAPA istasyonlarına göre ZTD değerlerinin daha küçük olduğu görülmüştür. Deprem sonrası ZTD değerlerinde ani düşüş ve bir sonraki günün ilk saatlerinde yaklaşık 40 mm'lik dalgalanma görülmüştür (Şekil 8).



Şekil 8. 2015 Illapel depremi değerlendirmesinde kullanılan CNBA istasyonuna ait ZTD değişimleri (ZTD – gün içi ortalama).

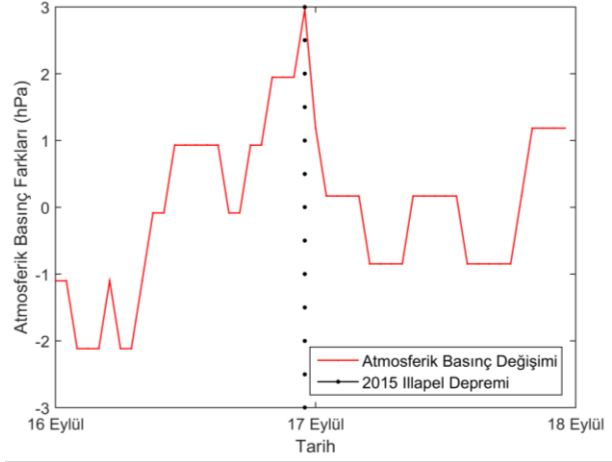
Depremi merkezine uzak ve iç kesimlerde bulunan SANT IGS istasyonu ZTD değerleri incelendiğinde, deprem sırasında ve sonrasında bir anomali görülmemiştir. Ancak, deprem günü ana şok öncesinde ZTD değerlerinde normalden farklı artışlar gözlemlenmiştir (Şekil 9).



Şekil 9. 2015 Illapel depremi değerlendirilmesinde kullanılan SANT istasyonuna ait ZTD değişimleri (ZTD – gün içi ortalama).

Deprem sırası ve sonrası gerçekleşen ZTD davranışlarındaki farklılıklarının ortaya çıkartılmasının ardından, bu anomalilerin sebepleri araştırılmıştır. ZTD değerleri ile doğrudan ilişkili atmosferik parametrelerin incelenmesiyle, ZTD değişimlerinin atmosferik basınç değişimleri ile doğru orantılı olduğu ortaya çıkmıştır. 2015 Illapel depreminin Nazca ve Güney Amerika plakalarının hareketleri sonucunda oluşan eğimli fayda olduğu düşünülürse, deprem sırasındaki 100 km genişliğinde ve yaklaşık 230 km uzunluğundaki fay kırılmasının yüzeyde yarattığı etki sebebiyle atmosferik basınç değerlerinde anomaliler oluşturması normal bir beklentidir. Deprem merkezine en yakın ve aktif olarak veri toplayabilen meteoroloji istasyonu olarak Concón şehrindeki Vina del Mar havalimanına ait atmosferik veriler incelenmiştir. 16-17 Eylül 2015 (yılın 259. ve 260. günleri) tarihlerindeki saatlik atmosferik basınç miktarları incelendiğinde deprem öncesi 16 Eylül tarihinde atmosferik basınç miktarında 5 hPa'lık bir birikimin ardında depremin gerçekleştiği ve basınç

değerlerinde 4 hPa'lık ani bir düşüş olduğu görülmektedir (Şekil 10). Deprem öncesi ve sonrasında gerçekleşen bu atmosferik basınç anomali, ZTD değerlerini doğrudan etkilemiştir.



Şekil 10. 2015 Illapel depremi değerlendirilmesinde kullanılan Vina del Mar havalimanı meteoroloji istasyonuna ait saatlik atmosferik basınç verileri (Basınç – gün içi ortalama) (Int Kyn. 1).

5. Tartışma ve Sonuç

Çalışma kapsamında 2010 Maule ve 2015 Illapel'de gerçekleşen depremler sonrası troposferde gerçekleşen değişimler GNSS ile elde edilmiş ZTD değerleri kullanılarak incelenmiştir. Değerlendirmeler kapsamında her iki deprem için de deprem öncesi ve sonrasını kapsayan 11 günlük veri değerlendirilmiştir. Deprem öncesi ve sonrasına ait 5 günlük veri değerlendirmesi sonucunda ZTD değerlerinin gün içindeki değişimlerinin aynı karakterde olduğu görülmüş, dolayısı ile bulgular kısmında deprem gününe ek olarak, depremden önce ve sonraki birer güne ait sonuçlar paylaşılmıştır.

2010 Maule depremi sonrası CONZ, VALP ve ANTC istasyonlarına ait ZTD verileri incelenmiş ve deprem merkezi yakınlarındaki CONZ istasyonunda 500 mm'ye ve VALP istasyonunda 40 mm'ye varan troposferik anomaliler görülmüştür. CONZ istasyonu yakınlarındaki meteoroloji istasyonundan alınan atmosferik basınç değerleri incelendiğinde deprem anında oluşan basınç değişimlerinin ZTD değerlerini etkilediği fark edilmiştir. Depremden kaynaklanan ülke çapında yaşanan elektrik kesintileri sebebiyle VALP ve ANTC istasyonu yakınlarındaki meteorolojik

istasyonlardan deprem sonrası gününe ait veri elde edilememiştir.

2015 Illapel depremi sonrası LVIL, ZAPA, CNBA ve SANT istasyonlarına ait veriler değerlendirilerek ZTD değerleri incelenmiştir. Deprem sonrası, deprem merkezi yakınlarındaki LVIL ve ZAPA istasyonlarında 100 mm'ye varan troposferik anomaliler oluşurken, iç kesimlerindeki CNBA istasyonunda 40 mm'lik dalgalanmalar görülmüştür. 2015 Illapel depremi merkezine en uzak konumdaki SANT istasyonuna ait ZTD verileri incelendiğinde deprem sırası ve sonrasında ZTD anomalilerine rastlanmamıştır.

Şili Meteoroloji Ofisi (Dirección Meteorológica de Chile) verilerine göre, 2010 Maule ve 2015 Illapel deprem değerlendirmeleri kapsamında kullanılan verilerin ait olduğu günlerde çalışma bölgesinde yağış görülmemiştir. Çalışma kapsamında değerlendirme yapılan günlerdeki sıcaklık değerleri incelendiğinde bir anomaliye rastlanmamıştır. Dolayısı ile deprem sırasında ve sonrasında meydana gelen ZTD anomalileri, atmosferik basınç değerleri ile ilişkilendirilmiş ve atmosferik basınç değerlerinde ZTD değerleri ile doğru orantılı değişimler olduğu görülmüştür. Ancak, her iki depremde de depremden bir önceki gün gerçekleşen atmosferik basınç artışı incelenmeli ve sebepleri araştırılmalıdır.

Her iki deprem sonucunda elde edilen ZTD ve atmosferik basınç anomalileri Jin vd. (2011)'nin yaptığı çalışma ile uyumlu sonuçlar ortaya çıkarmıştır. Depremler sırasında ve sonrasında gerçekleşen ZTD anomalilerinin, değerlendirme sırasında kullanılan GNSS istasyonlarının, deprem merkezine yakınlığı ile doğrudan ilişkili olduğu ve iyonosferden farklı olarak, troposferik anomalilerin daha küçük çaptaki bir alanı etkilediği gözlemlenmiştir.

Tüm bu sonuçlara ek olarak yazarlar, deprem ile ilişkili tüm GNSS çalışmalarında, deprem sırası ve sonrası veri değerlendirmeleri yapılırken atmosferik basınç kaynaklı ZTD değişimlerinin göz ardı edilmemesini önermektedir.

Teşekkür

Çalışma Kübra Koçyiğit'in "Troposfer ve depremlerin ilişkilendirilmesi" isimli lisans tezi kapsamında

hazırlanmıştır. Yazarlar çalışma kapsamında kullanılan sıcaklık, basınç ve nem verileri için Şili meteoroloji istasyonlarının bağlı bulunduğu Dirección Meteorológica de Chile'ye, GNSS istasyonu verileri için Referencia Geocéntrica para las Américas (SIRGAS) ve International GNSS Service (IGS)'e teşekkür eder.

6. Kaynaklar

- Afraimovich, E., Feng, D., Kiryushkin, V., Astafyeva, E., Jin S. G., Sankov, V., 2010. TEC response to the 2008 Wenchuan earthquake in comparison with other strong earthquakes. *International Journal of Remote Sensing*, **31(13)**, 3601–3613.
- Akhoondzadeh, M., Parrot, M., Saradjian, M. R., 2010a. Electron and ion density variations before strong earthquakes ($M > 6.0$) using DEMETER and GPS data. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **10**, 7–18.
- Akhoondzadeh, M., Parrot, M., Saradjian, M. R., 2010b. Investigation of VLF and HF waves showing seismo-ionospheric anomalies induced by the 29 September 2009 Samoa earthquake ($M_w = 8.1$). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **10**, 1061–1067.
- Askne J., Nordius H., 1987. Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data. *Radio Science*, **22(3)**, 379–386.
- Böhm, J., Werl, B., Schuh, H., 2006. Troposphere mapping functions for GPS and VLBI from ECMWF operational analysis data. *Journal of Geophysical Research*, **111(B02406)**, 1-9.
- Castaños H., Lomnitz C., 2012. The 2010 Chile Earthquake. *Earthquake Disasters in Latin America*. Springer Briefs in Earth Sciences, Springer, Dordrecht, 47-53.
- Chen, Y. I., Liu, J. Y., Tsai, Y. B., Chen, C. S., 2004. Statistical Tests for Preearthquake Ionospheric Anomaly. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, **15 (3)**, 385–396.
- Daneshvar, M. R. M., Freund, F. T., 2017. Remote sensing of atmospheric and ionospheric signals prior to the Mw 8.3 Illapel earthquake, Chile 2015. *The Chile-2015 (Illapel) Earthquake and Tsunami*, Birkhäuser, Cham, 157-191.

- Davis J. L., Herring T. A., Shapiro I. I., Rogers A. E. E., Elgered G., 1985. Geodesy by radio interferometry: effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length. *Radio Science*, **20(6)**, 1593–1607.
- Gurbuz, G., Jin, S. G., Mekik, C., 2015. Sensing precipitable water vapour (PWV) using GPS in Turkey: validation and variations. *Satellite Positioning: Methods, Models and Applications*, InTech-Publisher, Rijeka, Croatia, 117-129.
- Gurbuz, G., Jin, S., 2017. GPS observations of tropospheric disturbances following the 2010 Mw 8.8 Chile earthquake. In 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 4718-4721.
- Heidarzadeh, M., Murotani, S., Satake, K., Ishibe, T., Gusman, A. R., 2016. Source model of the 16 September 2015 Illapel, Chile, Mw 8.4 earthquake based on teleseismic and tsunami data. *Geophysical Research Letters*, **43(2)**, 643-650.
- Herring, T. A., King, R. W., McClusky, S. C., 2010. Introduction to GAMIT/GLOBK 10.6. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 0-50.
- Ho, Y. Y., Jhuang, H. K., Su, Y. C., Liu, J. Y., 2013. Seismoionospheric anomalies in total electron content of the GIM and electron density of DEMETER before the 27 February 2010 M= 8.8 Chile earthquake. *Advances in Space Research*, **51(12)**, 2309–2315.
- Jin, S. G., Li, Z., Cho, J., 2008a. Integrated Water Vapor Field and Multiscale Variations over China from GPS Measurements. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **47(11)**, 3008–3015.
- Jin, S. G., Luo, O. F., Gleason, S., 2008c. Characterization of diurnal cycles in ZTD from a decade of global GPS observations. *Journal of Geodesy*, **83(6)**, 537–545.
- Jin, S. G., Han, L., Cho, J., 2011. Lower atmospheric anomalies following the 2008 Wenchuan Earthquake observed by GPS measurements. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **73(7-8)**, 810–814.
- Klein, E., Vigny, C., Fleitout, L., Grandin, R., Jolivet, R., Rivera, E., Métois, M., 2017. A comprehensive analysis of the Illapel 2015 Mw 8.3 earthquake from GPS and InSAR data. *Earth and Planetary Science Letters*, **469**, 123-134.
- Le, H., Liu, J. Y., Liu, L., 2011. A statistical analysis of ionospheric anomalies before 736 M6.0+ earthquakes during 2002-2010. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, **116(A2)**.
- Liu, J. Y., Chen, Y. I., Pulinets, S. A., Tsai, Y. B., Chuo, Y. J., 2000. Seismo-ionospheric signatures prior to M \geq 6.0 Taiwan earthquakes. *Geophysical Research Letters*, **27(19)**, 3113–3116.
- Liu, J. Y., Chen, Y. I., Chuo, Y. J., Tsai, H. F., 2001. Variations of ionospheric total electron content during the Chi-Chi Earthquake. *Geophysical Research Letters*, **28(7)**, 1383–1386.
- Liu, J. Y., Chuo, Y. J., Shan, S. J., Tsai, Y. B., Chen, Y. I., Pulinets, S. A., Yu, S. B., 2004a. Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurements. *Annales Geophysicae*, **22(5)**, 1585–1593.
- Liu, J. Y., Chen, Y. I., Jhuang, H. K., Lin, Y. H., 2004b. Ionospheric foF2 and TEC anomalous days associated with Mp 5.0 earthquakes in Taiwan during 1997–1999. *Journal of Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, **15(3)**, 371–383.
- Liu, J. Y., Chen, Y. I., Chuo, Y. J., Chen, C. S., 2006. A statistical investigation of preearthquake ionospheric anomaly. *Journal of Geophysical Research*, **111(A5)**, 1–5.
- Lyard, F., Lefevre, F., Letellier, T., Francis, O., 2006. Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004. *Ocean Dynamics*, **56(5-6)**, 394-415.
- Oikonomou, C., Haralambous, H., Muslim, B. 2016. Investigation of ionospheric TEC precursors related to the M7. 8 Nepal and M8. 3 Chile earthquakes in 2015 based on spectral and statistical analysis. *Natural Hazards*, **83(1)**, 97-116.
- Pisa, D., Parrot, M., Santolik, O., 2011. Ionospheric density variations recorded before the 2010 Mw 8.8 earthquake in Chile. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, **116(A8)**, 1–8.
- Reddy, C. D., Shrivastava, M. N., González, G., Baez, J. C., 2017. Ionospheric plasma response to M w 8.3 Chile

Illapel earthquake on September 16, 2015. The Chile-2015 (Illapel) Earthquake and Tsunami, Birkhäuser, Cham, 145-155.

Saastamoinen, J., 1972. Contributions to the theory of atmospheric refraction. *Bulletin Géodésique (1946-1975)*, **105(1)**, 279-298.

Ye, L., Lay, T., Kanamori, H., Koper, K. D., 2017. Rapidly estimated seismic source parameters for the 16 September 2015 Illapel, Chile Mw 8.3 earthquake. The Chile-2015 (Illapel) Earthquake and Tsunami, Birkhäuser, Cham, 11-22.

Zhang, Y., Zhang, G., Hetland, E. A., Shan, X., Wen, S., Zuo, R., 2017. Coseismic fault slip of the September 16, 2015 Mw 8.3 Illapel, Chile earthquake estimated from InSAR data. The Chile-2015 (Illapel) Earthquake and Tsunami, Birkhäuser, Cham, 73-82.

İnternet kaynakları

1-<https://weatherspark.com/h/d/147252/2015/9/17/Historical-Weather-on-Thursday-September-17-2015-at-La-Florida-Airport-Chile#Figures-Pressure>, (05/11/2020)

Kültürel Mirasın Etkileşimli Keşfi İçin Mobil Artırılmış Gerçeklik ve Web Tabanlı Görselleştirme Teknolojilerinin Kullanılması: Sfenks Heykeli Örneği

Ahmet USLU^{1*}, Murat UYSAL²

¹Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Tavşanlı Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, Kütahya.

²Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar.

Sorumlu yazar e-posta: ahmet.uslu1@dpu.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-8745-423X>

e-posta: muysal@aku.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-5202-4387>

Geliş Tarihi: 01.11.2020

Kabul Tarihi: 17.12.2020

Öz

Kültürel mirasın korunması, dijital dokümantasyonu ve sürdürülebilir bir anlayışla gelecek nesillere aktarılması uluslararası toplumların önceliklerinden biri haline gelmiştir. Fotogrametri tekniği kültürel mirasın dijital dokümantasyonunda başarıyla kullanılmıştır. Fotogrametri, dijitalleştirme, 3 boyutlu (3B) modelleme, görselleştirme ve simülasyon alanındaki son gelişmeler, dijital kültürel mirasın daha geniş yelpazede erişilebilirliği için yeni fırsatlar sunmaktadır. Fotogrametri, artırılmış gerçeklik (AG) ve web tabanlı görselleştirmenin kombinasyonu, kültürel mirasın etkileşimli sunumu için büyük bir potansiyele sahiptir. Bu çalışmada, fotogrametrik modellere dayalı mobil AG ve web tabanlı görselleştirme uygulamaları için bir iş akışı geliştirilerek kültürel miras bağlamında sanal, interaktif ve sürükleyici bir deneyim oluşturulması amaçlanmıştır. Önerilen iş akışı, Kütahya Arkeoloji Müzesi'nde sergilenen Sfenks Heykeline uygulanmıştır. Fotogrametrik yöntem ile elde edilen 3B model optimize edilerek, AG ve web tabanlı görselleştirme uygulamaları için hazırlanmıştır. Çalışmanın sonuçları, AG, web tabanlı görselleştirme ve fotogrametri sinerjisinin kültürel mirasın etkileşimli olarak sunumu için büyük bir imkân sağladığını doğrulamıştır. Çalışmada tanımlanan araştırma çizgileri daha kapsayıcı kültürel miras ortamları oluşturmak daha keyifli ve zenginleştirici turizm deneyimi sağlamak amacıyla yeni fırsatlar sunmaktadır.

Anahtar kelimeler

Kültürel miras;
Fotogrametri; 3B modelleme; Artırılmış gerçeklik; Web tabanlı görselleştirme

Using Mobile Augmented Reality and Web-Based Visualization Technologies for Interactive Exploration of Cultural Heritage: The Case of Sphinx Sculpture

Abstract

The conservation of cultural heritage, digital documentation and transferring it to future generations with a sustainable understanding has become one of the priorities of international societies. Photogrammetry technique has been successfully used in digital documentation of cultural heritage. Recent developments in photogrammetry, digitalization, 3 dimensional (3D) modeling, visualization and simulation offer new opportunities for wider accessibility of digital cultural heritage. The combination of photogrammetry, augmented reality (AR) and web-based visualization has great potential for interactive presentation of cultural heritage. In this study, it was aimed to create a virtual, interactive and immersive experience in the context of cultural heritage by developing a workflow for mobile AR and web-based visualization applications based on photogrammetric models. The proposed workflow has been applied to the Sphinx Sculpture exhibited in the Kütahya Archeology Museum. The 3D model created by photogrammetric method has been optimized and prepared for AR and web-based visualization applications. The results of the study confirmed that the synergy of AR, web-based visualization and photogrammetry provides a great opportunity for interactive presentation of cultural heritage. The research lines defined in the study offer new opportunities to create more inclusive cultural heritage environments to provide a more enjoyable and enriching tourism experience.

Keywords

Cultural heritage;
Photogrammetry; 3D modeling; Augmented reality; Web based visualization

1. Giriş

Kültürel miras tarih boyunca toplumların gelişimini yansıtır, insanlara atalarından paha biçilmez maddi ve manevi değerler sağlar (Kurin 2004). Kültürel miras her zaman insanlığın hayati bir parçası olmuştur (Kurin 2004). Büyük önemine rağmen kültür miras eserleri, genellikle terör olayları, çarpık kentleşme, afetler, kötü turizm yönetimi vb. gibi hem doğal hem de antropojenik tehditler altındadır (Hosagrahar *et al.* 2016). Bu nedenlerle, eserlerin, anıtların ve ören yerlerinin gerçekliğe dayalı dokümantasyonu, restorasyonu ve yeniden inşası dâhil olmak üzere kültürel mirasın korunması için önemli çabalar sarf edilmiştir (Remondino and El-Hakim 2006). Gerçekliğe dayalı dokümantasyon, fiziksel nesnelerin ölçüldüğü, haritalandığı, modellendiği ve arşivlendiği yaygın bir uygulamadır (Dhonju *et al.* 2018). Gerçekliğe dayalı miras dokümantasyonunda geometrik doğruluk açısından yüksek veri kalitesi sunan, düşük maliyet ve kullanım kolaylığı gibi avantajlar sağlayan popüler yaklaşımlardan biri fotogrametri tekniğidir (Remondino and El-Hakim 2006).

Fotogrametri, üst üste binen iki boyutlu (2B) görüntülerden doğru ve ayrıntılı bir 3B veri toplamayı sağlayan, iyi bilinen görüntü tabanlı bir modelleme yöntemidir (Remondino and El-Hakim 2006). Fotogrametri tekniği kültürel mirası sayısallaştırma alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Arkeolojik alanlardan (Alptekin vd. 2019, Toprak vd. 2019, Polat ve Tamsü Polat 2020), mimari eserlere (Ulvi ve Yiğit 2019, Yakar ve Bilgi 2019) ve arkeolojik eserlere (Uysal vd. 2015, Uslu 2016, Uslu ve Uysal 2017) kadar çok çeşitli farklı yapıların 3B yeniden inşasını mümkün kılmaktadır.

Son yıllarda, artırılmış gerçeklik (AG), web tabanlı görselleştirme ve fotogrametrinin sinerjisi, kültürel miras bilgilerini sunmak için giderek yaygınlaşan bir yöntem haline gelmiştir (Obradović *et al.* 2020). Artırılmış gerçeklik ve web tabanlı görselleştirme uygulamaları yalnızca basit görselleştirmeler sağlamakla kalmaz, aynı zamanda gerçek dünyadaki nesnelerin, sahnelerin sürükleyici ve etkileşimli bir deneyimini sağlamaktadır (Obradović *et al.* 2020).

Kültürel mirasın dijitalleştirilmesine ve sanal keşiflerine kapsamlı bir şekilde odaklanılarak fotogrametri, AG (Marques *et al.* 2017, Panou *et al.* 2018, Carrión-Ruiz *et al.* 2019) ve web tabanlı görselleştirmenin (Uslu 2016, Dhonju *et al.* 2018, Boutsis *et al.* 2019) karşılıklı uygulaması üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Çalışmalardan bazıları, dijital olarak yeniden inşa edilen erişilemeyen tarihi yerler ve yok olmuş eski eserler ile ilgilenerek sanal erişim ve kültürel değerlerin daha iyi anlaşılmasını amaçlamaktadır (Paladini *et al.* 2019). Diğer çalışmalar, kültürel miras dokümantasyonu ve yayımı için anahtar bir araç olarak, sanal müzeler oluşturmak için dijital fotogrametri yoluyla elde edilen mimari nesnelerin ve tarihi eserlerin 3B modellerini kullanmışlardır (Obradović *et al.* 2020).

Bu çalışmada, kültürel mirasın etkileşimli gösterimi için fotogrametri tekniği ile yenilikçi mobil AG ve web tabanlı görselleştirme teknolojileri arasında bir kombinasyon oluşturulmuştur. Çalışmanın amacı, kültürel mirasın yaygınlaştırılması için interaktif ve sürükleyici deneyimlerle sanal ortamların oluşturulmasını sağlamaktır. Bu kapsamda Kütahya Arkeoloji Müzesi'nde sergilenen Sfenks Heykelinin, fotogrametri tekniği ile elde edilen 3B modeli optimize edilerek, heykelin ayrıntılı keşfi ve dijital erişim için mobil AG ve web tabanlı görselleştirme teknolojileri ile birleşimi sağlanmıştır.

Çalışma dört ana bölümden oluşmaktadır. Giriş bölümünün (Bölüm 1) ardından, Bölüm 2'de çalışma alanının özellikleri, genel metodolojik iş akışı ve veri setleri sunulmaktadır. Bölüm 3'te fotogrametrik değerlendirme, 3B modelleme, mobil AG ve Web tabanlı görselleştirme uygulamaları yer almaktadır. Son olarak Bölüm 4'te ise çalışmada elde edilen sonuçlar ve gelecekteki öneriler belirtilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1 Çalışma Alanı ve Çalışma Materyalleri

Çalışmada Kütahya Arkeoloji Müzesi'nde sergilenen pençeleri, tırnakları aslandan, kuyruğu yilandan ve kartal kanatlarından oluşan bir kadına benzeyen Sfenks Heykeli model olarak seçilmiştir (Şekil 1). Sfenks Yunan mitolojisinde yıkım ve kötü şans temsil eden, benzersiz bir yaratık olarak tasvir

edilmiştir. Efsaneye göre Yunan şehri Thebes kapılarını korur, şehre girmek isteyenlere bir bilmece sorar ve doğru cevap veremeyenleri boğarak öldürürdü. Yunan Sfenksinin bilmeceğine doğru yanıt veren tek kişi keskin zekâsı ve bilgeliği ile tanınan Oidipus olmuştur. Bu yenilgi karşısında sfenks kendini yüksek bir kayalıktan atmış ve ölmüştür (Martens 2002).

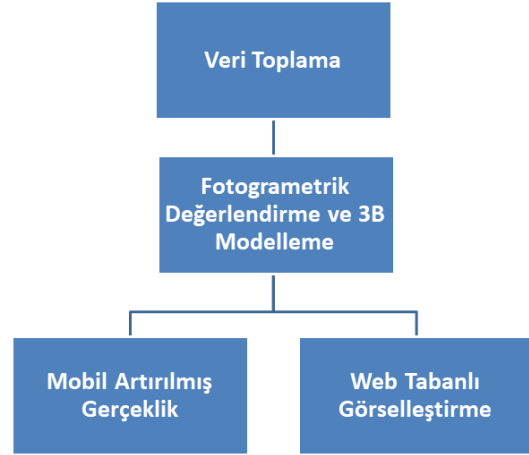


Şekil 1. Sfenks Heykeli.

Çalışmada materyal olarak arkeolojik eserin fotoğraflarının çekiminde 16.2 MP çözünürlüğe sahip Samsung ST150 dijital fotoğraf makinesi, arkeolojik eser üzerinde belirlenen kontrol noktalarına ilişkin koordinat değerlerinin ölçümü için Spectra Focus 6 reflektörsüz totalstation cihazı, fotogrametrik değerlendirme işlemleri ve 3B model oluşturma işlemleri için Agisoft PhotoScan yazılımı, web tabanlı görselleştirme işlemleri için JavaScript 3B kütüphanesi ve mobil AG uygulaması için Augment (bulut tabanlı yazılım) kullanılmıştır.

2.2 Yöntem

Çalışmanın yöntemi için konuyla ilgili olarak geniş bir literatür taraması sonucu elde edilen kaynaklardan ve belgelerden yararlanılmıştır. Çalışmanın yöntemi Şekil 2’de gösterilmektedir.



Şekil 2. Çalışmanın Yöntemi.

3. Uygulama

3.1 Veri Toplama

Veri toplama aşamasında ilk olarak koordinatlandırma ve konum doğruluğunun analizi için Sfenks Heykeli üzerinde 24 adet kontrol noktası işaretlenmiştir. Kontrol noktaları belirlenirken noktaların tüm fotoğraflarda görünür ve seçilebilir olmasına özen gösterilmiştir. Bu noktalarından 15 tanesi 3B modelin koordinatlandırılması işleminde, 9 tanesi de konum doğruluğunun irdelenmesi işleminde kullanılmak üzere belirlenmiştir. Müze içerisinde Sfenks Heykelini tüm yönleriyle kapsayan poligon noktaları tesis edilerek, lokal koordinat sisteminde kapalı poligon güzergâhı oluşturulmuştur. Kontrol noktalarının ölçümü Spectra Focus 6 reflektörsüz totalstation cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Detay ölçmelerinden sonra 16.2 MP çözünürlüğe sahip Samsung ST150 dijital fotoğraf makinesi ile konvergent çekim esaslarına göre Sfenks Heykelinin 32 adet fotoğrafı çekilmiştir. Fotoğraf çekimi yapılırken yüksek çözünürlük ve doğrulukta 3B model üretimi için uygun sayıda ve açıda, kontrol noktalarının görünür ve seçilebilir olmasına dikkat edilmiştir.

3.2. Fotogrametrik Değerlendirme ve 3B Modelleme

Fotogrametrik değerlendirme işlemleri ve 3B model oluşturma işlemleri için Agisoft PhotoScan yazılımı kullanılmıştır. Agisoft PhotoScan yazılımı örtüşen fotoğraflarda referans noktalarını otomatik tespit ederek 2B görüntülerden 3B modeller üretmek için Hareket ile Nesne Oluşturma teknolojisini

kullanmaktadır. Hareket ile Nesne Oluşturma tekniği, klasik fotogrametri tekniği ile aynı ilkelere dayanır, ancak kamerayı kalibre etme ve yönlendirme ihtiyacını ortadan kaldırarak, kamera pozisyon ve oryantasyon bilgisini aynı anda ve otomatik olarak hesaplamaktadır (Snaveley *et al.* 2008).

Fotogrametrik Değerlendirme ve 3B Modelleme işlemleri için girdi olarak 32 adet fotoğraf kullanılmıştır. Daha sonra 32 fotoğrafın tümü, 17,255 adet bağlantı noktası kullanılarak Agisoft PhotoScan ile başarılı bir şekilde otomatik olarak hizalanmıştır. Veri toplama aşamasında koordinat değerleri ölçülen 15 adet detay noktası nokta atmak suretiyle işaretlenmiştir. Bir sonraki adımda, detay noktaları ile birlikte arkeolojik eserin sırasıyla 3B yoğun nokta bulutu (376,179 adet) (Şekil 3), 3B yüzeyler (190,003 yüzey) ve 3B dokulu modeli oluşturulmuştur (Şekil 4).



Şekil 3. Sfenks Heykelinin 3B yoğun nokta bulutu.



Şekil 4. Sfenks Heykelinin 3B modeli.

Son olarak, dijital model mobil AG ve web tabanlı görselleştirme uygulamalarında kullanılmak üzere üzere “.obj” uzantılı model dosyası olarak dışa aktarılmıştır.

3.3 Doğruluk Analizi

3B modelin hatasını görmek ve başarısını ortaya koymak için doğruluk analizi yapılmıştır. Doğruluk analizi için totalstation cihazı ile elde edilen arazi koordinatları ve görüntü üzerinden alınan test verileri değerlendirilmiştir. Arkeolojik eser üzerinde işaretli, koordinatlandırma işlemiyle kullanılmayan ve homojen dağılımlı 9 adet kontrol noktası seçilmiştir. Araziden elde edilen koordinatlar kesin koordinat olarak kabul edilmiştir. Aynı kontrol noktalarının resim koordinat değerlerinden farkları alınarak, 9 adet noktanın x, y, z yönündeki karesel ortalama hataları hesaplanmıştır. 3B modelin doğruluğunun irdelenmesi üzerine yapılan araştırmaya ilişkin değerler Çizelge 1’de gösterilmektedir.

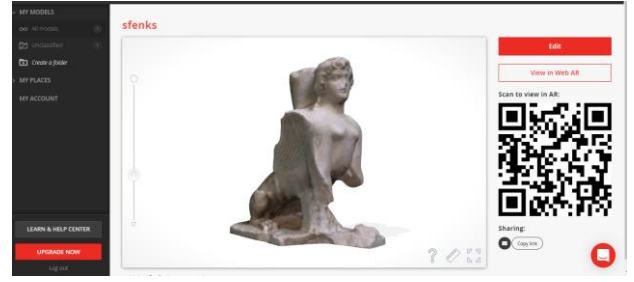
Çizelge 1. 3B modelin doğruluk analizi sonuçları.

Vi Farklar (cm)			
NN	Vx	Vy	Vz
2	-0.9	-0.7	-1.0
5	-1.2	1.3	0.9
8	-0.9	1.2	-1.5
11	-1.3	-0.8	0.6
13	-0.7	-1.1	0.8
16	1.4	-1.7	-1.3
18	0.8	-1.3	0.6
20	1.0	-0.5	1.1
23	1.2	-1.9	-1.1
Vmin	0.8	0.5	0.6
Vmax	1.4	1.9	1.5
Vort	1.0	1.2	1.0
m	1.1	1.2	1.0
mxyz		1.9	

Bu veriler neticesinde 3B modelin konum hassasiyeti ± 1.9 cm olarak bulunmuştur.

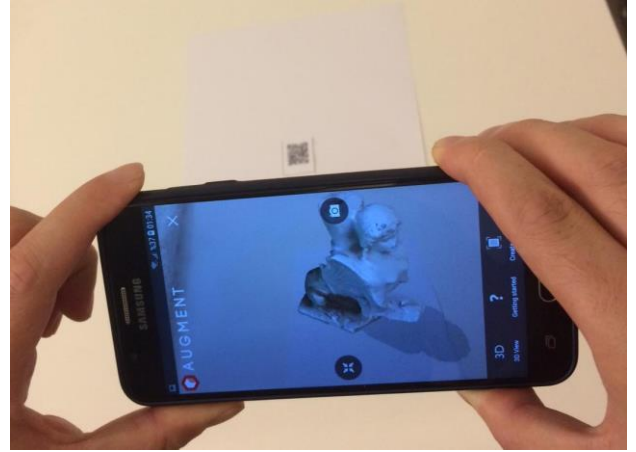
3.4 Mobil Artırılmış Gerçeklik Uygulaması

Artırılmış Gerçeklik, çevrede algılanan fiziksel unsurların, bilgisayar ortamında oluşturulan grafik, video, ses, animasyon, 3B model, konum vb. gibi veriler ile birleştirilmesi sonucunda oluşturulan, gerçek zamanlı, zenginleştirilmiş ve etkileşimli bir deneyim türüdür (Azuma 1997). Son yıllarda mobil teknolojilerdeki gelişmelerle birlikte AG uygulamalarının mobil cihazlar üzerinden oluşturulabilmesi, 'mobil artırılmış gerçeklik' kavramını ortaya çıkarmıştır (Van Krevelen and Poelman 2010). Mobil cihazlarda yer alan AG teknolojisi uygulamaları eğitim, sağlık, mühendislik, sanayii, pazarlama ve oyun sektörü gibi çeşitli alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır (Van Krevelen and Poelman 2010). Çalışmada mobil AG uygulaması için Augment (bulut tabanlı yazılım) kullanılmıştır. Augment, kullanıcıların ürünlerini gerçek ortamda ve gerçek zamanlı olarak tabletler veya akıllı telefonlar aracılığıyla 3B olarak iPhone, iPad ve Android'de görselleştirme imkânı sağlayan AG platformudur. Yazılım Perakende, E-Ticaret, mimari ve diğer amaçlarla kullanılmaktadır (Int Kyn. 1). Fotogrametrik değerlendirme ve 3B modelleme aşamasında oluşturulan Sfenks Heykelinin ".obj" uzantılı model dosyası, kaplama ve materyal dosyası ile birlikte Augment uygulamasına aktarılmıştır (Şekil 5).



Şekil 5. Sfenks Heykelinin Augment uygulamasında görselleştirilmesi.

Modele ilişkin dosyalar sisteme aktarıldıktan sonra Augment uygulaması, Sfenks Heykelinin metinsel bilgilerine ve 3B modeline erişim sağlayan bir QR kod oluşturmuştur. Mobil cihaz üzerinde bulunan AG uygulaması sayesinde QR kodun taratılması ile Sfenks Heykelinin 3B modeli mobil AG uygulamasında görüntülenmiştir (Şekil 6,7).



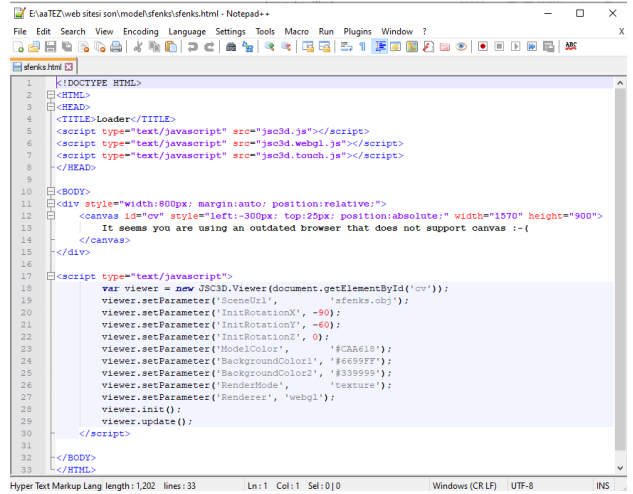
Şekil 6. QR kodun taratılması ile Sfenks Heykelinin 3B modelinin mobil AG tabanlı görselleştirilmesi.



Şekil 7. Sfenks Heykelinin mobil AG tabanlı görselleştirilmesi.

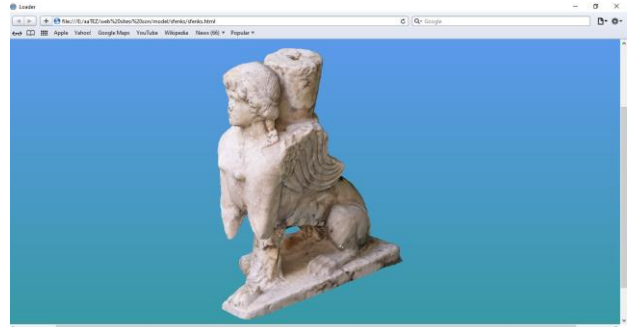
3.5 Web Tabanlı Görselleştirme Uygulaması

Web3D teknolojilerindeki son gelişmeler, kültürel mirasın dijital olarak korunmasına ve yaygınlaştırılmasına önemli bir katkı sağlamıştır. Bu aşamada Hiper Metin İşaretleme Dilinin (HTML5) alt kümesi Web Grafik Kütüphanesini (WebGL) kullanan ve birçok web tarayıcısında eklentisiz 3B görselleştirme imkânı sağlayan Three.js kütüphanesine dayalı bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Agisoft PhotoScan yazılımından dışarı aktarılan, Sfenks Heykelinin 3B modeline ait ".obj" ve ".mtl" dosyalarının web sayfası üzerinden gösterimi için gerekli kodlar Javascript 3B kütüphanesinden (Int Kyn. 2) alınmıştır. HTML kod yazma programı olarak Notepad++ kullanılmıştır. Şekil 9'deki Three.js, WebGL kodları ile 3B modelin dosyadan çağırılarak arka plan renk tonu tanımlamaları yapılmış bir ekran üzerinde konumlandırılması, 3B modelin gerçek doku dosyaları ile kaplanarak etkileşimli biçimde gösterimi ve mouse vasıtasıyla modelin yakınlaştırılması, uzaklaştırılması, sağ - sol, yukarı - aşağı yön kontrolü ile döndürülmesi sağlanmıştır.



Şekil 8. Web tarayıcısında 3B model görüntüleyici Three.js, WebGL kodları.

Oluşturulan HTML dosyasının çalıştırılmasıyla Sfenks Heykelinin 3B modeli web sayfasında görselleştirilmiştir (Şekil 9). 3B görüntüleyiciye Web tarayıcıları (Internet Explorer, Firefox, Safari ve Chrome) ile uyumlu WebGL açık kaynak kütüphanesi aracılığıyla erişilebilmektedir.



Şekil 9. Sfenks Heykelinin 3B modelinin web sayfasında görselleştirilmesi.

3B görüntüleyici, özel bir sunucuya ihtiyaç duymadan herhangi bir web sitesine yerleştirilebilmekte, HTML öğeleri ve gerçek zamanlı JavaScript güncellemeleriyle birlikte verimli bir şekilde çalışmaktadır.

4. Tartışma, Sonuç ve Öneriler

Dijital devrimin etkisi, insanların kültürel mirasla etkileşime girmesini sağlamak için çok sayıda fırsat sunmaktadır. Özellikle fotogrametri, 3B modelleme, web tabanlı görselleştirme ve AG teknolojileri, kültürel mirasla ilgili kullanıcı deneyimini geliştirme potansiyeli bakımında önemli avantajlara sahiptir.

Bu çalışmada, Kütahya Arkeoloji Müzesi'nde sergilenen Sfenks Heykelinin etkileşimli keşfi için fotogrametri tekniği ile yenilikçi AG ve web tabanlı görselleştirme teknolojilerini birleştiren bir metodoloji sunulmuştur.

Boyutu 55.48 cm (G) x 66.12 cm (Y) x 25.38 cm (D) olan Sfenks Heykelinin 3B modeli yersel fotogrametri tekniği ile düşük maliyet, yüksek çözünürlük ve ± 1.94 cm konum doğruluğunda oluşturulmuştur. Kontrol noktalarına ait y, x ve z eksenlerindeki koordinat farklarının, ortalama konum doğruluğu değerinin altında kaldığı görülmüştür. Konum doğruluğu değerleri göz önünde bulundurulduğunda 3B modelin, koruma uzmanları tarafından yapılacak restorasyon çalışmalarında ve zamanla arkeolojik eser üzerinde oluşabilecek deformasyonların tespit edilmesinde referans veri olarak kullanılabilmesi düşünülmektedir.

Çalışmanın metodoloji ve sonuçları göz önünde bulundurularak geleceğe dönük bazı öneriler aşağıda sunulmuştur:

- Gelişmiş 3B etkileşimli dijital teknolojiler, kültürel miras alanlarını ziyaret etmek isteyenlerin sayısını artırmak, ekonomik kalkınmaya ve yerel kimliğe katkı sağlamak için bir teşvik aracı olarak kullanılabilir.
- AG ve web tabanlı görselleştirme platformlarında oluşturulan gerçek sanal ortamlar ile ziyaretçilerin kültürel mirasa herhangi bir zarar vermeden tüm seyir deneyimi boyunca daha fazla ayrıntıyı gözlemlenmelerine imkân sağlanabilir.
- Günümüzde COVID - 19'un neden olduğu küresel pandemi sürecinde kültürel miras alanları bir süreliğine ziyarete kapılarını kapatmıştır. Bu bağlamda AG ve web tabanlı görselleştirme teknolojilerine dayalı sanal turizm uygulamaları, kültürel mirasa erişimin sınırlarını değiştirerek, akıllı kültürel miras hizmetlerinin dinamik gelişimini sağlayacak çözümler sunabilir.
- AG ve web tabanlı görselleştirme teknolojileri aracılığıyla kültürel miras alanları sanal ortamlara dönüştürülerek,

ziyaretlerin savunmasız grupları, özellikle de hareket kabiliyeti kısıtlı olan bireyleri kapsayacak şekilde genişletilmesi mümkün hale getirilebilir. Bu bireyler, gerçekliğe dayalı sanal uygulamalar aracılığıyla kültürel miras alanlarını sanal olarak ziyaret edebilirler ve keşfedebilirler.

Çalışmada tanımlanan yaklaşım, kültürel miras alanında sürdürülebilir yerel kalkınmayı desteklemek, kültürel mirasın korunmasını ve sanal erişilebilirliğini sağlamak, kültür yayılımını arttırmak için insan - teknoloji etkileşimine önemli katkılar sunmaktadır. Bu bağlamda sonuç olarak; fotogrametri, AG ve web tabanlı görselleştirme sinerjisinin, kültürel mirasın etkileşimli sunumu için çok modlu erişilebilir uygulamaların geliştirilmesine önemli fırsatlar sağladığı görülmüştür.

Teşekkür

Bu tez çalışması 14.FENBİL.20 numaralı proje ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından desteklenmiştir. Sfenks Heykeli üzerinde ölçme yapmamıza izin veren ve işlemler esnasında yardımlarını esirgemeyen Kütahya Arkeoloji Müzesi Müdürlüğü'ne ve çalışanlarına teşekkürlerimizi sunarız.

5. Kaynaklar

- Alptekin, A., Fidan, Ş., Karabacak, A., Çelik, M. Ö. ve Yakar, M., 2019. Üçayak Örenyeri'nin yersel lazer tarayıcı kullanılarak modellenmesi. *Türkiye Lidar Dergisi*, **1(1)**, 16-20.
- Azuma, R. T., 1997. A survey of augmented reality. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, **6(4)**, 355-385.
- Boutsis, A. M., Ioannidis, C. and Soile, S., 2019. An Integrated Approach to 3D Web Visualization of Cultural Heritage Heterogeneous Datasets. *Remote Sensing*, **11(21)**, 2508.
- Carrión-Ruiz, B., Blanco-Pons, S., Weigert, A., Fai, S. and Lerma, J. L., 2019. Merging photogrammetry and augmented reality: The Canadian Library of Parliament. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **42(2/W11)**, 367-371.
- Dhonju, H. K., Xiao, W., Mills, J. P. and Sarhosis, V., 2018. Share Our Cultural Heritage (SOCH): worldwide 3D

- heritage reconstruction and visualization via web and mobile GIS. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, **7(9)**, 360
- Hosagrahar, J., Soule, J., Girard, L. F. and Potts, A., 2016. Cultural heritage, the UN sustainable development goals, and the new urban agenda. *BDC. Bollettino Del Centro Calza Bini*, **16(1)**, 37-54.
- Kurin, R. (2004). Safeguarding Intangible Cultural Heritage in the 2003 UNESCO Convention: a critical appraisal. *Museum international*, **56(1-2)**, 66-77.
- Mertens, J. R., 2002. An Early Greek Bronze Sphinx Support. *Metropolitan Museum Journal*, **37**, 23-33.
- Marques, L., Tenedório, J. A., Burns, M., Romão, T., Birra, F., Marques, J. and Pires, A., 2017. Cultural Heritage 3D Modelling and visualisation within an Augmented Reality Environment, based on Geographic Information Technologies and mobile platforms. *Architecture, City and Environment*, **11(33)**, 117-136.
- Obradović, M., Vasiljević, I., Đurić, I., Kićanović, J., Stojaković, V. and Obradović, R., 2020. Virtual Reality Models Based on Photogrammetric Surveys—A Case Study of the Iconostasis of the Serbian Orthodox Cathedral Church of Saint Nicholas in Sremski Karlovci (Serbia). *Applied Sciences*, **10(8)**, 2743.
- Paladini, A., Dhanda, A., Reina Ortiz, M., Weigert, A., Nofal, E., Min, A. and Santana Quintero, M., 2019. Impact of virtual reality experience on accessibility of cultural heritage. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **42**, 929-936.
- Panou, C., Ragia, L., Dimelli, D. and Mania, K., 2018. An architecture for mobile outdoors augmented reality for cultural heritage. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, **7(12)**, 463.
- Polat, Y, ve Tamsü Polat, R., 2020. Arkeolojik Alanların 3B Modelleme ve 360 Derece Panoramik Görüntü ile Anlatımı: Yazılıkaya/Midas Vadisi ve Midas Kale Örneği. *Gaziantep University Journal of Social Sciences*, **19 (3)** , 647-663.
- Remondino, F. and El-Hakim, S., 2006. Image-based 3D modelling: a review. *The photogrammetric record*, **21(115)**, 269-291.
- Toprak, A. S., Polat, N. and Uysal, M., 2019. 3D modeling of lion tombstones with UAV photogrammetry: a case study in ancient Phrygia (Turkey). *Archaeological and Anthropological Sciences*, **11(5)**, 1973-1976.
- Ulvı, A. ve Yiğit, A. Y., 2019. Kültürel Mirasın Dijital Dokümantasyonu: Taşkent Sultan Çeşmesinin Fotogrametrik Teknikler Kullanarak 3b Modelinin Yapılması. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, **1(1)**, 1-6.
- Uslu, A., 2016. Kültürel Mirasın Üç Boyutlu Modellenmesi ve Web Ortamında Sunulması, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar, 83.
- Uslu, A. ve Uysal, M., 2017. Arkeolojik Eserlerin Fotogrametri Yöntemi İle 3 Boyutlu Modellenmesi: Demeter Heykeli Örneği. *Geomatik*, **2(2)**, 60-65.
- Uysal, M., Uslu, A., Toprak, A. S. ve Polat, N., 2015. Arkeolojik Eserlerin Fotogrametrik Yöntemle 3 Boyutlu Modellenmesinde Menagas Mezarı Steli Örneği. *TUFUAB VIII. Teknik Sempozyumu*, **46**, 252-254.
- Van Krevelen, D. W. F. and Poelman, R., 2010. A survey of augmented reality technologies, applications and limitations. *International journal of virtual reality*, **9(2)**, 1-20.
- Yakar, İ ve Bilgi, S., 2019. Mobil Telefonlar Kullanılarak Elde Edilen 3 Boyutlu Modellerin Kültürel Mirasın Korunması Kapsamında Kullanılabilirliği: İii. Ahmet Çeşmesi Örneği. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, **1(1)** , 25-29.

İnternet kaynakları

1- <https://www.augment.com>, (07.09.2020)

2- <https://threejs.org>, (07.09.2020)

Perakende Market Lokasyonları için CBS Tabanlı Çok Kriterli AHP Yöntemi ile Optimal Yer Seçimi Analizi: İstanbul Örneği

Hasan Can BEYHAN^{1*}, Gizem EREN², Bahadır AKTUĞ³

¹ Başarsoft Bilgi Teknolojileri A.Ş., Ankara

² Başarsoft Bilgi Teknolojileri A.Ş., Ankara

³ Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği, Ankara

Sorumlu yazar e-posta ¹ hasan.beyhan@basarsoft.com.tr. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1920-4516>

² gizem.eren@basarsoft.com.tr. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5388-563X>

³ aktug@ankara.edu.tr. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7995-4477>

Geliş Tarihi: 01.10.2020

Kabul Tarihi: 14.12.2020

Öz

Anahtar kelimeler

Grid Bazlı Yer Seçimi; Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS); Önemli Noktalar (POI); Perakende Zincir Marketler; Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP); Coğrafi Karar Destek Sistemi (GeoKDS).

Potansiyel zincir market yerlerinin optimal olarak seçilmesi hala ilgi gören bir konudur. Yeni açılan marketlerin önemli bir bölümü düşük karlılık ve Pazar yamyamlığına maruz kalmaktadır. Karlılığı yüksek market yerlerinin seçimi konusunda, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve büyük veri setleri kullanan sayısal yöntemlerin, kişisel deneyim ve içgüdülere dayalı geleneksel yöntemlere göre daha etkin olduğu ortaya konmuştur. Diğer yandan, veri setinin ölçeği büyüdükçe, olası tutarsızlıkların olma ihtimali artmaktadır. Bu çalışmada, İstanbul'daki zincir market yerlerinin seçimi için mevcut en büyük CBS veri seti kullanılmış ve tüm veri seti için kapsamlı bir tutarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. 23 adet öznitelikten oluşan geniş bir veri kümesi çalışmada girdi olarak kullanılmış ve optimal market yerlerinin belirlenmesinde Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) kullanılmış ve sonuçlar İdeal Çözüme Benzerlikle Tercih Düzeni Tekniği (TOPSIS) yöntemi ile de doğrulanmıştır. Sonuçlar, mevcut 7196 market yerinden 218'inin analizler sonucunda yüksek potansiyelli olarak tespit edilen lokasyonlarda yer aldığını, bununla birlikte tespit edilen 75 yüksek potansiyelli alanda hala yeni market açılması için potansiyel olduğunu göstermektedir.

Optimal Location Selection for Retail Market Locations with GIS Based Multi Criteria AHP Method: The Case of Istanbul

Keywords

Grid Based Location Selection; Geographic Information System (GIS); Points of Interest (POI); Retail Chain Markets; Analytical Hierarchy Process (AHP); Geographical Decision Support System (GeoKDS).

Abstract

Optimal selection of possible chain market locations is still an ongoing interest. A significant number of newly founded markets are suffering from low profitability and cannibalism. Contrary to the traditional methods which are based on personal experience or instincts, quantitative methods which employ Geographic Information Systems (GIS) and large data sets have proved to be more efficient to determine the most profitable and market locations. On the other hand, the larger the scale of the data set, the more prone it is to possible inconsistencies. In this study, we employ the largest available GIS data set for selection of chain market locations in Istanbul and carry out an extensive consistency test for the whole data set. A wide range of 23 attributes were incorporated into the analysis and Analytical Hierarchy Process (AHP) was used to determine the optimal locations. The results were also confirmed by the Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) method. The results show that 218 out of 7196 markets are already located high potential areas determined in the analysis and there is still a potential to establish new markets in 75 high potential areas according to our analysis.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Günümüzde artan nüfusun yarattığı talep sorunu birçok sektörde gözle görülür şekilde talep artışına neden olmaktadır. Bu sektörlerden birisi de

perakende market sektörüdür. Artan nüfus ve şehirleşme sırasında oluşan talep artışı nedeniyle firmalar en optimal biçimde süreçlerinde iyileştirmeye giderek maliyetlerini azaltmaya çalışmaktadırlar. Talep artışı ile birlikte şehirlerdeki

market sayıları gittikçe artmakta ve tüketiciye ulaşılabilirlik konusunda birçok sorun ortaya çıkartmaktadır. Perakende marketler günümüzde sadece gıda tedariki değil bir evin tüm ihtiyaçlarını karşılama konusunda kendilerini ve tedarikçilerini geliştirmişlerdir. Büyüyen şehirlerde artan taleple birlikte sektörde çok sayıda firma hizmet vermektedir.

Türkiye’de market sektörü Ocak 2018’den itibaren ilk 9 ayda 2,517 adet yeni market sayısı ile birlikte %9 büyümüştür. 28,544 olan market sayısı 2018’in ilk 3 çeyreğinde 31,061’e yükselmiştir (Int Kyn. 1).

Türkiye Alışveriş Merkezleri ve Perakendeciler Federasyonu (TAMPF) ve Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği (TOBB) raporuna bakıldığında ise genişleme hacminin hedefleri ortaya konularak, Türkiye’de perakende market ve alışveriş merkezi (AVM) istihdam sayılarının 2023 yılında hedef olarak şu anki durumun 2 katına erişeceği, mağaza sayılarının toplamda 84,000 adet olacağı ve istihdam sayısının 1 milyon üzerine çıkacağı öngörülmektedir (TAMPF 2016).

Son yıllarda perakende sektörü, yerel ve yabancı yatırımların da eklenmesiyle büyük ölçüde gelişmekte ve büyümektedir.

Perakende sektörde, özellikle gıda ürünleri, Dünya’da 2020 Mart’ ta ortaya çıkan Covid-19 etkileri ile de etkilenerek tüketicileri en yakınlarındaki markete ve mobil uygulamalar ile online satışa yönlendirmiştir. Covid-19 sürecinde yaşananlar nedeni ile insanlar market alışverişlerini yoğunlaştırmışlardır. Online sipariş veren müşterilerin siparişini zamanında teslim edebilmeleri için mağazanın konumu yine önem kazanmaktadır. Perakendeciler ve alışveriş merkezleri için artan perakende ürünleri talebi için konum yönetimi sayesinde maliyetlerin azalması ve böylece daha yüksek karlar getirebildiği düşünülmektedir.

Perakende market firmaları için yer seçimi, stratejik ve geri dönüşü maliyetli olan bir karar olduğu için, firmalar yer seçimi yaparken nüfus, rekabet ve ekonomik özellikler gibi birçok kriteri değerlendirmek durumundadırlar (Karadeniz 2009). Tüm bunlara ek olarak işletmelerin rakiplerine yakın olması da önemli derecede etki yaratmaktadır. Coğrafi talep ve coğrafi rekabet birlikte analiz

edilerek yeni bir perakende market için yer seçimi tanımlanabilir. Bir mağaza açıp açmamaya karar verme, birçok kriteri devreye sokarak olasılıklar listesinden en uygun konuma karar verilmesidir (Wood and Reynolds 2012).

Kâr marjına yansıyan bu durum firmanın birbirine yakın kendi şubeleri arasında gerçekleşen Pazar yamyamlığı (Cannibalism) tanımını ortaya çıkarmakta ve firmalara zarar vermektedir (Merunka 2010). Perakende sektörü, kolayca erişilebilen ve ürünlerini maksimum sayıda müşteriye sunabileceği yerleri seçmektedir. Rekabet, perakende sektörü için en önemli yer seçim kriterlerinden biridir (Kayacan ve Yirmibeşoğlu 2017). Bu nedenle firmaların yer seçimi konularında çalışmaları ve teknoloji yatırımları artmaktadır. Yer seçimi konusu perakende marketlerin artan şube sayısından oluşan rekabet, cannibalism ve tüketicilerin ihtiyaçlarına maksimum yanıt vermede çok önemlidir.

Günümüzde firmalar, yer seçimi kararlarının "vermeleri gereken en önemli karar" olduğunun ve bunu yaparken de bilimsel yollara başvurmaları gerektiğinin farkındadırlar (Ladle et al. 2009).

Yer seçimi ilk olarak 1950’lerde Amerika Birleşik Devletleri (ABD)’de hükümet projelerinde kullanılmıştır. Bunun ardından, yer seçimi tüm sektörlerde yayılmıştır. Yayılan sektörlerde firmalar kendi yer seçim kriterleri ve yöntemlerini geliştirmişlerdir. Yer seçimi kavramı karlılığı artırmak ve ticari yönetimi sağlamak için kullanılmaktadır. Perakende market firmalarının piyasada rakiplerine göre hayatta kalabilmesi için yer seçimi yapması çok önemlidir. Firmalar bu yüzden taleplerini, müşteri ihtiyaçlarını ve tahminlerini kullanarak en uygun yeri seçerler. (Kayacan ve Yirmibeşoğlu 2017).

Perakende marketler için iyi bir yer seçimi hedef pazar, rakipler ve maliyetlerle ilişkilidir. Aynı zamanda çevre koşullara göre de etkilenmektedir. Uygun rakipler, yeterli park yerleri ve trafik gibi başka koşullar da bu seçime etki etmektedir. Müşteriler kolay ulaşım imkânı bulunan mağazaları tercih etmektedirler (Karadeniz 2009).

Müşteri tercihindeki en belirgin kriter markete ulaşmaktır. Perakende marketlerin, nüfusun daha yoğun ve ulaşımın daha kolay olduğu yerlerde bulunması gerekmektedir (Şentürk vd. 2017).

Perakende marketler için yer seçimi; firmalar için finansal ve kurumsal imaj riskleri oluşturabilmesinden (Alarcon 2011), kentsel alanlarda perakende ağı bulma ve uygun yer seçimi sağlayabilmesinden (Roig-Tierno et al. 2013) ve yeni mağazaların açılacağı optimal yerlerin belirlenmesinden dolayı uygun analizi yapmak adına çok önemlidir (Hernández and Bennison 2000).

Firmalar yer seçimi konusunu, gelişen teknolojiler sayesinde bilgi sistemleri ile yönetmeye çalışmaktadırlar. Dünya’da Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS)’de bu bilgi sistemlerinden en önemlisi ve tercih edilenidir. CBS kullanımının yaygınlaşması ve yer seçimlerindeki etkililiği de buna destek olmaktadır (Kayacan ve Yirmibeşoğlu 2017).

CBS sözel ve koordinatlı verileri yönetebilme ve sunabilme özelliği sayesinde mühendislik, işletme, iktisat, yer bilimleri vb. birçok alanda kullanılan ve bu alanlardaki verileri baz alarak oluşturulan karar destek sistemleri sayesinde karar vericilere destek olan bir bilgi sistemidir. CBS teknolojileri sayesinde satış ve zaman analizleri, pazarlamaya ait müşteri ve pazar araştırmaları, ticaret alanları gibi pek çok konu analiz edilmektedir. CBS, Çok kriterli yer seçiminde karmaşık yapıdaki verilerin değerlendirilmesinde hızlı ve etkili bir şekilde kullanılmaktadır. (ŞAHİN 2010).

Perakende marketler için uygun yerin belirlenmesinde CBS teknikleri kullanılarak yapılan çalışmalara bakıldığında; veri görselleştirme karar alma sürecinde (Musyoka et al. 2007), teknik bilgiye sahip olmayan yöneticiler için bilgileri daha kolay anlamalarında ve kritik olan kararları almalarında (Ozimec et al. 2010), dijital haritaların ilişkisel veri tabanları ile ilişkilendirilerek karar alma süreçlerinin etkin hale gelmesinde (Mendes and Themido 2004), CBS araçlarının kullanımına dayalı özel araçlar sayesinde hız ve verimliliğin artmasında (Wood and Reynolds 2012) ve en uygun yerin optimal tespitinde (Mendes and Themido 2004) yardımcı olmaktadır.

Günümüzde yer seçimi analizi CBS sistemi kullanılarak yaygınlaşmaktadır. Bu kapsamda birçok farklı sektörde çalışmalar yapılmaktadır. Enerji sektöründe güneş enerji santrallerinin, rüzgâr santrallerinin, uygun trafo yerlerinin seçimleri gibi çalışmalarda, bankacılık sektöründe ATM, şube vb yer seçiminde, AVM, market, eczane gibi diğer

konularda da yer seçimi analizleri yapılmaktadır. (Bayar 2019)’da Ankara’da yaptığı alışveriş merkezlerinin kuruluş yerlerinin tespiti için CBS kullanılarak gerçekleştirilen analizler doğrultusunda, doğru planlama ile en uygun yerler seçilmiştir (Bayar 2019). Rüzgâr türbinleri için, rüzgâr enerjisi üretimi ile büyük potansiyele sahip olan Çanakkale ve Balıkesir bölgelerinde CBS kullanılarak yer seçimi sonuçları hesaplanmıştır (Atici vd. 2015). Güneş Enerjisi Çiftliklerinin uygun alanının belirlenmesi için, CBS ve Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) yöntemi kullanılarak güneş enerjisi çiftlikleri için en uygun yer seçimi çalışması yapılmıştır. (Uyan 2013). Özel bir bankaya ait ATM’ler için Kayseri ili içerisinde ATM’lere ait veri setleri kullanılarak gerçekleştirilen veri kümesinden kural bazlı bir karar destek modeli oluşturularak yer seçimi yapılmıştır (Zeydan ve Kayserili 2019). Spor bahis bayileri için uygun yerin belirlenmesi kapsamında yine CBS ortamında çok kriterli yer seçimi analizi sayesinde uygun kriterli yerler haritalı sonuçlar üretilmiştir. (Şentürk vd. 2017).

Yer seçimi analizinin farklı dallarda çalışmalarının ardından perakende market zincir noktaları ile ilgili yapılan çalışmalar tarandığında ise birçok farklı çalışma ortaya çıkmaktadır. Çin’in Guiyang eyaletinde 2018 yılında yapılan çalışmada 18 sosyoekonomik kriter baz alınmış ve küçük perakende mağazalar için yer seçimi sayesinde mekansal erişilebilirlik değerlendirmesi ve pazar potansiyeli tahmini olan iki aşamalı hibrit bir model önerilmiştir. Bu modele göre hedef bölgelerin mekansal erişilebilirliği ve perakende mağazaların bulunmadığı bölgelerin belirlenmesi sağlanmıştır. İki aşamalı model, pazar potansiyeli en yüksek ve rekabeti düşük alanları belirlemiştir. Önerilen model, perakende zincirlerini, iş yeri planlamasının geliştirilmesini ve bölgesel kalkınma politikalarının formüle edilmesini yönlendirmiştir. Bu çalışma CBS üzerinden kriterler belirlenerek ve kullanılan kriter ve veri seçimleri mevcut eyalet ve ülke yapısı göz önünde bulundurularak yapılmıştır (Wang et al. 2018). İspanya’nın Murcia şehrinde 2013’de yapılan bir başka çalışmada ise perakende market satış yeri konumu seçme süreci için CBS ve AHP yöntemini birleştiren bir metodoloji ile yapılmıştır. Bu çalışma bir süpermarket için başarı faktörlerinin konumu ve

rekabetiyle ilişkili olduğunu göstermektedir. Sonuçlar, bir süpermarketin başarısının %75' inin; geçen ticaret hacmi alanın görünürlüğü, bir süpermarket ve rakipleri arasındaki mesafe ve potansiyel ile açıklandığını ortaya koymuştur. Çıkan bulgulara dayanarak en önemli faktörlerin yer ve rekabet ile ilgili olduğu sonucuna varılmaktadır. Yapılan çalışma bina verileri üzerinden hesaplanmıştır. Ancak Türkiye'deki verileri göz önüne alındığında bina verilerinin sağlıklı olmayışı böyle bir çalışmanın yapılmasına engel olmaktadır (Roig-Tierno et al. 2013). 2002 yılında ise bulanık AHP algoritmaları kullanılarak yapılan çalışmada, marketler için yer seçim karar destek modeli ile örneklenen mağazaların orijinal tarihsel verilerini değiştirmede, mesafe ve rekabet faktörlerini içeren veri işleme prosedürlerinin tahmin doğruluğunu gerçekten ileri taşıdığı doğrulanmıştır. Ancak bu çalışma sadece kriter seçimlerinin nasıl olacağı ve mevcuttaki geleneksel yöntemlerin tartışmaları ile daha çok kriter belirlemedeki süreçlerden bahsetmiştir (Kuo et al. 2002). 2012 yılında İspanya'nın Gran Canaria adalarını baz alan bir bölgede sadece tek bir tesisin bulunması gereken bir dağıtım sisteminde, çatışan hedefler arasında belirli bir denge kurulması amacı ile karar verme araçları oluşturması amaçlanmıştır. Bu sayede rekabetçi konum modelleri ve CBS araçları kullanılmıştır. Hem pazar payını temsil eden hem de pazar yamyamlığı (cannibalism) etkisini gösteren bir harita sağlamak üzere çalışılmıştır. Çalışmaya yasak bölgeler ve diğer kısıtlar dahil edilerek yeni bir tesis açıldığında oluşan etkiler CBS harita teknikleri kullanılarak görselleştirilmiştir. Çalışma bölge bazlı yapılmış ve Gran Canaria koşulları altında gerçekleştirilmiştir (Suárez-Vega et al. 2012). 2010 yılında ülkemizde perakende market sektörü için şube yer seçimi problemine yönelik örnek bir uygulama yapılmıştır. İstanbul'un Pendik ilçesinin 14 mahallesi pilot bölge seçilerek bu bölgede hizmet veren bir perakende şirketinin açacağı 5 yeni şube için en uygun yer seçimi analizi yapılmıştır. Bu uygulama kapsamında nüfus, ekonomi ve yerleşim verileri kullanılarak uzaklık, nüfus yoğunluğu ve yola yakınlık gibi önemli kriterler yardımıyla market alanları belirlenmiştir. Çalışmada CBS teknolojilerinin karar destek sistemlerindeki önemi ve avantajları vurgulanmıştır.

Ancak çalışma kapsamı 2010 şartlarına göre değerlendirilmiş ve küçük bir örneklem üzerinden az sayıda kriter ve veri ile gerçekleştirilmiştir. (ŞAHİN 2010).

Bu çalışmada ise, benzer çalışmalar ve perakende market zincir noktalarının yer seçiminde kullanılan kriterler literatürden taranmıştır. Literatür taraması sonucunda belirlenen kriterlere ek olarak Türkiye'deki veri bulunabilirliği göz önüne alınarak kriter sayısı ve niteliği artırılmıştır. Kriterler talep kapasitesi, harcama kapasitesi, ulaşım kolaylığı, düşük rekabet, merkezi konum ve diğer önemli noktalara yakınlık olarak belirlenmiştir. Belirlenen kriterler için veriler nüfus artışı, nüfus yoğunluğu, pazar yayılımı ve şehrin büyüme kapasitesi göz önüne alınarak İstanbul ilinde yapılması kararlaştırılmıştır. CBS yardımı ile oluşturulmuş olan "GeoKDS (Coğrafi Tabanlı Çok Kriterli Mekansal Karar Destek Sistemi)" web uygulaması sayesinde belirlenen veriler kapsama (coverage) hesabı ile İstanbul ili sınırlarında kalan gridlere işlenmiştir. İşlenen veriler sınıflandırılarak literatür taraması sonucu karar verilen çok kriterli AHP yöntemi ile önem derecesine göre uzmanlar tarafından matrislerle puanlanmış ve gridlerin optimal yer seçimi için toplam puanı hesaplanmıştır. Bu çalışma kapsamında kullanılan 23 farklı öznelik, ülkemizde yapılan bu tür analizlerin en kapsamlısı olarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca puanlamalar TOPSIS metodu üzerinden tekrar analize sokularak doğrulanmış ve test edilmiştir. Veri kümesinin artması, veri tutarlılıklarının da daha iyi kontrol edilmesini gerektirmektedir. Kullanılan yöntemin her aşamasında, tutarlık oranı ve tutarlık endeksleri hesaplanarak, nihai sonuçların duyarlılığı kontrol edilmiştir. Sonuç olarak hesaplanan toplam puanlar grid bazlı tematik haritalarla görselleştirilmiştir. Görselleştirilen sayısal coğrafi veri üzerinden mevcut perakende market zincir noktaları ile karşılaştırılma yapılmış bu sayede mevcut market zincir şube konumları ve çıkan sonuçlar kıyaslanmıştır. Sonuçlara bakıldığında 75 adet gridin yeni market zincir noktası açmak için yüksek potansiyelli olduğu ve mevcut marketlerin şu andaki pazar payı göz önüne alındığında %3 'ünün çalışma kapsamında yüksek potansiyelli yerlerde hizmet verdiği tespit edilmiştir. Bu sayede karar vericilere

analizin dinamik yapısı sayesinde yeni zincir market açmada yardımcı olması, rakiplere göre mağaza konumlandırma ve mevcut şubelerin Pazar yamyamlığı (cannibalism) açısından arındırılmasına, sonuçların mevcut İstanbul zincir market potansiyelini ortaya koyarak yeni şube açımında kullanılacak grid bazlı tematik haritaların oluşturulması sağlanmıştır.

2. Yöntem

Önemli ve geri dönüşü zor olan seçimler için yalnızca sezgisel olarak alınan kararlar yeterli olmamaktadır. Karar verme problemi, birçok seçenek içerisinde bir amaca göre en uygun seçeneğin belirlenmesidir (Saaty 1994). 1960'lı yıllarda karar verme problemlerini basite indirgeyecek çok kriterli karar verme yöntemleri geliştirilmeye başlanmıştır (Wind and Saaty 1980).

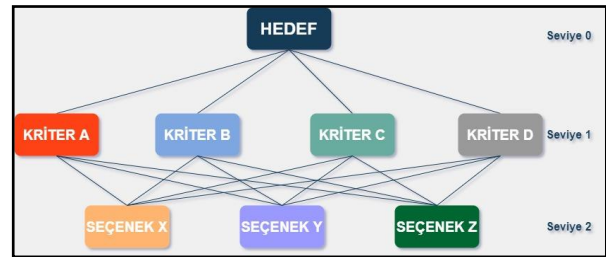
2019 yılında yapılan bir çalışmada yer seçimi problemlerinin en çok, çok kriterli problemler ile çözüldüğü ortaya konulmuştur (Zeydan ve Kayserili 2019). Yapılan literatür taramaları, çok kriterli problemlerin ise en çok AHP yöntemi kullanılarak çözüldüğünü ortaya koymaktadır. Problemimizin çok kriterli yapısı ve bu yapının AHP yöntemi ile kolay eşlenebilmesi nedeni ile AHP yöntemi seçilmiştir. CBS üzerinde daha verimli olması, yazılıma kolay aktarılıyor olması ve diğer başka çalışmalarda yoğunlukla kullanılıyor olması AHP yöntemini seçmemizdeki temel esaslardır.

2.1 Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP)

1970'li yıllarda Thomas Saaty tarafından geliştirilen AHP Yöntemi, birden fazla kriter ile karar verme problemlerinin çözümü için geliştirilmiş bir yöntemdir (Kuruüzüm ve Atsan 2001). AHP Yöntemi, problemleri hiyerarşik bir yapıda sınıflandırarak her seviyede kriter ağırlıklandırma matrislerinin oluşturulmasıdır (Saaty 1994). AHP Yöntemi birçok alanda kullanılmaktadır. Fabrikaların yer seçimi analizi (Yang and Lee 1997), uçak seçim süreci (Dožić and Kalić 2014), rüzgâr santrali yer seçimi (Atici et al. 2015), risk analizi (Millet and Wedley 2002), uygulama alanlarından bazılarıdır.

Analitik hiyerarşi süreci (AHP), başlangıçta ortaya konan kriter ve alternatiflerle karmaşık sorunları çözmeye yönelik bir hiyerarşik model

tanımlamaktan oluşur. Karmaşık problemler basit kararlara bölünerek, problemin daha basite indirgenip çözülmesi sağlanır (Arquero et al. 2009). Çok kriterli karar modeli ile perakende marketlerin açılacağı uygun yeri seçmek ve bunu önceliklendirmek mümkün hale gelmektedir. AHP yöntemi başarıyı etkileyen kriterleri belirlemektedir (Gbanie et al. 2013). Karar verme sürecinde bir ya da daha fazla çözüm belirlenerek bu süreci kolaylaştıran çok kriterli karar modelleri kullanılmaktadır (Rybarczyk and Wu 2010). AHP yöntemi üç ana adımdan oluşmaktadır (Saaty and Vargas 2001). Şekil 1 de ifade edildiği gibi, ilk adım, problemi hiyerarşik bir yapıya ayırarak bu hiyerarşiyi birkaç seviyeye bölmektir.



Şekil 1. AHP Yöntemi Hiyerarşik Yapısı

ikinci adım, kurulan hiyerarşinin her seviyesinde karar çizelgelerini oluşturmaktır. Matrisler, göreceli veriler kullanarak ikili karşılaştırmayı sağlamaktadır. Bu ikili karşılaştırma, her faktörün katkısının bağımsız olarak değerlendirilmesine izin vererek karar verme sürecini basitleştirmektedir (Rezaei-Moghaddam et al. 2008). Çeşitli kriterlerin ikili karşılaştırmaları organize edilerek bir kare matrise dönüştürülmektedir. Karşılaştırma matrisi kriterlere veya alt kriterlere göre ağırlıklandırılıp, alternatiflere göre derecelendirilerek göreceli önemi ortaya çıkarmaktadır (Bhushan and Rai 2004). Matrisin tutarlılığı değerlendirilerek bu tutarlılık endeksi bir eşik seviyesine ulaşamazsa, karşılaştırma cevapları yeniden incelenmektedir (Şener vd. 2010). Temel olarak hedef, kriterler ve alternatiflerden oluşmaktadır. Kriter ve alternatiflerin ikili karşılaştırılması ve bu karşılaştırmanın nümerik olarak puanlanmasına dayanmaktadır. Puanlama birçok yöntem ile yapılabilmektedir. Ancak temel olarak Çizelge 1'deki yapıya literatürde rastlanmaktadır (Saaty 2008).

Çizelge 1. Kriterlerin Göreceli Yargılarının Karşılaştırma Puanı Çizelgesi (Saaty 2008)

Skor	Yargılar
1	Eşit önem
2	Zayıf veya Hafif Önem
3	Orta Önem
4	Orta Üstü Önem
5	Güçlü Önem
6	Güçlü Üstü Önem
7	Çok Güçlü Önem
8	Çok Çok Güçlü Önem
9	Son Derece Önem

Yapılan puanlamanın ardından oluşturulan matrisler arasında aşağıdaki tutarlılık hesaplamaları yapılmıştır. Bu formüller genel tutarlılık formülleridir. Hesaplamalarda kullanılan Rastgele Tutarsızlık Endeksi oranı Çizelge 2 de yer almaktadır.

Tutarlılık Endeksi (Consistency Index-CI)

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

Tutarlılık Oranı (Consistency Rate-CR)

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

Öncelikler Vektörü (Priorities Vector)

A: Karşılaştırma Matrisi (Comparison Matrix)

p: Öncelikler Vektörü (Priorities Vector)

λ: Maksimum Özdeğer (Maximal Eigenvalue)

$$A * \vec{p} = \lambda * \vec{p} \quad (3)$$

Rastgele Tutarsızlık (Random Inconsistency-RI)

Çizelge 2. Rastgele Tutarsızlık Çizelgesi

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Tüm sonuçlar incelendiğinde hesaplamaların tutarlı olup olmadığı hesabı, tutarlılık endeksi değerinin %10'un altında (CR<0.1) kalması ile ilişkilidir (Dožić and Kalić 2014). Tüm sonuçlar bu çizelge, formüller ve sonuç değerleri üzerinden hesaplanmıştır ve tutarlılığı test edilmiştir. Karar verme yöntemi başka bir karar verme yöntemi olan İdeal Çözüm Benzerlikle Tercih Düzeni Tekniği (TOPSIS) ile test edilip doğrulanmıştır.

2.2 İdeal Çözüm Benzerlikle Tercih Düzeni Tekniği (TOPSIS)

Çok kriterli karar verme yöntemlerinden bir tanesi olan TOPSIS yöntemi 1981 yılında Hwang ve Yoon tarafından geliştirilmiştir (Wei 2010). Pozitif ideal çözüme en yakın mesafe ve negatif-ideal çözüme en uzak mesafe adımından yola çıkarak oluşturulmuştur (Monjezi et al. 2010). TOPSIS metodunun süreçleri 6 adımdan oluşmaktadır (Uygurtürk 2012). İlk adımda karar verme kriterlerinin belirlenerek karar matrislerinin oluşturulması gerekmektedir. Karar matrisinde seçenekler yukarıdan aşağıya bir hiyerarşide kaydedilir (Timor 2011).

TOPSIS yönteminin aşamaları aşağıda açıklanmıştır.

1. Amaçlar belirlenerek, karar matrisleri oluşturulur. Karar matrisinde satırlar alternatifleri, sütunlar ise kriterleri gösterir.

$$K = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

2. Kriterler ile alt kriterlerin karşılaştırılması ve üstünlüklerin belirlenmesi kapsamında karar matrisi oluşturulur (Supçiller ve Çapraz, 2011). Normalleştirme için, karar matrisindeki kriterlere ait değerlerin kareleri toplamının karekökü alınır.

$$Z_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n a_{ij}^2}} \quad R = \begin{bmatrix} Z_{11} & \dots & Z_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ Z_{m1} & \dots & Z_{mn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$(i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, k)$$

3. Normalleştirilmiş karar matrisinde kriterlere verilen öncelikler aracılığıyla ağırlık değerleri hesaplanır. Standart karar matrisinin (V) bulunabilmesi için kriterlere ilişkin belirlenen kriter ağırlık değerleri (w_i) ile çarpılarak bulunur.

$$V = \begin{bmatrix} w_{11} & \dots & w_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ w_{m1} & \dots & w_{mn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

4. Ağırlıklandırılmış matriste her bir sütunda en yüksek ve en düşük değerler belirlenerek A + ve A- ideal noktaları tanımlanır. A+ en iyi performans

değerlerini, A- ise en kötü değerleri temsil eder (Supçiller, Aliye Ayca Çapraz, Ozan).

Maksimum değerler,

$$A^+ = \{x_1^+, x_2^+, \dots, \dots, x_k^+\} \quad (7)$$

Minimum değerler.

$$A^- = \{x_1^-, x_2^-, \dots, \dots, x_k^-\} \quad (8)$$

5. Maksimum ideal noktaya olan uzaklık

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^k (x_{ij} - x_j^+)^2} \quad (9)$$

(i = 1, ..., n)

Minimum ideal noktaya olan uzaklık

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^k (x_{ij} - x_j^-)^2} \quad (10)$$

(i = 1, ..., n)

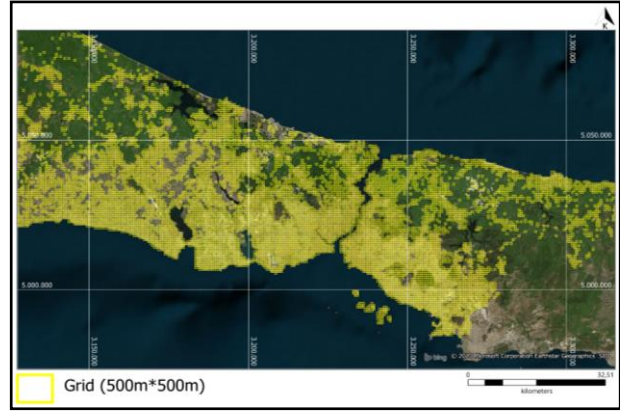
6. Yakınlık katsayılarının hesaplanması sonucunda alternatiflerin puanı hesaplanır:

$$C_i^+ = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad 1 \geq C_i \geq 0 \quad (10)$$

Elde edilen yakınlık katsayılarının (C_i^+) değerlerine göre alternatifler sıralanır. Yakınlık katsayısı 0 ile 1 arasında değer alır. Yakınlık katsayısı en yüksek olan alternatifler arasında en iyi olarak kabul edilir.

2.3 Grid Bazlı Haritalama

Grid bazlı haritalama teknikleri çok yaygın olarak kullanılan bir haritalama tekniğidir. Türkiye'deki bina verilerinin eksik ve düzgün olmaması nedeni ile grid bazlı puanlama çalışması amaçlanmıştır. Grid boyutu, mevcut veri kümesindeki zincir market lokasyonlarını baz alarak 500 m x 500 m olarak seçilmiştir. Şekil 2 de İstanbul ili için hazırlanmış grid haritası gösterilmiştir. Boş olan alanlar verilerin o bölgede işleme girmeyeceğini göstermektedir.



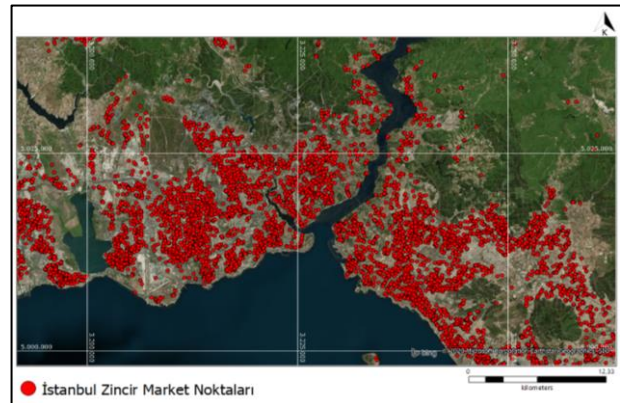
Şekil 2. İstanbul 500 m x 500 m Grid Haritası

3. Uygulama

3.1 Çalışma Alanı

İstanbul nüfus, ekonomi ve kültürel bakımdan Türkiye ve Dünya'nın en önde gelen şehirlerinden biridir. Dünyada ekonomik büyüklükte 34., nüfus verilerine göre Avrupa'da 1., dünyada ise 6.'dır. 15,519,267 nüfusa sahip ilde 964 adet mahalle bulunmaktadır (Int Kyn. 2). Yapılan çalışmanın ana girdilerini nüfus ve işyeri yoğunluğunun oluşturması, küresel rekabet pazarının en aktif şekilde çalışılan şehri olması ve zincir market rekabetinin yoğun yaşanan bir bölge olması nedeni ile İstanbul ili çalışma alanı olarak seçilmiştir.

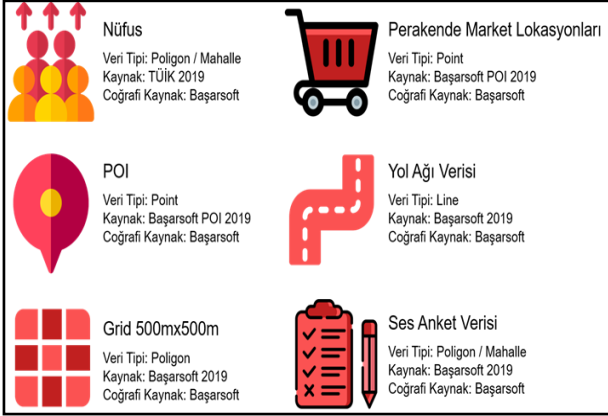
Çalışma kapsamında İstanbul ili baz alınarak veriler ve gridler çıkartılmıştır. Bu kapsamda toplamda 11,413 adet grid (500 m x 500 m) mevcut olduğu tespit edilmiştir. Gridler coğrafi analizle CBS üzerinden hesaplanmış ve en küçük kesişime kadar alınmıştır. Grid verileri dışında POI verilerinden türetilen zincir market sayısı İstanbul ilinde 7,196 adettir. Şekil 3'te Zincir Marketlerin İstanbul ili üzerindeki dağılımı harita kullanılarak gösterilmiştir.



Şekil 3. İstanbul'da Zincir Market Dağılımı Haritası

3.2 Kriterler ve Veriler

Yapılan literatür çalışması sonucunda verilerin bulunabilirliği de göz önünde bulundurularak aşağıdaki kriterler seçilmiştir. Seçilen kriterler için veri kaynakları ve çeşitleri Şekil 4 ve Çizelge 3’de detaylı olarak anlatılmıştır. Çalışma Türkiye’deki bina verilerinin sağlıklı olacağı göz önünde bulundurularak 500 m x 500 m’lik gridlere işlenerek hazırlanmış ve CBS üzerinde veri tabanı oluşturulmuş yazılıma aktarılmıştır.



Şekil 4. Belirlenen Kriterler ve Veri Künyesi

Seçilen kriterlerin alt detayları nüfus, POI, Anket ve Yol Orta verileri başlıkları altında ayrıntıları ve açıklamaları Çizelge 3 de anlatılmıştır.

Çizelge 3. Veri Çizelgesi

Kriter	Veriler	Açıklama	
Nüfus Başarsoft 2019	Nüfus	Mahalle Bazlı Nüfus Verisi *TÜİK verileri kullanarak Başarsoft tarafından hazırlanmıştır.	
	POI Adeti	Tüm POI Verileri Adeti	
	POI Kategorisi	POI Kategorisi Çeşitliliği	
	Banka Şube- ATM	Banka ve ATM Noktası Sayısı	
	AVM	AVM Noktası Sayısı	
	Önemli Noktalar (POI) Başarsoft 2019	Cami	Cami Noktası Sayısı
		Üniversite	Üniversite Noktası Sayısı
		Metro, Otobüs ve Taksi Durakları	Metro, Otobüs ve Taksi Durak Noktası Sayısı
		Büfe ve Market Sayısı	Büfe ve Market Noktası Sayısı
	Zincir Market Sayısı	Zincir Market ve Gross Market Noktası Sayısı	
Anket Ses Anket 2019	Hane Sayısı	Mahalle Bazlı Hane Sayısı	
	Hane Büyüklüğü	Mahalle Bazlı Ortalama Hane Büyüklüğü Sayısı	
	Toplam Daire Sayısı	Mahalle Bazlı Toplam Daire Sayısı	

Konut Sayısı	Mahalle Bazlı Konut Sayısı	
Konut Yoğunluğu (km ² ye düşen)	Mahalle Bazlı Konut Yoğunluğu Oranı	
İşyeri Yoğunluğu	Mahalle Bazlı İşyeri Yoğunluğu Oranı	
Toplam Konut Alanı	Mahalle Bazlı Toplam Konut Alanı	
Toplam Harcama	Mahalle Bazlı Toplam Harcama Tutarı	
Ortalama Hane Harcama	Mahalle Bazlı Ortalama Hane Harcama Tutarı	
Aylık Gelir	Mahalle Bazlı Ortalama Aylık Gelir	
İşyeri Sayısı	Mahalle Bazlı İşyeri Sayısı	
Aylık Harcama	Mahalle Bazlı Ortalama Aylık Harcama Tutarı	
Yol Verisi Başarsoft 2019	Yol Orta Segment Noktası	Cadde, Sokak ve Bulvar Çizgi Verisi Segment Keşişim Noktaları

Nüfus: 2019 yılında TÜİK kurumunun yayınladığı mahalle bazlı sözel nüfus verilerinin Başarsoft tarafından mahalle poligon verilerine işlenerek dönüştürülmüş halidir.

POI: Başarsoft tarafından sahadan ve anlaşılabilir kurumlardan toplanan ve point halde tutulan önemli noktalar (Point of Interest-POI) veri kümesidir. Zincir Marketler ve diğer POI lokasyonları da bu veri kümesinden alınmış ve hesaba katılmıştır. Sahadan ve ilgili kurumlardan/firmalardan toplanan 65 farklı kategoride yaklaşık 3,5 milyon adet farklı kategorideki veriyi kapsamaktadır.

POI Kategorisi: POI verilerinin sınıflandırmasının kolaylığı bakımından alışveriş, eğitim, sağlık vb. kategorilerde tutulan POI verilerinin gruplandırılarak kategorize edilmesidir. Çalışmada grid içine düşen farklı kategorideki noktaların merkezi konumunu belirlemek için kullanılması amaçlanmıştır.

Yol Ağı Verisi: Başarsoft firması tarafından tüm Türkiye’de sahadan gezen araçlarla oluşturulan navigasyon tabanlı yol verisi kümesidir. Bu veri ile daha sonraki aşamalarda kapsam (Coverage) hesabı yapılabilmesi için segmentlere ait başlangıç bitiş noktaları üretilmiştir. Veri tüm cadde, sokak ve bulvarları içermektedir.

Ses Anket Verileri: Birçok kategorideki anket çalışma sonuçlarını, mahalle bazlı poligonlarda tutan verilerdir.

Tüm veriler çalışmanın İstanbul ilinde yapılacak olması nedeni ile İstanbul iline indirgenmiştir. Çalışmada grid bazlı analiz yapılacağından veriler CBS ortamında işlenerek 500 m x 500 m'lik gridler haline dönüştürülmüştür. Bu işlem sırasında point veriler konumsal olarak yer aldığı grid içerisine veri olarak yazılmıştır. Ancak poligon tipinde mahalle bazlı olan nüfus ve anket verilerinin kapsamının geniş olması nedeni ile yol orta verilerinin segment başlangıç bitişleri kullanılarak, şehirleşmenin yoğun olduğu gridlerin daha yüksek puan alması için kapsam (Coverage) hesabı ile bu veriler mahallenin içerisinde yer alan yol orta verilerinin tamamının grid içerisinde yer alan yol orta segment başlangıç bitiş nokta adetlerine bölünmüş ve daha optimal şekilde gridlere dağıtılmıştır. Bu işlem tüm mahalle bazlı veriler (nüfus ve anket) için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Mahalle bazlı verilerin gridlerin

içerisine yüzdesel olarak hesaplanması aşağıdaki Formül (1) de anlatılmıştır.

Kapsam Analizi (Coverage):

m: Mahalleye İşlenmiş Yol Segment Verisi

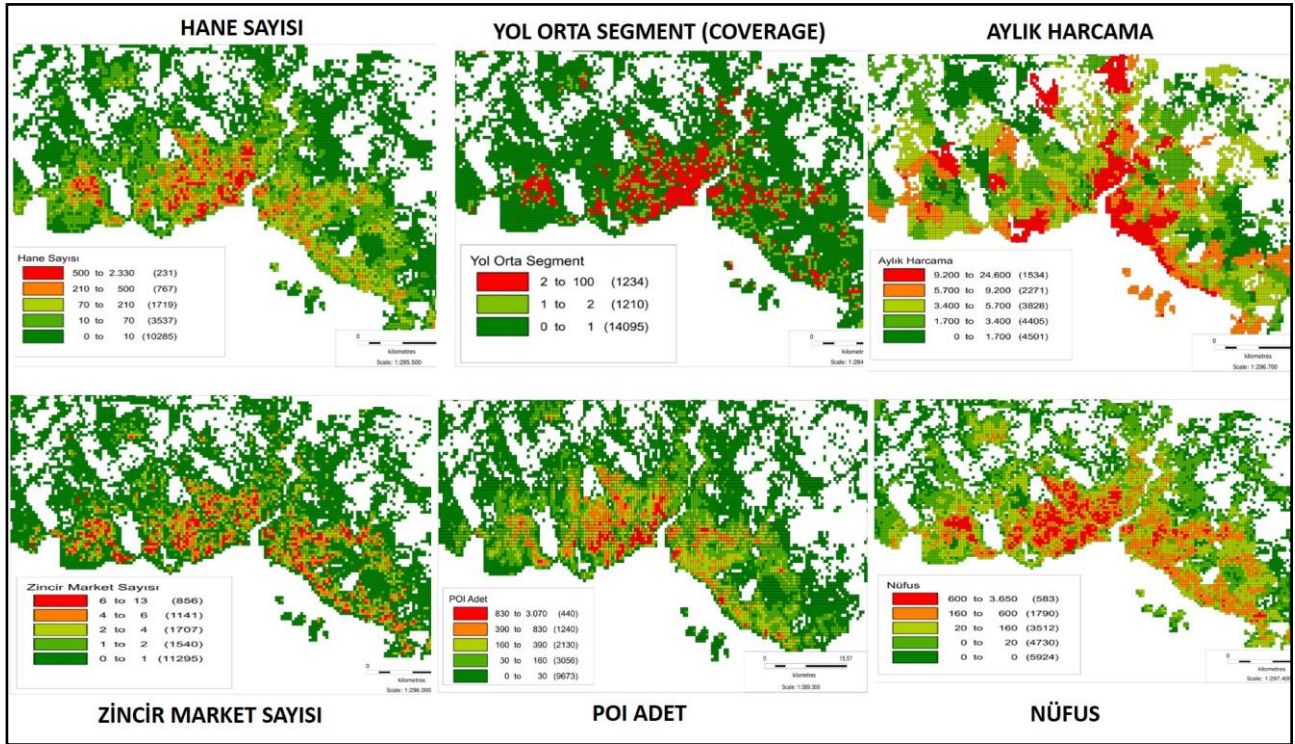
y: Gride İşlenmiş Yol Segment Verisi

p: Mahalle Bazındaki Poligon Veriler (Nüfus Ve Anket Verileri)

g: Gride Çevrilen Poligon Veriler

$$g = \frac{y}{m} * p \quad (11)$$

Sonuç olarak coverage hesabından geçen grid bazlı veriler ile aşağıdaki nüfus, hane sayısı, zincir market sayısı, aylık harcama, yol orta ve POI adeti haritaları üretilmiş ve Şekil 5'de gösterilmiştir.



Şekil 5. Nüfus, Hane Sayısı, Zincir Market, POI Adeti, Yol Orta (Coverage), Aylık Harcama Grid Haritaları

3.3 Web Yazılımı

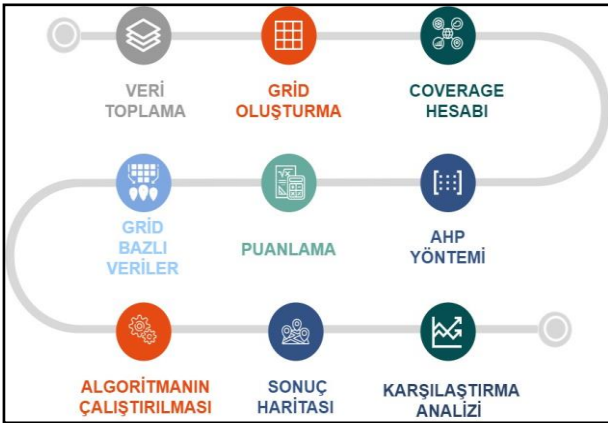
GeoKDS Web Uygulaması, veriler üzerinde coğrafi analizler ve raporlamalar yapabilen CBS tabanlı açık kaynak kod ile geliştirilmiş bir web analiz yazılımıdır. GeoKDS Uygulaması ile Başarsoft adres verisi kütüphanesi sayesinde adres arayabilmekte ve POI sorgulamaları gerçekleştirebilmektedir. AHP yöntemi baz alınarak tasarlanmış uygulama ile kullanıcı kendi özel kriterlerini ekleyebilmekte ve bu

kriterlere ait verileri tayin edebilmektedir. Seçilen kriterlerin ağırlıklandırılması da dinamik olarak kullanıcı tarafından yönetilebilmektedir. Yapılan analiz sonuçları harita üzerinde il, ilçe, mahalle, bölge ya da dinamik değiştirilebilen gridler halinde tematik harita şeklinde görüntülenebilmektedir (Int Kyn. 3). Tüm süreç boyunca işleme dahil edilen veriler, çıkan sonuçlar ve analizler uygulama tarafından raporlanabilmektedir. Yer seçimi ve karar

destek aşamalarında birçok firma tarafından kullanılmakta ve uygulama müşterilerden alınan geri dönüşlere göre her geçen gün daha da geliştirilmektedir. Tüm bunlar düşünüldüğünde ortaya çıkan çalışmanın çoğu ihtiyacı karşılayabiliyor ve edinilmiş tecrübe sayesinde yazılımın geliştirilebilir olması, yazarlarımızın konu ile ilgili geçmiş deneyimlerinde uygulamaya hâkim olması ve seçilen birçok kriterle ait verilerin uygulama içerisinde bulunuyor olması uygulamayı tercih sebebidir.

3.4 Çalışma Adımları

Çalışmadaki sonuçlara ulaşabilmek için uygulanan iş akışı Şekil 6'da gösterilmiştir. İzlenen bu iş akışı sayesinde potansiyeli en yüksek grid puanlaması yapılarak zincir marketler için en optimal yer seçimi haritasını ve bu harita üzerinden mevcut zincir marketlerin yerlerinin ne kadar uygun olduğuna dair karşılaştırma analizi sonuçları üretilmiştir.



Şekil 6. Çalışma Adımları

3.4.1 Veri Toplama

GEOKDS yazılımında bulunan daha önce belirlenmiş olan Başarsoft ve TÜİK verileri üzerinden ilgili verilerin hesaba katılması için seçilmesi işlemidir. Bu aşamada veriler seçilmiş ve verilere ait alt detaylar incelenmiştir.

3.4.2 Grid Oluşturma

GEOKDS yazılımı üzerinde daha önce belirlenen grid boyutu ile dinamik olarak hesaplanan 500 m x 500 m gridler oluşturulmuş ve yer seçim hesabı için seçilmiştir. Çalışmanın bundan sonraki aşamasında gridlere veriler yazdırılacaktır.

3.4.3 Kapsam Analizi (Coverage)

Kapsam hesabının amacı, mahalle bazlı tutulan poligon verilerinin kendinden daha küçük olan 500 m x 500 m gridler haline çevrilebilmesi için, Başarsoft yol orta segment verisinin gridlere ve mahalleye dağılımı yapılarak, mahallede tutulan verinin gride oranı ile grid verisi haline dönüşmesidir. Bu sayede yerleşim alanı olan yerler yol orta segment verisi ile belirlenerek nüfus ve anket verilerinin yeşil alandan çok yerleşim alanları bulunan gridlere yazılması sağlanmıştır. Diğer veriler point olarak tutulduğundan sadece gridler ile eşleştirilmesi sağlanmıştır.

Kullanılacak gridler 500 m x 500 m boyutlarında tüm İstanbul İlini kapsayacak şekilde dışarı aktarılmıştır. Her bir grid içerisinde kaç tane yol segment noktası olduğu hesaplanmıştır. Gridlerle mahalleler eşleştirilerek her bir gride düşen nokta sayısı mahalle bazında bulunmuştur. Bu hesaplamada tüm yol orta segment noktaları alınmamış, yerleşim olmayan yol orta segment noktaları hesaplamaya dahil edilmemiştir. Sadece yerleşim alanlarının hesaplanması amacıyla, yol orta segmentlerinin başlangıç ve bitiş noktalarına point atılarak gridlerle kesştirilmiştir. Her bir grid ile kesişen mahalle sayısı hesaplanarak her mahalleye düşen toplam yol orta segment noktasının sayısı bulunmuştur. Coverage hesabı yapıldıktan sonra her bir veri hesaplanan coverage ile oranlanmıştır.

3.4.4 Grid Bazlı Veriler

Sonuç olarak tüm poligon ve point veriler gridler ile eşleştirilmiş ve GEOKDS yazılımı üzerinde oluşturulmuştur. Bu sayede daha sonraki aşamalarda bu veriler kullanılacaktır.

3.4.5 Puanlama

Her bir veri grubu daha önce literatür taramasında belirlenen kriterler çerçevesinde gruplandırılmıştır. Bu sayede hiyerarşik bir yapı oluşturulmuş ve her grubun kendi arasında karşılaştırma matrisi ile ağırlıklandırma puanları çıkartılmıştır. Her bir grubun altında yer alan alt veriler için de aynı işlem yapılmış, bu sayede tüm kriterlerin ve alt kriterlerin ağırlıkları hesaplanmıştır. Çalışmada sezgisel olarak belirlenecek puanların dar ve orta gelirli müşterilere hitap eden bir market zincirinin yer seçim hedefleri doğrultusunda çıkartılması amaçlanmıştır. Bu amaç

doğrultusunda literatürde en çok bahsi geçen kriterler çıkartılmış ve kriterler ampirik olarak tanımlanan ağırlıklar ile birlikte aşağıdaki çizelgelerde ve Şekil 7 de gösterilmiştir. Çalışma kapsamında sezgisel ve tutarlı olarak verilen değerler ve grupların belirlenmesi için Başarsoft firmasında 7 yıldan fazla süredir çalışan ve sektör tecrübesine sahip 8 uzman tarafından ortak toplantı sonucunda verilmiştir. Uzmanlar yer seçimi ve perakende market sektöründe uzun yıllardır yer seçimi yazılım geliştirme, karar analizi, veri üretimi, anket çalışmaları ve coğrafi pazarlama analizleri konusunda çalışmaktadır. Uzmanlar mühendislik, iktisadi ve idari bilimler, işletme ve haritacılık sektörlerinde faaliyet göstermektedir. Tüm değerler tutarlık açısından kontrol edilmiş ve birbirileri ile uyumlu oranlar haline getirilmiştir. Ayrıca yazılımın kabiliyeti sebebiyle değerler başka uzmanların sezgisel veya bilimsel çalışmaları sonucunda kolayca değiştirilerek yeni sonuçlar üretmeye açıktır.

Tüm kriterler ve alt kriterler için karşılaştırma matrisleri Tutarlılık İndeksi (CI) ve Tutarlılık Oranı (CR) puanları hesaplanarak bu değerlerin %10 altında kalması sağlanmıştır. Buradaki amaç değerlerin tutarsızlığının önüne geçmek ve bir hata var ise matrisi yenilemektir. Sonuç olarak oluşturulan matrisler, ağırlıklandırma puanları ve tutarlılık değerleri aşağıdaki çizelgelerde belirtilmiştir. İkili karşılaştırma matrisi olan Düşük Rekabet ve Ulaşım Kolaylığı alt kriterleri için CI ve CR değerleri hesaplanmamıştır. Çizelge 4'te kriter karşılaştırma matrisi ve tutarlılık oranları gösterilmiştir. Çizelge 5, Çizelge 6, Çizelge 7, Çizelge 8, Çizelge 9 ve Çizelge 10'da ise Ulaşım Kolaylığı, Talep Kapasitesi, Harcama Kapasitesi, Merkezi Konum, Düşük Rekabet ve Diğer Önemli Noktalara Yakınlık kriterlerinin alt kriterlerinde yer alan alt kriterlerin karşılaştırma matrisleri ve tutarlılık oranları gösterilmiştir.

Çizelge 4. Kriter Karşılaştırma Matrisi

*Ulaşım Kolaylığı: UK, Talep Kapasitesi: TK, Harcama Kapasitesi: HK, Merkezi Konum: MK, Düşük Rekabet: DR, Diğer Önemli Noktalara Yakınlık: DNY

Kriterler	UK	TK	HK	MK	DR	DNY	Ağırlık
UK	1	1/9	1/4	1/4	1/9	1/4	2,68%

TK	9	1	3	4	3	5	40,06%
HK	4	1/3	1	1/3	1/4	3	9,79%
MK	4	1/4	3	1	1/4	2	12,63%
DR	9	1/3	4	4	1	5	28,66%
ONY	4	1/5	1/3	1/2	1/5	1	6,18%

CI: 10%

CR: 8%

Çizelge 5. Talep Kapasitesi Alt Kriter Karşılaştırma Matrisi

*Nüfus: N, Hane Sayısı: HS, Konut Sayısı: KS, Konut Yoğunluğu: KY, Hane Büyüklüğü: HB, Toplam Daire Sayısı: TDS, Toplam Konut Alanı: TKA

Talep Kapasitesi	N	HS	KS	KY	HB	TDS	TKA	Ağırlık
N	1	5	6	7	4	5	7	43,21%
HS	1/5	1	3	4	1	5	5	17,66%
KS	1/6	1/3	1	2	1/3	1/3	2	5,43%
KY	1/7	1/4	1/2	1	1/4	1/3	1	3,63%
HB	1/4	1	3	4	1	5	6	18,37%
TDS	1/5	1/5	3	3	1/5	1	4	8,49%
TKA	1/7	1/5	1/2	1	1/6	1/4	1	3,22%

CI: 11%

CR: 9%

Çizelge 6. Merkezi Konum Alt Kriter Karşılaştırma Matrisi

Merkezi Konum	İş Yeri Sayısı	İş Yeri Yoğunluğu	POI Adeti	POI Kategorisi	Ağırlık
İş Yeri Sayısı	1	7	2	1/3	25,34%
İş Yeri Yoğunluğu	1/7	1	1/5	1/8	4,33%
POI Adeti	1/2	5	1	1/4	15,35%
POI Kategorisi	3	8	4	1	54,97%

CI: 4%

CR: 5%

Çizelge 7. Harcama Kapasitesi Alt Kriter Karşılaştırma Matrisi

Harcama Kapasitesi	Aylık Gelir	Aylık Harcama	Ortalama Harcama	Toplam Harcama	Ağırlık
Aylık Gelir	1	1/4	1/3	1/5	6,93%
Aylık Harcama	4	1	4	1/2	32,51%
Ortalama Harcama	3	1/4	1	1/4	12,88%
Toplam Harcama	5	2	4	1	47,68%

CI: 6%

CR: 6%

Çizelge 8. Diğer Önemli Noktalara Yakınlık Alt Kriter Karşılaştırma Matrisi

Diğer Önemli Noktalara Yakınlık	Banka ATM	AVM	Cami	Üniversite	Ağırlık
Banka ATM	1	1/3	5	2	24,67%
AVM Azlığı	3	1	6	4	54,17%
Cami	1/5	1/6	1	1/4	5,68%
Üniversite	1/2	1/4	4	1	15,48%

CI: 5%
CR: 5%

Çizelge 9. Ulaşım Kolaylığı Alt Kriter Karşılaştırma Matrisi

Ulaşım Kolaylığı	Yol Orta Segment	Metro Taksi Otobüs Durakları	Ağırlık
Yol Orta Segment	1	7	88%
Metro Taksi Otobüs Durakları	1/7	1	12%

Çizelge 10. Düşük Rekabet Alt Kriter Karşılaştırma Matrisi

Düşük Rekabet	Zincir Market Sayısı Azlığı	Büfe ve Market	Ağırlık
Zincir Market Sayısı Azlığı	1	8	89%
Büfe ve Market Azlığı	1/8	1	11%

Hesaplanan matrisler sayesinde ortaya çıkan ağırlıklandırma puanları ve genel hiyerarşi Şekil 7’de anlatılmıştır. Buradaki puanlar hiyerarşik yapıda çıkartılan kriter puanları üzerinden alt kriterlerin oranları ile hesaplanarak oluşturulmuş ve her bir kriterin alt kriterler üzerinden etkilenecek oluşturulmuş hiyerarşik yapısı Şekil 7’de gösterilmiştir. Kriterler üzerinden alt kriterlerin son değerlerinin nasıl çıkarıldığı aşağıdaki formülde açıklanmıştır. Kriter puanı, talep kapasitesi, harcama kapasitesi, ulaşım kolaylığı, düşük rekabet, merkezi konum ve diğer önemli noktalara yakınlık değerleri üzerinden Çizelge 4’ten hesaplanmıştır. Alt kriter puanları için, Çizelge 5, Çizelge 6, Çizelge 7, Çizelge 8, Çizelge 9 ve Çizelge 10’daki matrislerden elde edilmiş ağırlık değerleri hesaba katılmıştır. Her bir alt kriter bulunduğu kriter üzerinden hesaba katılmıştır. Matrislerle hesaplanan kriter ağırlık değerleri AHP ve TOPSIS yöntemi üzerinden hesaplamalara dahil edilmiş ve sonuçlar kıyaslanmıştır.

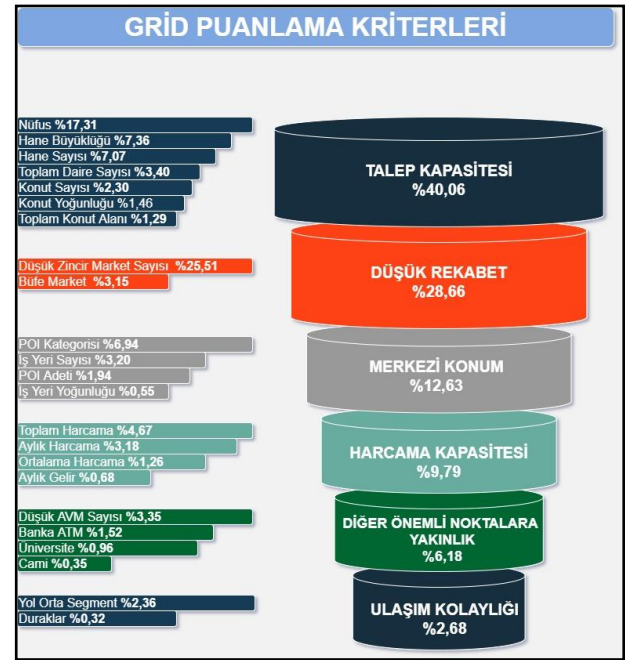
Kriter Puanı: p

Alt Kriter Puanı: a

Değerlendirmeye alınacak Son Alt Kriter Puanı: d

$$d = p * a \quad (12)$$

Yapılan puanlamalar sayesinde en fazla önemli olan kriter Talep Kapasitesi ve Düşük Rekabet olarak belirlenmiştir. Alt kriterler incelendiğinde ise Düşük Zincir Market Sayısı %25,51 ve Nüfus %17,31 ile en önemli alt kriterler olarak gözükmektedir. Daha sonraki aşamada yapılan sonuç puanının en fazla bu kriter ve alt kriterlerden hesaplanacağı öngörülmektedir.



Şekil 7. AHP Yöntemi ile Grid Ağırlıklandırma Kriterleri

3.4.6 AHP Yöntemi

AHP yöntemi kullanılarak kriter ve alt kriterlerin ağırlıklandırma puanları ve daha önceki gride işlenmiş verilerin kullanıla bilinmesi adına verilerin normalizasyon işlemi ile “0 ve 1” arasına alınma işlemi gerçekleştirilmiştir.

Normalizasyon

Normalizasyon işlemi için aşağıdaki formül kullanılmıştır.

v' : Normalize Edilmiş Değer

$$v' = \frac{v - v_{min}}{v_{max} - v_{min}} \quad (13)$$

Oluşan değerlerde düşük rekabeti hesaplayabilmek adına, gridlere yazdırılan verilerden Zincir Market

Sayısı, Büfe ve Market Sayısı ve AVM sayıları için normalize edilen değerler 1'den çıkartılarak olumsuz etkileri ortadan kaldırılmıştır. Bu üç veri için olumsuz etkilerini ortadan kaldıran formül aşağıda yer almaktadır. Bu sayede seçim yapılan grid için fazla sayıda Zincir Market, Büfe ve Market ve AVM bulunması durumunda seçimin ters yönde etkilenmesi amaçlanmıştır. Kısacası fazla rekabet olan yerleri seçmemek için bu yöntem kullanılmıştır. v'' : Olumsuz Etkileri Kaldırılmış Normalize Edilmiş Değer

$$v'' = 1 - \frac{v - v_{min}}{v_{max} - v_{min}} \quad (14)$$

Toplam Grid Puanı (Total Grid Score)

Her bir grid için gridlerdeki normalize edilmiş değerler AHP yöntemi ile hesaplanan kriter ve alt kriter ağırlıklandırma puanları ile çarpılarak sonuç grid puanı hesaplanmıştır. Puanlamalar sezgisel olarak tutarsızlık engellenerek verilmiştir. Ancak GEOKDS yazılımının dinamikliği sayesinde başka veriler, kriterler ve verilen puanlar sayesinde farklı sonuçlar elde edilebilir. Toplam grid puanı hesaplanırken aşağıdaki formül kullanılmıştır.

A : Her Bir Alt Kriter İçin Normalize Edilmiş Değer
 p : HP ile Hesaplanmış Her Bir Alt Kriter için Ağırlıklandırma Puanı
 t : Total Grid Score
 k : Alt Kriter Sayısı

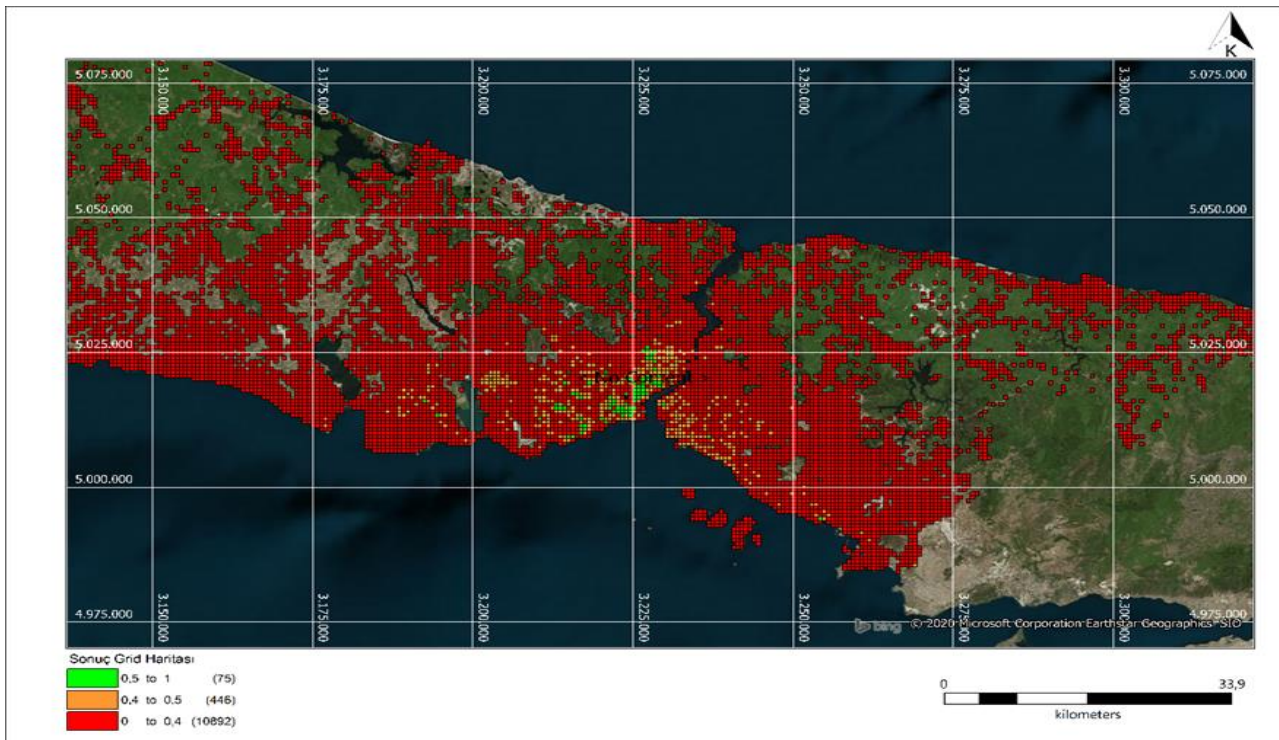
$$t = \sum_{k=0}^n a * p \quad (15)$$

3.4.7 Algoritmanın Çalıştırılması

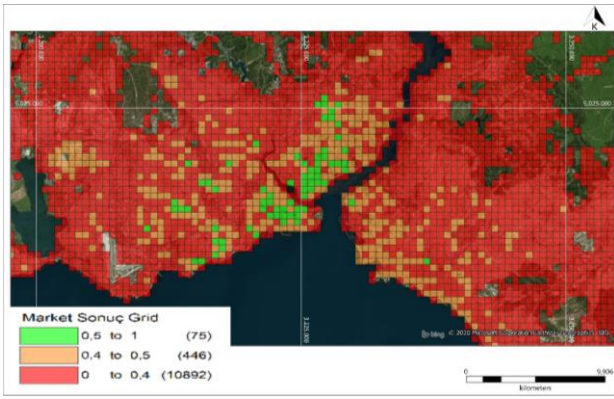
Çalışma tüm normalize edilmiş veriler ve sonuç toplam grid puanı hesaplama formülü üzerinden GEOKDS yazılımı sayesinde hesaplanmıştır. Tüm gridlere ait toplam grid puanı hesaplanmış ve sonraki aşamada haritada görselleştirmek adına GEOKDS yazılımı üzerinden gridlere yazdırılmıştır.

3.4.8 Sonuç Haritası

Çıkan sonuçlar incelendiğinde sonuçları daha anlamlı sınıflandırabilmek adına normalizasyon işlemi ile değerler 0 ile 1 arasına alınmıştır. Yapılan sınıflandırma ile 0 – 0.40 arası düşük potansiyelli, 0.40 – 0.50 arası orta potansiyelli ve 0.50 – 1 arası ise yüksek potansiyelli şekilde sınıflandırılmıştır. İstanbul genelinde 75 adet yüksek potansiyelli, 446 adet orta potansiyelli ve 10,892 adet düşük potansiyelli grid tespit edilmiştir. Sonuç haritaları Şekil 8 ve Şekil 9'da gösterilmiştir. Çıkarılan sonuç incelendiğinde gridlerin Üsküdar, Şişli, Bakırköy, Bayrampaşa, Beşiktaş, Beyoğlu, Esenler, Esenyurt, Fatih, Güngören, Gaziosmanpaşa, Kağıthane, Kadıköy, Zeytinburnu ilçelerinde bulunan 87 adet mahallenin yüksek potansiyelli gridler ile kesişmekte olduğu tespit edilmiştir.



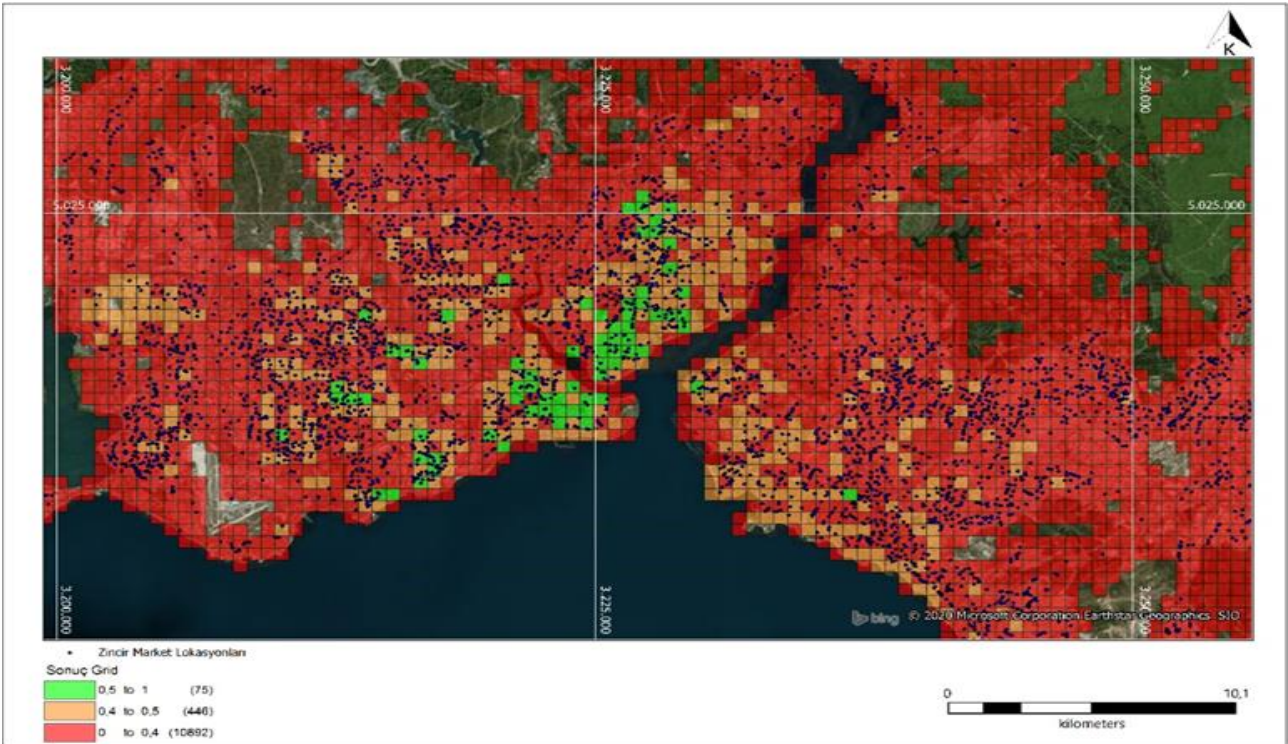
Şekil 8. Sonuç Grid Puanlama Haritası



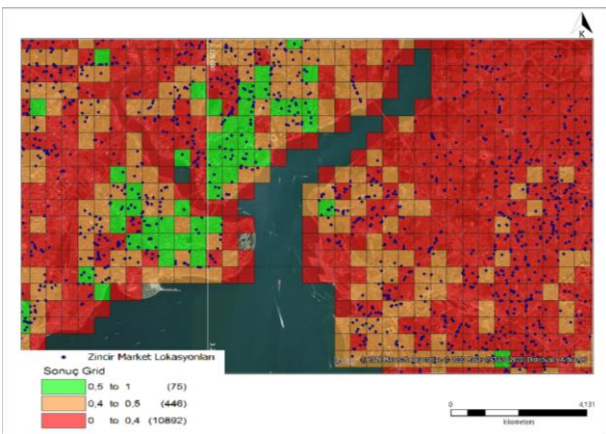
Şekil 9. Yüksek Potansiyelli Gridlere Yakınlaşmış Sonuç Grid Puanlama Haritası

3.4.9 Karşılaştırma Analizi

Gerçek market verileri ile çıkan sonuçların karşılaştırılması sonucunda elde edilen haritalar Şekil 10 ve Şekil 11'de gösterilmiştir. Bu sayede gerçek zincir market lokasyonları ile çıkan sonuçlar karşılaştırılarak gerçek zincir market lokasyonlarının çıkan sonuç üzerinde yüksek, orta ve düşük potansiyelli olarak sınıflandırılması sağlanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda yüksek potansiyelli alanda 218 adet zincir market vardır.



Şekil 10. Sonuç Grid Haritaları ile Mevcut Zincir Market Lokasyonlarının Kesişimi

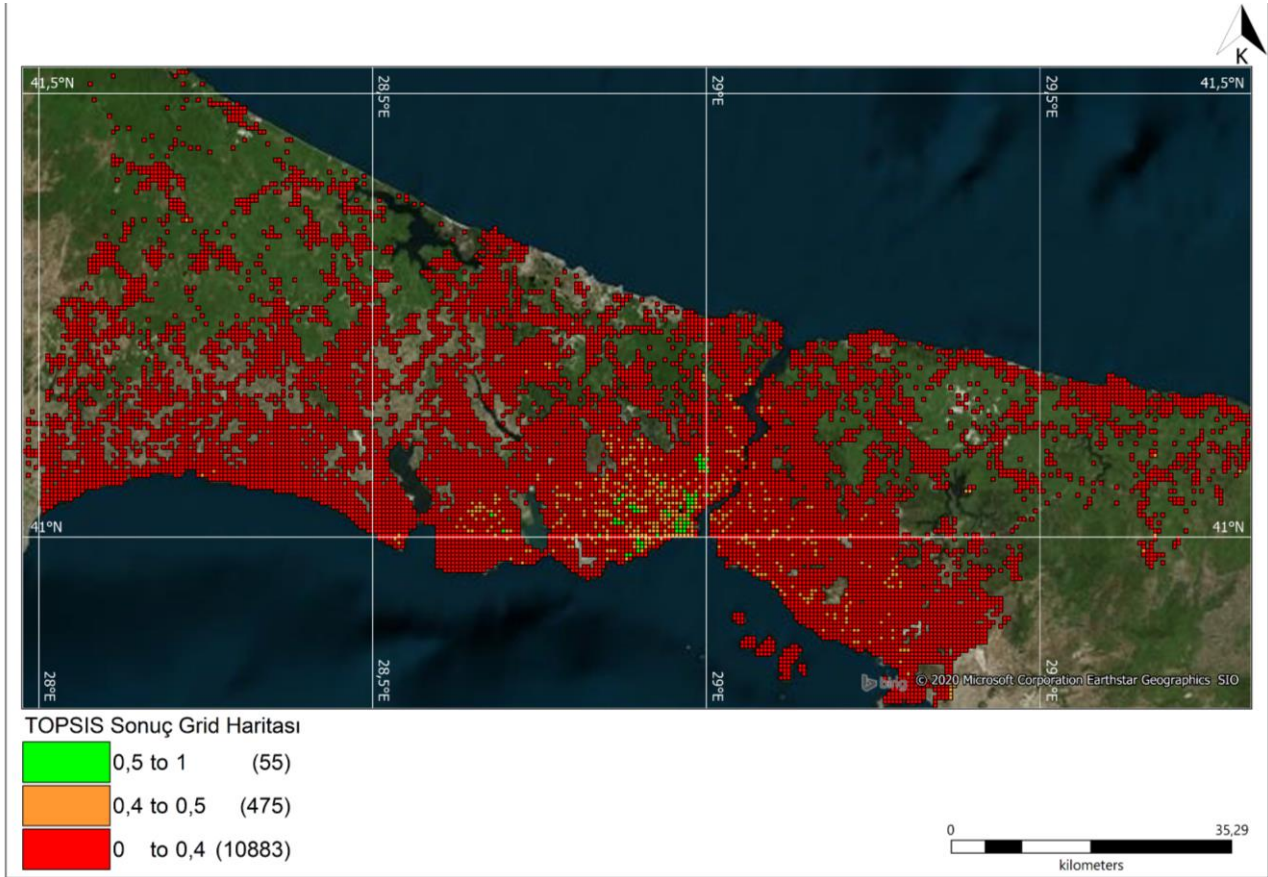


Şekil 11. Yüksek Potansiyelli Gridlerde Yer Alan Mevcut Zincir Market Lokasyon Haric

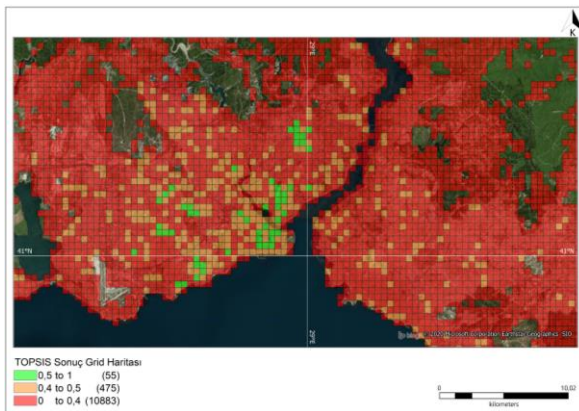
4. TOPSIS Yöntemi

Karşılaştırma matrisleri sonucu hesaplanan kriter ağırlık değerleri TOPSIS metodu üzerinden tekrar analize sokulmuş ve çıkan sonuçlar Şekil 12 ve Şekil 13' de gösterilmiştir. TOPSIS metodu ile hesaplanan sonuçlarda AHP yöntemi ile hesaplanan haritalar ve analiz sonuçlarına benzer sonuçlar ortaya konulmuştur. TOPSIS yöntemi ile çıkan analiz

sonuçlarında 0,5'in üstünde 55 adet grid bulunmuştur. Sonuçların ardından AHP yöntemi ile hesaplanmış haritaların harita gösterimi ve aralıkların uyması adına TOPSIS sonucunda çıkan değerler normalize edilmiştir. Bu sayede tüm sonuç değerler 0 ile 1 aralığına alınmış, AHP sonuçları ile uyumu sağlanmıştır.



Şekil 12. TOPSIS Sonuç Grid Puanlama Haritası



Şekil 13. Yüksek Potansiyelli Gridlere Yakınlaşmış TOPSIS Sonuç Grid Puanlama Haritası

5. Tartışma ve Sonuç

Oldukça önemli olan perakende market yer seçimi için mevcut tüm etkenlerin değerlendirilmesi gerekmektedir. Optimal yer seçimi için CBS yöntemlerinin kullanılması henüz yeterince yaygın olmamakla birlikte, her geçen gün daha fazla kurumsal firma CBS tabanlı karar verme mekanizması oluşturmaktadır. CBS sayesinde, coğrafi ve coğrafi olmayan birçok veri birlikte analiz edilebilmekte ve optimal karar verme süreci oluşturulabilmektedir. Bu çalışmada, çok fazla etken birlikte analiz edilmiş ve ülkemizde bu alanda yapılan en kapsamlı analiz ortaya konulmuştur. Harcama kapasitesi, ulaşım, düşük rekabet, merkezi konum ve diğer önemli noktalara yakınlık kriterleri ve bu kriterlerin alt kriterleri olan Nüfus, POI Adeti,

POI Kategorisi, Banka Şube-ATM, AVM, Cami, Üniversite, Metro, Otobüs ve Taksi Durakları, Büfe ve Market Sayısı, Zincir Market Sayısı, Hane Sayısı, Hane Büyüklüğü, Toplam Daire Sayısı, Konut Sayısı, Konut Yoğunluğu (km² ye düşen), İşyeri Yoğunluğu, Toplam Konut Alanı, Toplam Harcama, Ortalama Hane Harcama, Aylık Gelir, İşyeri Sayısı, Aylık Harcama ve Yol Orta Segmentine uzaklık çalışmada kullanılan veri setleridir. Oluşturulan ağırlık matrisleri özdeğer (eigenvalue) ve özvektörler (eigenvector) analizi ile ayrıştırılmış ve her bir grid için yukarıdaki tüm veriler dikkate alınarak grid puanı AHP ve TOPSIS yöntemleriyle ayrı ayrı hesaplanmıştır. Hesaplama sonucunda grid puanı ile değerler yüksek potansiyelli, orta potansiyelli ve düşük potansiyelli gridler olarak sınıflandırılmıştır. Çıkarılan grid sonuç haritaları ile mevcut zincir market noktalarının karşılaştırılması ile elde edilen haritalar paylaşılmıştır. AHP ve TOPSIS yöntemi ile hesaplanan sonuçlara göre Çizelge 11’de gösterilen yüksek potansiyel, orta potansiyel ve düşük potansiyel olan gridlerin adetleri belirtilmiştir. Çizelge 12’de ise sonuç gridleri ile kesiştirilen mevcut zincir market lokasyon sayıları yer almaktadır.

Çizelge 11. Sonuç Puanı Hesaplanmış Grid Potansiyel Çizelgesi

Grid Açıklama	AHP Yöntemi Adet	TOPSIS Yöntemi Adet	Aralık	Harita Gösterim Rengi
Yüksek Potansiyelli Grid	75	55	0,5 – 1	Yeşil
Orta Potansiyelli Grid	446	475	0,4 – 0,5	Oran
Düşük Potansiyelli Grid	10.892	10.883	0 – 0,4	Kırmızı

Çizelge 12. Sonuç Grid Puanı Üzerinden Mevcut Zincir Market Lokasyonları Karşılaştırma Analizi Sonuç Çizelgesi

Mevcutta Bulunan Zincir Market	AHP Yöntemi Adet	TOPSIS Yöntemi Adet	Harita Gösterim Rengi
Yüksek Potansiyelli Gridle Kesişen Zincir Marketler	218	175	Yeşil

Orta Potansiyelli Gridle Kesişen Zincir Marketler	768	457	Oran
Düşük Potansiyelli Gridle Kesişen Zincir Marketler	6213	6567	Kırmızı

Çalışma sonucunda AHP yöntemi ile hesaplanan sonuç grid puanlama verisinde örnek olarak Çizelge 13’deki 10 adet en yüksek potansiyelli grid için grid puanı, nüfus ve rekabet halinde olduğu zincir market sayısı paylaşılmıştır.

Çizelge 13. AHP Yöntemi ile Çıkarılan İlk 10 Verinin Nüfus ve Zincir Market Sayıları

Grid No	Yaklaşık Nüfus Adeti	Grid İçerisinde Yer Alan Zincir Market Sayısı	Toplam Sonuç Grid Puanı
Grid 1	5367,98	2	1
Grid 2	1209,19	0	0,84
Grid 3	3529,24	3	0,80
Grid 4	3051,69	1	0,79
Grid 5	1370,32	1	0,71
Grid 6	4190,1	4	0,71
Grid 7	3586,02	7	0,68
Grid 8	2954	3	0,66
Grid 9	1769,29	1	0,66
Grid 10	4199,7	3	0,66

Elde edilen sonuçlar, karar vericilere analizin dinamik yapısı sayesinde yeni zincir market açmada, rakiplere göre mağaza konumlandırma ve mevcut şubelerin pazar yamyamlığı (cannibalism) açısından arındırılması konularında yapılacak müteakip analizler için de altlık teşkil etmektedir. Yapılacak olan farklı puanlamalar ve kriterler ile firmaların stratejileri göz önünde bulundurularak daha doğru pazar analizi yapılmasının önemi ortaya konmuştur. Hızlı karar vermek isteyen firmalar tüm verileri toplamak için fazla zamanı yoksa, daha az önemli faktörleri göz ardı ederek çalışmalarını tamamlayabilirler. Ayrıntılı veri toplama ve kriterlerin farklılaştırılmasıyla daha doğru sonuçlar elde edilebilecektir.

Geliştirilen yöntemde, firmaların çeşitli şekillerde uymakla yükümlü olduğu kanunlar ve kurallar çerçevesinde (marketlerin içki satması camilerin etrafında yasak olması vb.) tekrar yeni kurallar eklenebilmekte ve sonuçlar optimize

edilebilmektedir. Elde edilen diğer bir sonuç ise, İstanbul'daki mevcut zincir market dağılımının halihazırda yüksek potansiyel grid alan içinde yer almış olduğudur. Genel olarak sonuçlar mevcut İstanbul'da bulunan zincir market potansiyelini ortaya koymaktadır.

Yeni şube açımında kullanılacak grid bazlı tematik haritaların oluşturulması sayesinde farklı bir bakış açısı ile karar vericilere Coğrafi Bilgi Teknolojilerinin önemi gösterilmektedir. Çalışma geleneksel yöntemlerle ortaya çıkan yanlış market yer seçimi sonucundaki oluşan maliyet kayıpları, müşteri potansiyeli, firma imajı ve rekabet edebilme gücü konularında firmaların avantaj sağlamasına katkıda bulunmaktadır. Çalışmamızda ortaya çıkan yüksek potansiyelli gridler ile kesişen ilçe ve mahallelerde zincir market firmalarının yatırım yapması, yeni şube açması ve mevcut şubelerin kapasitesinin artırılması konularında tavsiyeler sunulmuştur.

Geleneksel araştırmalarda ana konu yer seçimi problemlerindeki mesafeye odaklanılırken, bu çalışmada Nüfus, POI, Anket ve Yol Ağı verileri gibi çeşitli faktörler göz önünde bulundurulmuştur. Kullanılan verilerin çeşitliliği ve yoğunluğu dikkate alındığında, literatürde karşılaşılan çalışmalar içerisinde bu kadar çok kriterli ve kapsamlı veriye yapılan ender çalışmalardan biri olma özelliğine sahiptir. Büyük veri ölçeğinde karar verme mekanizmaları literatürde az sayıda karşılaşılmıştır, kullandığımız veriler ile büyük veri ölçeğinde neler yapabileceğinin gösterilmesi açısından da ayrıca önemlidir.

Verilerin ölçeği büyüdükçe, girdi verilerin tutarlılığı önem kazanmaktadır. Bu çalışmada, verilerin kapsamlı olması yanında tutarlılık testleriyle beraber güvenilirliği de ortaya konulmuştur. Ayrıca AHP yöntemi ile hesaplanan sonuçlar ve haritalar TOPSIS yöntemi ile de hesaplanarak test edilip doğrulanmıştır. Normal koşullarda hesaplamanın ardından AHP yöntemine yeni kriterler eklemek ve puanları değiştirmenin zor olduğu koşulu bilgi teknolojilerinin kullanılması ile azaltılmış, yazılım altyapımızın dinamikliği nedeni ile bu kısım sorun olmaktan çıkmıştır.

Covid-19 süreci ile birlikte ortaya çıkan online satışların mevcut zincir marketler ve depolar üzerinden yönetildiği varsayıldığında, iyileştirmeleri

yapmanın önemi bir kez daha ortaya çıkmaktadır. Yapılan çalışma sonuçları irdelendiğinde yer seçiminin artık perakende zincir marketler ve benzer diğer sektörler için ikna edici ve gerçeğe yakın olduğu görülmektedir. Çalışma ana odak olarak CBS'yi ortaya koymuş ve coğrafi analizlerin mikro ve makro ölçekteki işletmelerin karar verme süreçlerinde etkili olabildiği ve verimliliğini artırdığını göstermiştir. Türkiye'deki kentleşme ve nüfusun artması ile yerli ve yabancı kaynaklı yatırımların bilgi teknolojileri ve verilerin analizlerde kullanılması ile artacağı değerlendirilmektedir. Analitik Hiyerarşi yöntemi yeni bir yöntem olmamakla birlikte, bu ölçekteki çalışmalar oldukça sınırlıdır. Çalışmanın, CBS kullanarak AHP yöntemi ile yer seçimi problemlerine kaynak olması ve ışık tutması beklenmektedir.

Teşekkür

Çalışmamızda anket verilerinin kullanımı konusunda yardımlarını esirgemeyen veri sağlayıcılarına teşekkür ederiz.

6. Kaynaklar

- Alarcon,S.,2011. The Trade Credit in the Spanish Agro-Food Industry. *New Medit*, **10(2)**, 51-57.
- Arquero, A., Álvarez, M. and Martinez, E., 2009. Decision Management Making by AHP (Analytical Hierarchy Process) Trought GIS Data. *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Latin America Transactions*, **7**, 101–106.
- Atici, K. B., Şimşek A. B., Ulucan A. and Tosun M. U., 2015. A GIS-Based Multiple Criteria Decision Analysis Approach for Wind Power Plant Site Selection. *Utilities Policy*, **37**, 86–96.
- Bayar, R., 2005. CBS Yardımıyla Modern Alışveriş Merkezleri İçin Uygun Yer Seçimi : Ankara Örneği (Location Choice for Shopping Mall Centers Using GIS: Case Study of Ankara). *Coğrafi Bilimler Dergisi/Turkish Journal Geographical Sciences*, **3(2)**, 19-38.
- Bhushan, N., Rai, K., 2004. Strategic Decision Making: Applying the Analytic Hierarchy Process. *Springer-Verlag*, 172.

- Dožić, S., and Kalić M., 2014. An AHP Approach to Aircraft Selection Process. *Transportation Research Procedia*, **3**, 165-74.
- Gbanie, S. P., Tengbe P. B., Momoh J.S., Medo J., and Kabba V.T.S., 2013. Modelling Landfill Location Using Geographic Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA): Case Study Bo, Southern Sierra Leone. *Applied Geography*, **36**, 3-12.
- Hernández T. and Bennison D., 2000. The Art and Science of Retail Location Decisions. *International Journal of Retail & Distribution Management*, **28 (8)**, 357-67.
- Karadeniz M., 2009. The Importance Of Retail Site Selection In Marketing Management And Hypothetical Approaches Used In Site Selection. *The Importance of Retail Site Selection In Marketing Management And Hypothetical Approaches Used In Site Selection*, **5(3)**, 79-90
- Kayacan T. and Yirmibeşoğlu F., 2017. Site Selection Criteria for Sports Retail Sector: Istanbul Case. *Current Urban Studies*, **5(3)**, 290-304
- Kuo, R. J., Chi, S. C. and Kao, S. S., 2002. A Decision Support System for Selecting Convenience Store Location through Integration of Fuzzy AHP and Artificial Neural Network. *Computers in Industry*, **47(2)**, 199-214.
- Kuruüzüm, A., and Atsan N., 2001. Analitik Hiyerarşi Yöntemi ve İşletmecilik Alanındaki Uygulamaları (The Analytic Hierarchy Process Approach And It's Applications in Business). *Akdeniz İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi (İ.İ.B.F.) Dergisi*, **1**, 83-105.
- Ladle, J. K., Stiller D. and Stiller D., 2009. Retail Site Selection: A New, Innovative Model for Retail Retail Site Selection: A New, Innovative Model for Retail Development Development. *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Latin America Transactions*, **7**, 101-106.
- Mendes, A. B. and Themido, I. H., 2004. Multi-Outlet Retail Site Location Assessment. *International Transactions in Operational Research*, **11(1)**, 1-18.
- Merunka, R. D., 2010. Sales Cannibalism. *Wiley International Encyclopedia of Marketing*.
- Millet, I. and Wedley, W.C., 2002. Modelling Risk and Uncertainty with the Analytic Hierarchy Process. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, **11(2)**, 97-107.
- Monjezi, M., Dehghani, H., Singh, T. N., Sayadi, A.R. and Gholinejad, A., 2010. Application of TOPSIS Method for Selecting the Most Appropriate Blast Design. *Arabian Journal of Geosciences*, **5(1)**, 95-101.
- Musyoka, S. M., Mutyaavyu, S. M., Kiema, J. B.K., Karanja, F. N., and Siriba, D. N., 2007. Market Segmentation Using Geographic Information Systems (GIS): A Case Study of the Soft Drink Industry in Kenya. *Marketing Intelligence and Planning*, **25 (6)**, 632-42.
- Ozimec, A., Natter M. and Reutterer T., 2010. Geographical Information Systems-Based Marketing Decisions: Effects of Alternative Visualizations on Decision Quality. *Journal of Marketing*, **74 (6)**, 94-110.
- Rezaei-Moghaddam, K. and Karami E., 2008. A Multiple Criteria Evaluation of Sustainable Agricultural Development Models Using AHP. *Environment, Development and Sustainability*, **10 (4)**, 407-26.
- Roig-Tierno, N., Baviera-Puig, A., Buitrago-Vera J. and Mas-Verdu, F., 2013. The Retail Site Location Decision Process Using GIS and the Analytical Hierarchy Process. *Applied Geography*, **40**, 191-98.
- Rybarczyk, G., and Wu C., 2010. Bicycle Facility Planning Using GIS and Multi-Criteria Decision Analysis. *Applied Geography*, **30 (2)**, 282-93.
- Saaty, T. L., 1994. How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process. *Interfaces*, **24 (6)**, 19-43.
- Saaty, T. L., 2008. Decision Making with the Analytic Hierarchy Process - International Journal of Services Sciences - Volume 1, Number 1/2008 - Inderscience Publishers. *International Journal of Services Sciences*, **1 (1)**, 83-98.
- Saaty, T. L. and Vargas, L. G., 2001. How to Make A Decision. 34, *University of Pittsburgh*, Springer Science+Business Media New York, 1-25.
- Suárez-Vega, R., Santos-Peñate, D. R. and Dorta-González, P., 2012. Location Models and GIS Tools for Retail Site Location. *Applied Geography*, **35 (1-2)**, 12-22.

- Supçiller, A. A. and Çapraz, O.,2011. AHP-TOPSIS Yöntemine Dayalı Tedarikçi Seçimi Uygulaması. *İstanbul Üniversitesi İktisat Fakültesi Ekonometri ve İstatistik Dergisi*, **13**, 1-22.
- Şahin, E. K., 2010. Perakende Marketlerin Yer Seçimine Yönelik CBS Uygulaması. *III. Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Sempozyumu*.
- Şener, Ş., Şener, E., Nas, B. and Karagüzel, R. 2010. Combining AHP with GIS for Landfill Site Selection: A Case Study in the Lake Beyşehir Catchment Area (Konya, Turkey). *Waste Management*, **30 (11)**, 2037–46.
- Şentürk, E., Livaoğlu, H., and Yavuz, E., 2017. Çok Kriterli Karar Analizi ile CBS Ortamında En Uygun Spor Bayi Yer Seçimi İzmit Merkez Örneği. *Uygulamalı Yerbilimleri Dergisi*, **16 (1)**, 17–26.
- Türkiye Alışveriş Merkezleri ve Perakendeciler Federasyonu (TAMPF), 2016. Dönüşürken Büyüyen Türkiye Perakende Sektörü Raporu. PricewaterhouseCoopers (PWC), 48-64.
- Timor, M., 2011. Analitik Hiyerarşi Prosesi. *Türkmen Kitabevi*, İstanbul, 1, 1-304.
- Uyan, M., 2013. GIS-Based Solar Farms Site Selection Using Analytic Hierarchy Process (AHP) in Karapınar Region Konya/Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **28**, 11–17.
- Uygurtürk, H., 2012. Finansal Performansın TOPSIS Çok Kriterli Karar Verme Yöntemi ile Belirlenmesi: Ana Metal Sanayi İşletmeleri Üzerine Bir Uygulama. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi (İİBF) Dergisi*, **7(2)**, 95-115.
- Wang, L., Fan, H., and Wang, Y., 2018. Site Selection of Retail Shops Based on Spatial Accessibility and Hybrid BP Neural Network. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, **7(6)**, 202.
- Wei, J. (2010), TOPSIS Method for Multiple Attribute Decision Making with Incomplete Weight Information in Linguistic Setting. *Journal of Convergence Information Technology*, **5(10)**, 181-187.
- Wind, Y. and Saaty, T. L., 1980. Marketing Applications Of The Analytic Hierarchy Process. *Management Science*, **26(7)**, 641–58.
- Wood, S. and Reynolds, J., 2012. Leveraging Locational Insights within Retail Store Development? Assessing the Use of Location Planners' Knowledge in Retail Marketing. *Geoforum*, **43(6)**, 1076–87.
- Yang, J. and Lee, H., 2012. Leveraging Locational Insights within Retail Store Development? Assessing the Use of Location Planners' Knowledge in Retail Marketing. *Geoforum*, **43(6)**, 1076–87.
- Yang, J. and Lee, H., 1997. An AHP Decision Model for Facility Location Selection. *Facilities*, **15(9-10)**, 241–54.
- Zeydan, M. and Kayserili, S., 2019. A Rule-Based Decision Support Approach for Site Selection of Automated Teller Machines (ATMs). *Intelligent Decision Technologies*, **13(2)**, 161–75.

İnternet kaynakları

1-<http://www.ortakalan.org/gonderi/29378>, (02.07.2020)

2-<https://tr.euronews.com/2019/01/17/2019-kuresel-yasam-kalitesi-endeksi-istanbul-trafikte-en-fazla-zaman-kaybedilen-13-sehir>, (21.08.2020)

3-<https://www.basarssoft.com.tr/>, (21.08.2020)

AKÜ FEMÜBİD 20 (2020) 065601 (1051-1067)

AKU J. Sci. Eng. 20 (2020) 065601 (1051-1067)

DOI: 10.35414/akufemubid.825862

Araştırma Makalesi / Research Article

Combined Effects of Nano-Sized Calcite and Fly Ash on Hydration and Microstructural Properties of Mortars

Serhat DEMİRHAN^{1*}¹ Batman Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Batman.* Sorumlu yazar; e-posta: drserhatdemirhan@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5448-9495>

Geliş Tarihi: 14.11.2020

Kabul Tarihi: 23.12.2020

Abstract

Even though a reduction in pollution and CO₂ emission can be achieved by the utilization of fly ash in cement-based materials, using a high volume of fly ash results in a reduction at the early age strength development and also setting time delays. In order to assess hydration mechanism and microstructural characteristics of high-volume fly ash blended cement mortars, nano-sized calcite was introduced into the mortars to evaluate the combined effect of fly ash (FA) and nano-sized calcite (NC). For this purpose, twelve mixtures in which fly ash to Portland cement ratios and NC (used as minor addition up to 5%) percentages were varied as 0.0, 0.25, 0.54, 1.0 and 0.0%, 2.5%, 5%, respectively, were designed. Consistency, setting times, compressive strength, ultrasonic pulsive velocity and SEM analysis were conducted at varied curing ages (which depends on the testing method) in terms of fresh and hardened properties and micro-structural characteristics. Experimental test results confirmed that fresh and hardened properties of standard mortars were significantly improved with the combination of both FA and NC especially at early ages. Even though decrease in early age compressive strength values was obtained as FA amount was increased, (comparing to control mixture which was 43.2 MPa at 90 days) higher compressive strength result (45.9 MPa) was obtained at 90-day curing age of mixture including 50% of FA content being utilized by NC of 2.5%.

Keywords

Fresh and Hardened Properties; Nano-Sized Calcite; Fly Ash; SEM

Nano Boyutlu Kalsit ve Uçucu Külün, Harçların Hidratasyonu ve Mikroyapısal Özellikleri Üzerindeki Kombine Etkileri

Öz

Çimento esaslı malzemelerde uçucu külün kullanılmasıyla kirlilik ve CO₂ emisyonunda bir azalma sağlansa da, yüksek hacimde uçucu kül kullanılması, erken yaş mukavemet gelişiminde bir azalma ile neticelenmekte ve ayrıca priz alma süresinde gecikmelere neden olur. Yüksek hacimli uçucu kül katkılı çimento harçlarının hidratasyon mekanizması ve mikroyapısal özelliklerini değerlendirmek amacıyla, uçucu kül (UK) ve nano kalsitin (NK) birleşik etkisini incelemek için harçlara nano boyutlu kalsit eklenmiştir. Bu amaçla, uçucu kül/Portland çimentosu oranı ve NK ikame oranı (% 5'e kadar minör ilave bileşen olarak kullanıldı) sırasıyla 0.0, 0.25, 0.54, 1.0 ve %0, %2.5, %5 olarak yer değiştirilmiş on iki karışım tasarlanmıştır. Kıvam, priz süreleri, basınç dayanımı, ultrasonik ses hızı (UPV) ve SEM analizi test yöntemine bağlı olarak farklı kür yaşlarında gerçekleştirilmiştir. Deneysel test sonuçları, standart harçların taze ve sertleşmiş özelliklerinin hem UK hem de NK kombinasyonu ile özellikle erken yaşlarda önemli ölçüde iyileştiğini göstermiştir. UK kullanım oranı artışıyla birlikte erken yaş basınç dayanımında azalma gözlemlenmiş olmasına rağmen, kontrol karışımına kıyasen (ki 90 günlük basınç dayanımı 43.2 MPa olarak elde edildi), %50 UK ve %2.5 NK ikame oranlı karışımın 90 günlük basınç dayanımı daha yüksek (45.9 MPa olarak) elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler

Taze ve Sertleşmiş Özellikler; Nano Kalsit; Uçucu Kül; SEM

1. Introduction

Ordinary Portland Cement is one of the most consumed construction materials whose production results in high CO₂ emission, therefore, it is a CO₂ intensive process (He et al. 2019). These are major disadvantages associated with cement production, such as greenhouse gas emissions and high energy consumption. Fly ash being widely employed as a partial-substitute of cement has a positive effect on the environment which will result in maintaining landfill area, preserving natural resources, decreasing CO₂ emission and energy saving. Therefore, Fly ash as a by-product could be further converted to a value-added construction material by enhancing high volume fly ash-based greener types of cement (Shwekat and Wu 2018; Sandanayake et al. 2018; Jamora et al. 2020). Unfortunately, due to its poor pozzolanic reaction, delayed hydration process and low early age strength development are some of the most important drawbacks of fly ash in the case of higher volume usages (Zou et al. 2020; Xiao et al. 2017). Therefore, in order to overcome reduced early age strength development and delay setting time in the case of higher replacement amount of cement with fly ash, nano materials are introduced in high volume fly ash blended cement systems to induce early age strength and hydration properties (Liu et al. 2019; Tosti et al. 2020).

Top-down and bottom-up synthesis approaches are two methods being followed in the production of nanomaterials. The choice of “top-down” and “bottom-up” production approaches depends on the suitability and cost of nano material (Sanchez and Sobolev 2010). In general, particle size of nano materials in top-down approach are not uniform and they are cheaper comparing to bottom-up approach (Sobolev and Gutiérrez 2015). C-S-H formation is promoted in the presence of Nano CaCO₃ (NCC) particles which accelerate hydration mechanism due to nucleation/seeding effect (Wang et al. 2018; Wu et al. 2018; Zaitri et al. 2014; Supit and Shaikh 2014; Sato and Beaudoin 2011). In addition, NCC reacts with C₃S and produces CSH gels, CH, and calcium carbosilicate hydrates (Pera

et al. 1999; Kakali et al. 2000). NCC also reacts with aluminate phase which is known as chemical effect and hemi carboaluminates and monocarboaluminates are produced where CH is depleted by hemicarboaluminates (Bonavetti et al. 2001; Voglis et al. 2005). Since aluminate phase in the normal Portland cement is limited meaning that relatively lower, contribution of NCC (in terms of additional hydration products formed as a result of this chemical effect) is also limited (Thongsanitgarn et al. 2014; Yeşilmen et al. 2015). With the additional higher source of aluminate phase, namely any supplementary cementitious material as fly ash, additional hydration products are formed and more contribution has been obtained in the presence of combined conditions (ordinary portland cement+nano CaCO₃+aluminate phase) (De Weerd et al. 2011; Cao et al. 2019; Damidot et al. 2011; Arora et al. 2016; Ipavec et al. 2011; Vance et al. 2013). The significant contribution of NCC in the presence of high-volume fly ash cement-based material is known as higher and remarkable early-age performance properties (Sato and Beaudoin 2011; De Weerd et al. 2011). Chemical effect of NCC on the hydration mechanism depends on both particle size and synergic influence with supplementary cementitious material, namely alumina content. Surface energy and physical property (morphology) are significantly altered as particle size decreases and thus resulted in an enhanced chemical reactivity of NCC (Thongsanitgarn et al. 2014; Vance et al. 2013; Shaikh and Supit 2014; Uysal 2012; Kenai et al. 2004; Bosiljkov 2003; Lertwattanaruk et al. 2018; Sumanta et al. 2014).

As previously mentioned, the effect of NCC with and without high volume fly ash content on blended cement have been investigated however these experimental studies are still limited and NCC produced in the bottom up approach is mainly used in most of them. NCC or nano calcite produced in top down approach is still limited. Also, previously mentioned studies have mainly focused on compressive strength of the cement-based materials with or without high volume fly as content. This experimental study focused on

hydration properties, compressive strength, ultrasonic pulvise velocity and microstructural characteristics by SEM. In addition to this, all mixture proportions are chosen in the limit of EN 197-1 and therefore results in this research is more affirmative to applications.

This experimental research preliminarily aims to evaluate efficacy and effectiveness of comparably cheaper (comparing to nano CaCO_3 produced by bottom up approach) nano-sized calcite (in the range of minor addition replacement level up to 5%) and high-volume fly ash (up to 50%) on the improvement and enhancement of fresh and hardened properties of standardly produced cement mortars. Both NC and FA were employed as a substitution of cement. Consistency, setting times, compressive strength, ultrasonic pulvise velocity and scanning electron microscopy (SEM) characteristics of standard mortars were measured and analysed.

2. Materials and Method

2.1 Materials

All standard mortars were produced with Normal Portland Cement (PC) CEM I 42.5 (which was produced at the laboratory by grinding the clinker and 5% gypsum up to enough fineness) satisfying minimum requirements of EN 197-1, Class-F Fly Ash (FA), CEN Reference Sand with a maximum grain size of 2 mm satisfying requirements of EN 196-1 and drinkable water. Nano-sized calcite (NC) obtained from Nigtaş Mikronize in Turkey was also used. Particle size distributions of cementitious materials and NC are illustrated in Figure 2.1. Both chemical compositions and physical properties of PC, FA and NC are presented in Table 2.1. SEM images (of PC, FA and NC) and TGA/DTA&XRD results of NC are given in Figure 2.2 and Figure 2.3, respectively. In TGA/DTA analysis, the typical expected major peak of CaCO_3 was observed at about 800 °C [37,38]. Also, in XRD diagram, the calcite peaks obtained in the XRD diagram has been observed at smaller peaks and therefore this result in the diagram supports the literature that the

material is a pure calcite (Yeşilmen et al. 2015; Bentz et al. 2015).

2.2 Mixture Proportions, Method and Specimen Preparation

As a result of high inter-particle attraction of nano-sized materials (i.e. Van Der Waals forces), they tend to show a behaviour of agglomeration. For this reason, uniform distribution of mineral additions (nano-calcite) in the matrix was of primary importance. In order to reduce this problem and provide an efficient dispersion in the matrix, (i) ultrasonication that creates a vibration effect, (ii) the use of surfactant that provides chemical repulsion between the particles and also (iii) mechanical grinding method are the most effective and widely used methods. Since mechanical grinding is more suitable for application, this method was preferred in the current experimental study. Therefore, before casting mortars, preparation of cementing materials was separated into two steps. In the former step, clinker was intergrounded with gypsum (5% of clinker, by weight) up to 25 minutes. In the latter one, depending on the mixture, CEM I (previously produced in the former step), Fly Ash and Nano-calcite were grinded together up to an additional 10 min. In order to elucidate the combined effects of FA and NC twelve different mixtures were tailored in accordance with EN 197-1 and then all of the mixtures were cast and tested/analysed with a method meeting requirement of EN 196-1 (for the compressive strength), EN 196-3 (for consistency, initial and final setting) and ASTM C597 (for Ultrasonic pulvise velocity) standards. In the tailored twelve mixtures FA/PC ratio and NC replacement levels were chosen as 0.0, 0.25, 0.54, 1.0 and 0.0%, 2.5% and 5.0%, respectively. Proportions of all mixtures are given in Table 2.2. Each mixture has been abbreviated and is shown by a combination of letters and numbers. An example of abbreviated label of mixtures is illustrated in Figure 2.4.

Standard mortars incorporating different amount of cementitious materials and nano-sized particles were investigated in terms of consistency, initial

and final setting times, compressive strength, SEM analysis and ultrasonic pulvise velocity (UPV) analysis. Standard consistency and setting times were determined by Vicat test and performed according to EN 196-3. Compressive strength test was conducted in accordance with EN 196-1 by using a compression machine of 2000 kN capacity. Standard prisms of 4 cm × 4 cm × 16 cm in dimension were produced from the standard cement mortars. The water-cement ratio was kept constant as 0.50. The specimens were cured at standard curing conditions until the testing ages of 1, 3, 7, 28 and 90 days. Five selected mixtures

whose test results were better in term of compressive strength were evaluated by using a scanning electron microscopy (SEM). No additional samples were prepared for UPV test. UPV test was applied to prisms produced for compressive strength just before they were tested under compressive strength for curing ages of 1, 3, 7, 28 and 90 days.

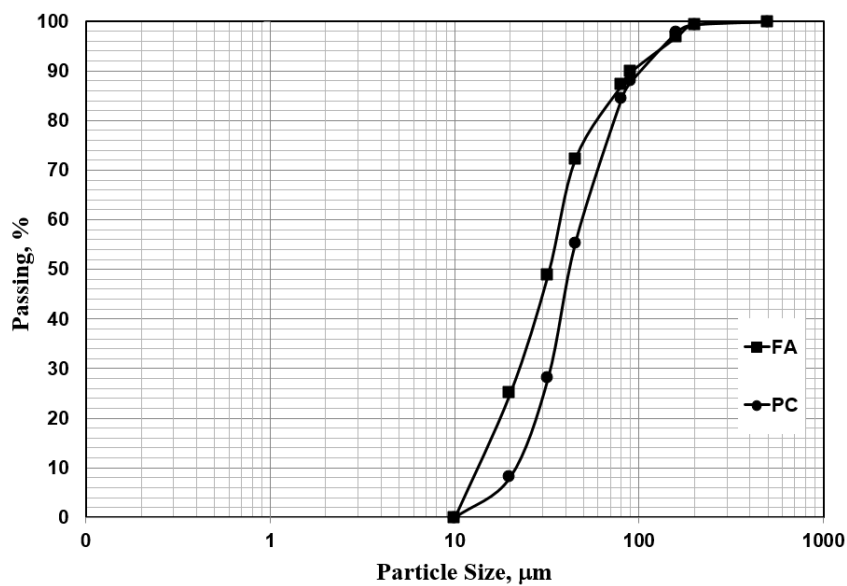


Figure 2.1. Particle size distributions of binders

Table 2.1. Chemical composition and physical properties of mortar ingredients

Chemical Composition, %	PC	FA	NC
SiO ₂	20.41	61.07	0.24
Al ₂ O ₃	5.34	19.99	0.21
Fe ₂ O ₃	3.10	8.94	0.04
MgO	3.48	1.48	0.55
CaO	61.36	1.95	56.14
SO ₃	2.57	0.43	0.06
Na ₂ O	0.37	0.91	-
K ₂ O	0.94	2.15	-
Loss on ignition	2.15	2.08	42.76
Physical Properties			
Specific gravity, gr/cm ³	3.24	2.38	2.69
Blaine, cm ² /gr	3092	3560	-
BET surface area, m ² /kg	-	-	7.4

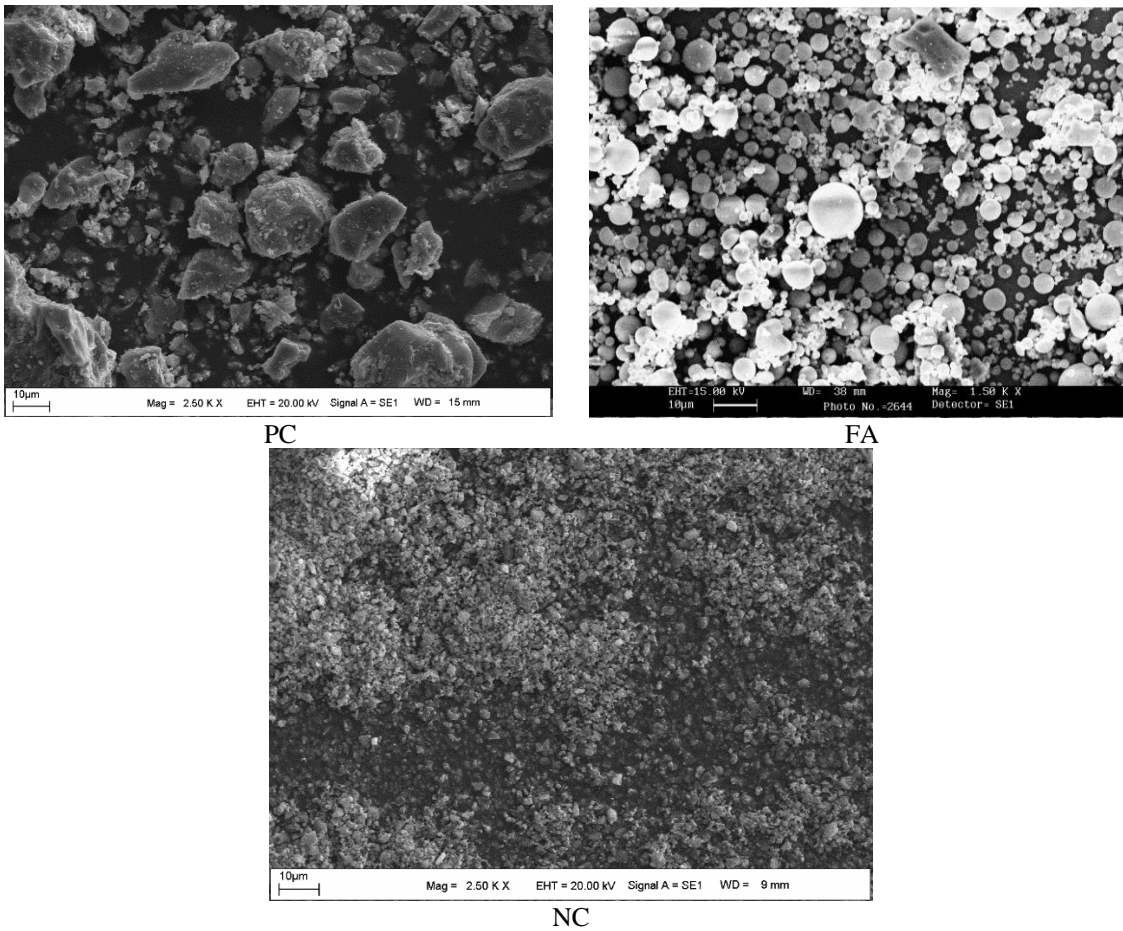


Figure 2.2. SEM images of PC, FA and NC

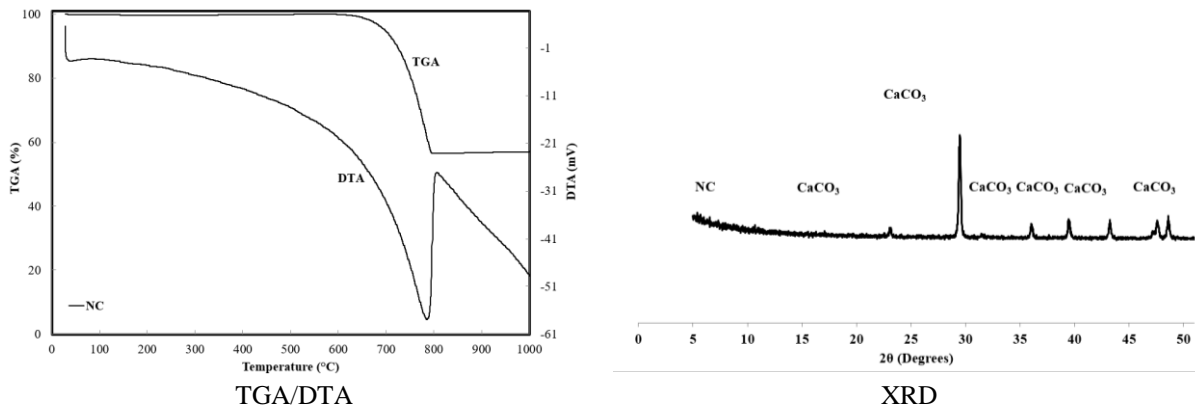


Figure 2.3. TGA/DTA curves and XRD diagram of crystal structure of NC

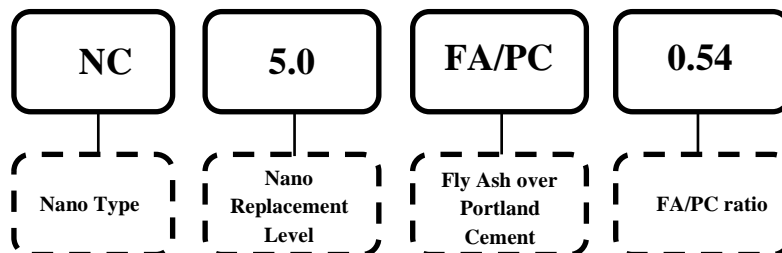


Figure 2.4. Representative labelling of the mixtures

Table 2.2. Mixture proportions of standard mortars

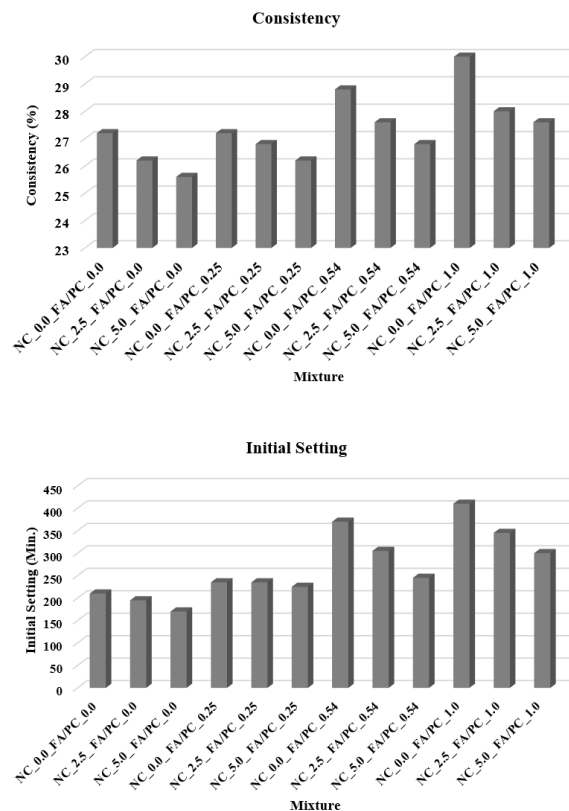
Mix #	Mix ID	Cement Type	PC	FA/PC	Water/Binder	Sand	NC/Binder, %	Blaine, cm ² /gr	Specific Gravity, gr/cm ³
1	NC_0.0_FA/PC_0.0	CEM I	1	0	0.5	3	0	3092	3,24
2	NC_2.5_FA/PC_0.0	CEM I	1	0	0.5	3	2,5	3821	3,22
3	NC_5.0_FA/PC_0.0	CEM I	1	0	0.5	3	5,0	4283	3,18
4	NC_0.0_FA/PC_0.25	CEM II-A/V	1	0.25	0.5	3	0	3567	3,08
5	NC_2.5_FA/PC_0.25	CEM II-A/V	1	0.25	0.5	3	2,5	3958	3,06
6	NC_5.0_FA/PC_0.25	CEM II-A/V	1	0.25	0.5	3	5,0	4786	3,07
7	NC_0.0_FA/PC_0.54	CEM II-B/V	1	0.54	0.5	3	0	3960	2,95
8	NC_2.5_FA/PC_0.54	CEM II-B/V	1	0.54	0.5	3	2,5	4396	2,92
9	NC_5.0_FA/PC_0.54	CEM II-B/V	1	0.54	0.5	3	5,0	4982	2,91
10	NC_0.0_FA/PC_1.0	CEM IV-B	1	1.0	0.5	3	0	4217	2,88
11	NC_2.5_FA/PC_1.0	CEM IV-B	1	1.0	0.5	3	2,5	4720	2,84
12	NC_5.0_FA/PC_1.0	CEM IV-B	1	1.0	0.5	3	5,0	5069	2,83

3. Results and Discussion

3.1 Setting Times

One of the goals of the current experimental research is to evaluate the hydration mechanism of blended types of cementitious materials including varying replacement levels of fly ash (FA) by using Nano-sized calcite (NC), which is produced by the top-down method and is much cheaper than some other nanomaterials such as Nano CaCO₃, Nano SiO₂ and Nano Al₂O₃. Average results found via Vicat Test Method are given in Figure 3.1. As seen in the Figure, test results showed that although nanomaterials are expected to increase the water requirement due to their high specific surface area, as the usage rate of NC increases, the water requirement needed for standard consistency has decreased due to the hydrophobic structure of NC (Lu and Wang 2010; Turgut 2018; Turgut 2019; Demirhan et al. 2019). Fly ash which is finer than cement has increased the water demand required for standard consistency as fly ash replacement level increased. Combined effects of the nucleation effect (reaction of NC with C₃S) and the chemical effect (reaction of NC with the aluminate phase in the binder, namely fly ash and cement) resulted in more hydration products which promoted setting times, therefore, relatively shorter initial and final setting times. In general, the reduction in setting times was more clearly observed in

mixtures including both NC and fly ash. Comparing to CEM I, as the replacement level of fly ash increased, an increase was observed in initial and final setting times due to delayed pozzolanic reactions.



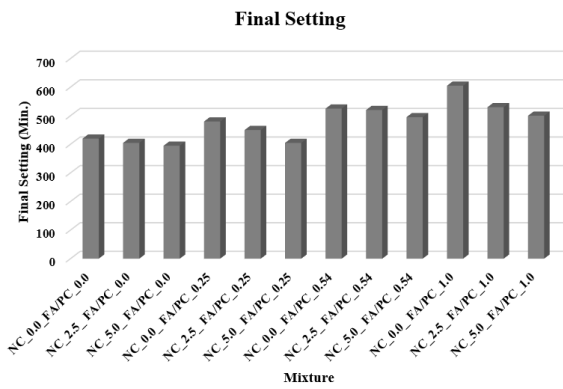


Figure 3.1. Consistency, Initial and Final Setting Times

3.2 Compressive Strength

Compressive strength values as mechanical property was obtained for all of the mixtures at the curing ages of 1, 3, 7, 28 and 90 days in order to monitor strength development and evolution. The average results of compressive strength and strength development are presented in Figure 3.2 and Figure 3.3, respectively. From the Figures, it was revealed that a pronounced enhancement in the compressive strength development of the mortars with/without fly ash was observed at all of the curing ages especially at the early age due to the increase in the hydration products formed in both chemical effect (reaction with the aluminate phase in binder) and nucleation/seedling effect (accelerated reaction with C_3S in cement) of Nano-calcite (NC).

It is seen from the Figures that in the first three mixtures including only normal Portland cement, a clear strength development was observed especially at the early ages in the presence of NC particles and the increment was almost the same or a slight decrease was observed when the replacement level of cement with NC was exceeded 2.5%. In the case of 2.5% replacement level of NC, 17.4% and 1.41% of strength development was obtained for the curing ages of 3 and 28 days, respectively while 15.42% and 1.64% development in strength was obtained for 5.0% of NC for the curing ages of 3 and 28 days, respectively. This shows that 2.5% or may be less than 2.5% is adequate for the NC since 1%

replacement level of nano $CaCO_3$ is advised by Supit et al. (2014). Even though NC has no potential of pozzolanic activity its presence in cementing environment has an influence on the hydration kinetics of C_3S accelerating cement hydration, promoting C-S-H precipitation, obtaining less porous and homogeneously refined microstructure resulting in an early strength development (Wu et al. 2018; Wu et al. 2016; Camilletti et al. 2013). Therefore, strength-gain-accelerating efficacy is attributed to presence of NC particles acting as a nuclei and seed in order to promote hydration of cement and to densify microstructure of matrix at the early ages (Sanchez and Sobolev 2010; Duval 2002). In the case of normal Portland cement, the presence of NC mainly promotes the hydration mechanism for C_3S and also has a little hydration accelerating effect with aluminate phase of cement resulting in a slight increase in 90-day strength development since aluminate phase is limited in the cement. Though early strength development of cement-based mortars obtained in the presence of NC (Vance et al. 2013; Kenai et al. 2004; Bosiljkov 2003; Lertwattanaruk et al. 2018), high replacement level of NC decreases dosage of cement and therefore results in lower strength improvement in the long-term curing ages (Liu et al. 2012; Ge et al. 2014; Hosan and Shaikh 2020). Thus, slight decreases observed in the %5 of NC may be attributed to this mechanism (namely dilution effect). The dilution effect directly depends on the replacement level of NC in the matrix. In cementitious systems with low alumina content (such as mixtures including only normal Portland cement), only a small proportion of NC is involved in the reactions (except reactions with C_3S). Therefore, the addition of a larger NC fraction as a supplementary to the cement reduces the content of cement clinker and hence hydration products. In addition to this, with the same water/binder ratio, since NC particles do not have binder property or pozzolanic reactivity, replacement with cement increases the free water to react with the cement particles, known as dilution effect.

As seen in the Figures, regardless of curing age, increase in the fly ash content in the presence of NC resulted in higher enhancement rates as a result of the addition of higher aluminate content introduced to the system with the replacement of cement by fly ash amplifies chemical effect of NC which results in more hydration products at both early and late ages (De Weerd et al. 2010; Aashay et al. 2016). Pozzolanic reactivity of fly ash has been accelerated by NC at both early and late ages (Meng et al. 2017) and synergy between NC and FA improves the formation of the additional hydration products where increment of cement replacement level resulted in higher carbonate consumption thus more hydration products. The synergy with the pozzolanic material varies depending on the replacement level of NC use and the ratio of the pozzolanic material and/or the aluminate phase in the pozzolanic material. Depending on all these two parameters, the alumina phase reacts with NC in order to form the additional hydration products, namely hemi-carbonate and mono-carbonate (which is a substance with special framework with strong hydrogen bonds between oxygen atoms and interlayer waters in carbonate groups) (Moon et al. 2012; De Weerd et al. 2011).

The development of compressive strength in blended cement mortars including higher volume of fly ash in the presence of NC and predominantly as a result of the chemical effect, a contribution to the strength development has been obtained. Compressive strength values of NC_0.0_FA/PC_0.0 and NC_2.5_FA/PC_1.0 at the curing age of 90-day were 43.2 MPa and 45.9 MPa, respectively. Therefore, these types of blended cements including higher amount of fly ash can significantly reduce the carbon footprint of cement-based materials as they contain lower volumes of cement and also show higher compressive strength values (Nath et al. 2018; Tosti et al. 2018).

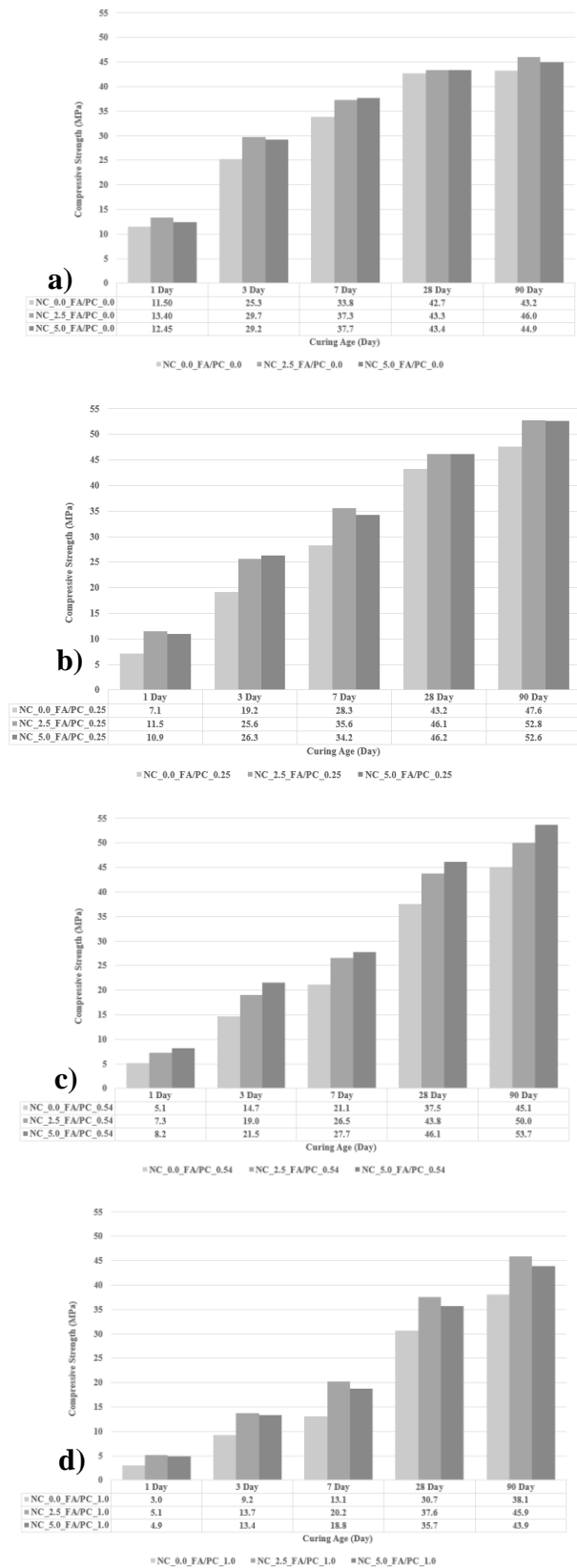


Figure 3.2. Average Compressive Strength (MPa) Values of 1, 3, 7, 28 and 90-day Mortars

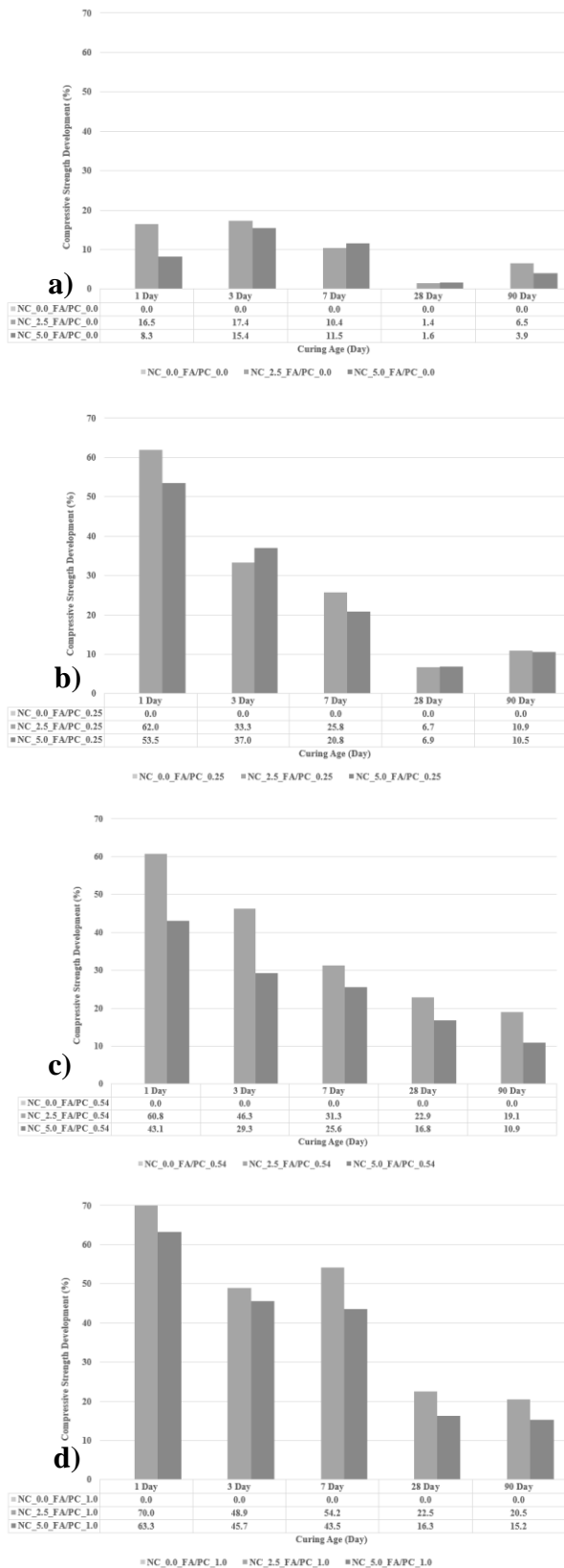


Figure 3.3. Strength Development (%) values of 1, 3, 7, 28 and 90-day Mortars

3.3 SEM Analysis

In order to elucidate the influence of NC particles on the hydration mechanism for curing age of 180 days on cement-based mortars with/without fly ash, scanning electron microscope (SEM) analysis has been conducted. For this purpose, mortar specimens including only normal Portland cement without NC and also specimens with only a 2.5% of NC, regardless of fly ash content, were subjected to SEM analysis.

As seen in the Figure 3.4, more ettringite formation was monitored in NC_2.5_FA/PC_0.0 (where a 2.5% of NC used) than NC_0.0_FA/PC_0.0 (only Normal Portland Cement). It is known that ettringite has been formed as a result of the reactions conducted between gypsum (source of calcium sulphate) and aluminate phases of cement, namely C₃A and C₄AF. On the depletion of gypsum, the rest of aluminate phase (C₃A and C₄AF) is reacted with the ettringite and thus monosulphate or hydroxy-AFm solid solution forms. In the presence of NC (as a source of CaCO₃), NC is reacted with aluminate phase of cement and/or pozzolanic materials in order to generate mono- or hemi-carboaluminates and consequently prevent the decomposition of ettringite formation. Therefore, in the presence of NC, the formed ettringite (AFt) is indirectly stabilized not to be transformed to monosulfate (AFm) (De Weerd et al. 2011) and the ettringite has remained in the cement-based matrix. In term of ettringite formation/decomposition, the results of SEM (in Figure 3.4) are in line with the literature as mentioned.

In addition, SEM images in Figure 3.5 showed that there were unreacted/agglomerated NC particles and calcium hydroxide (CH) in the mixtures of NC_2.5_FA/PC_1.0 (Figure 3.5-a) where the highest volume of fly ash was used and of NC_0.0_FA/PC_0.0 (Figure 3.5-b), respectively. These unreacted NC particles may be an evidence that (i) 2.5% is still too high for replacement level of NC (this finding was also confirmed by the results of compressive strength results where 2.5% of NC is adequate for current mixture

proportions and there was no or a slight increase when the replacement level of cement with NC was exceeded 2.5%.) since some researchers (Yang et al. 2018) has also found that a 1-2 % of NC is adequate or (ii) may be attributed to nonuniform dispersion due to agglomeration of NC particles being exposed to high Van der Waals forces. In addition to these, in the SEM images of mortars after 180 days, it is seen that there was also unhydrated fly ash particles (Figure 3.5-c) deposited in the cement-based matrix. Even though both unreacted NC and fly ash particles exist in the matrix they still behave as a filler to heal/enhance cement microstructure being led to a more densified and compacted morphology. Weerdt et al. (2011) has found that NC affects both calcium hydroxide and carboaluminate content where calcium hydroxide (CH) as a hydration product has been consumed by the formation of calcium hemicarboaluminate

hydrate (Hc) which is a hydration product of reaction conducted between aluminates phase and NC. In addition, they were also noted that after 7 days and longer a larger peak for Hc is observed, which gradually decreased later on as monocarbonate (Mc) has been formed instead (Ipavec et al. 2011). These findings are in line with the result of the current experimental study in which fly ash as a supplementary cementitious material could not be able to consume CH since CH has been consumed by calcium hemicarboaluminate hydrate after 7 days and longer (De Weerdt et al. 2011) and thus resulting in unhydrated fly ash particles. In addition to this, it was also found in the SEM image of Figure 3.5-d that only the additional hydration product of Mc has been identified after 180 days and no calcium hemicarboaluminate hydrate has been detected which proves the results mentioned previously.

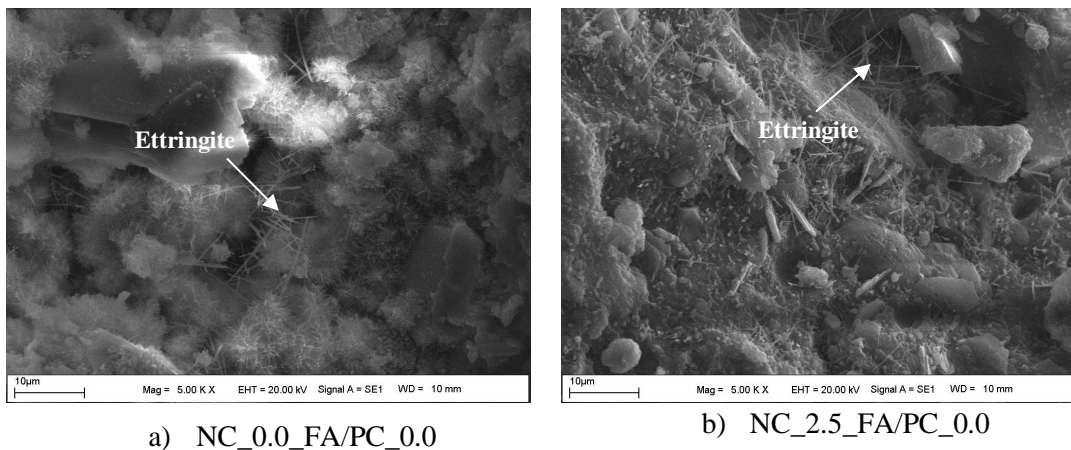


Figure 3.4. Ettringite formation a) without NC and b) with NC

3.4 Ultrasonic Pulsive Velocity (UPV)

Ultrasonic pulsed velocity (UPV) which is a non-destructive testing method is used in order to evaluate microstructural characteristics of cement-based materials, such as compactness, quality, homogeneity, uniformity, density, internal cracks and also porosity (Sumesh et al. 2017; Karagol et al. 2013). UPV test results for curing ages of 1-, 3-, 7-, 28- and 90-Day are represented in Figure 3.6. As seen in the Figure 3.6-a, b and c, it is easily seen that using higher volume of FA as a partial replacement to cement

decreases the UPV values of mixtures. This is attributed to lower pozzolanic reaction of FA at the early age (Mohammed et al. 2018) which leads to decrease in density of microstructure, thus resulting in more discontinuities, less improvement in strength and consequently lower UPV values (Rao et al. 2016). It was also revealed that regardless of FA and NC replacement levels, the difference between UPV values at early ages are very high while this difference decreased in the later curing ages. Higher UPV values obtained (where the higher transmission speed of wave means more compactness and therefore higher

compressive strength) at the later ages as a result of increased hydration reactions and products (Demirhan et al. 2019). This might be because of the decrease in the pore structure being filled by NC particles and also due to the formation of C-S-H gels and the additional hydration products as a result of pozzolanic reactions and seeding and/or chemical effects (Zareei et al. 2019). In the mixtures without FA (Figure 3.6-d), a decrease in

microstructural density was found as a result of dilution effect as NC replacement level increased. Thus, a slight decrease in UPV values was observed. In addition, there was a slight decrease in UPV values with the increase in NC replacement level (Figure 3.6.-d) and thus better UPV results were observed in mixtures including a 2.5% of NC.

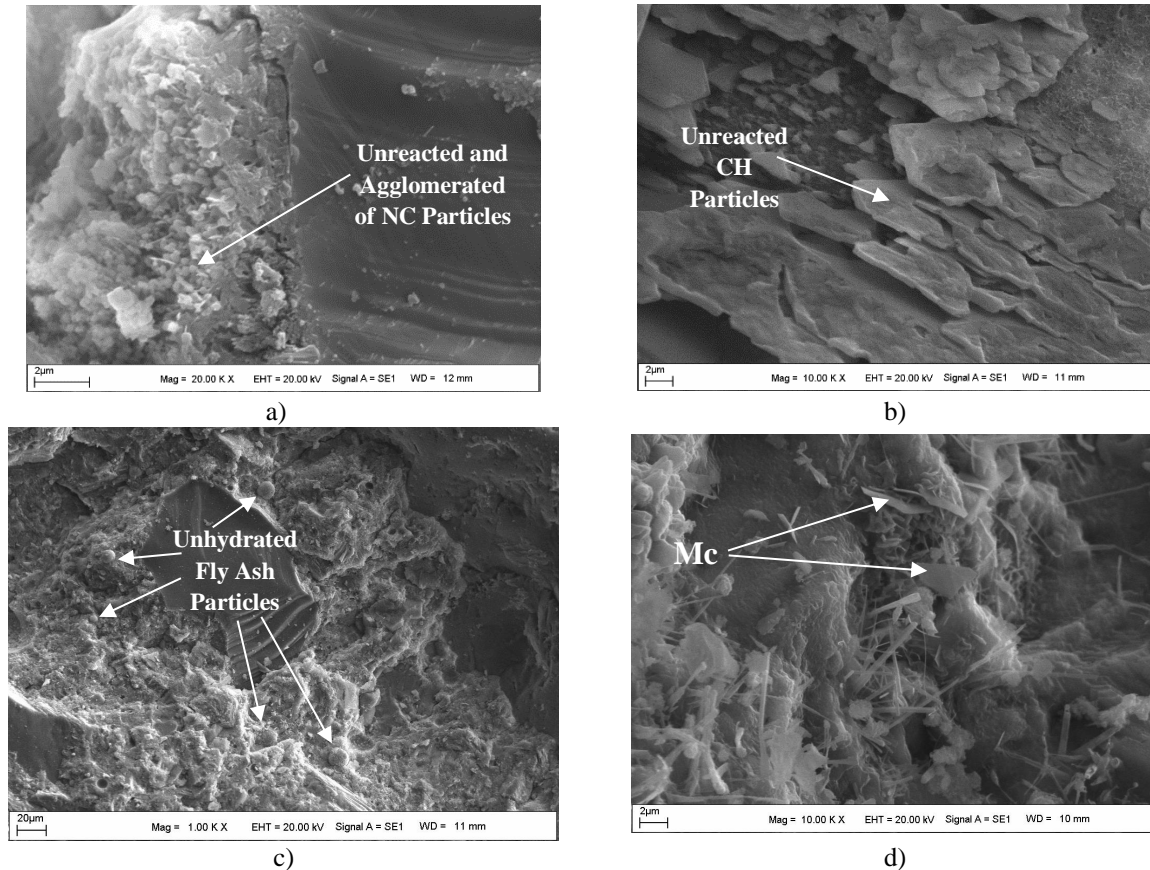


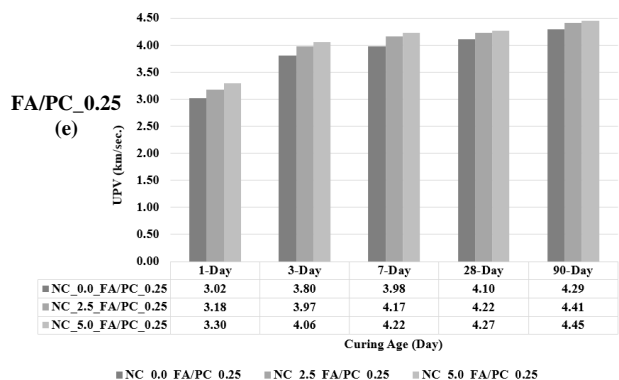
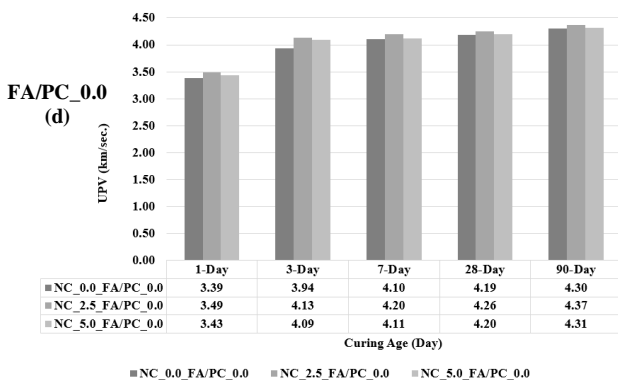
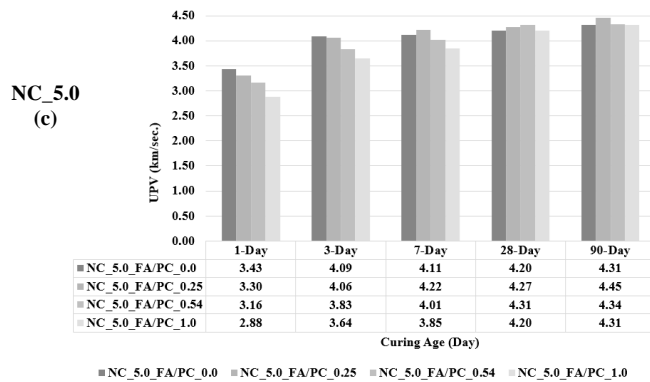
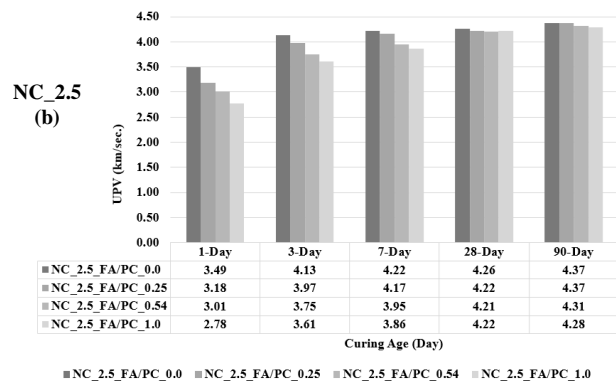
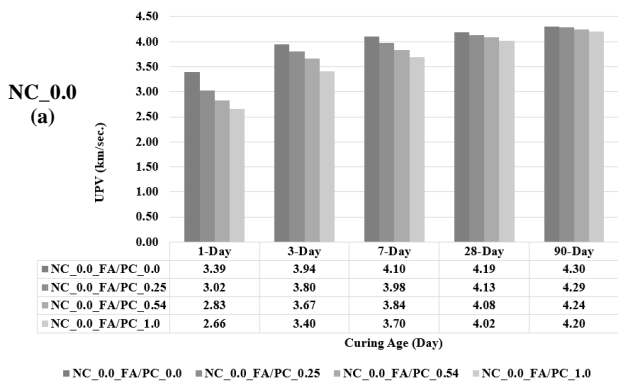
Figure 3.5. SEM images of a) unreacted and/or agglomerated NC particles, b) unreacted CH particles, c) unreacted Fly Ash particles and d) Mc products detected in mixtures including both of NC and Fly Ash

In all mixtures given in the Figure 3.6. d-g, especially at the 3-day curing age, an increase in hydration products was observed as a result of combined effects of the nucleation effect (promoted reactions of C_3S in the presence of NC) and the chemical effect (reactions occurring between total aluminate phases and NC). Therefore, due to the increase in microstructural density, an increase in UPV value was obtained. In addition to this, it is also seen that (Figure 3.6. e-g) as the FA replacement level increased due to including higher aluminate phase (comparing to ordinary normal Portland cement) (See Table 1),

the UPV values increased as a result of both nucleation and chemical effects. The highest contribution to the microstructure was observed in mixtures coded as FA/PC=0.25 while a slight decrease was also obtained with the increase in FA replacement level. Even though decrease in early age UPV values was obtained as FA amount was increased, (comparing to 0.0 coded mixtures of without FA) almost the same UPV results were obtained at later curing ages of mixtures including the highest FA content (50% of FA) (Figure 3.6. e-g).

Combined effect of nucleation and chemical effects resulted in almost the same microstructural property in NC_2.5_FA/PC_1.0 (50% Cement+50% FA) comparing to NC_0.0_FA/PC_0.0 (100% Cement). Microstructural quality of cement-based material could be classified as excellent, good, doubtful, poor and very poor for UPV values more than 4.5 km/sec., 3.5-4.5 km/sec., 3.0-3.5 km/sec., 2.0-3.0 km/sec. and less than 2.0 km/sec., respectively (Belaribi et al. 2016). Regardless of the FA

utilization rate, the UPV value of all mixtures was observed over 4 km/sec. at the curing age of 28-day in the presence of NC. Malhotra (1976) suggested that cement-based material has a good durability when its UPV value is in the interval of 3.66–4.58 km/sec. In the current experimental research, since the UPV values were higher than 4 km/sec. all mixtures could be classified as a durable mortar (Mohseni et al. 2015), namely, they could be considered as “good”.



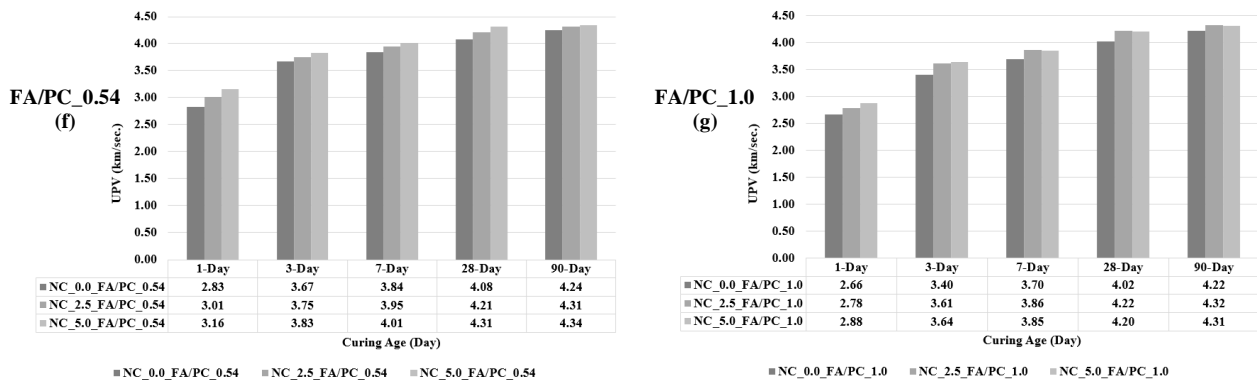


Figure 3.6. 1-, 3, 7-, 28- and 90-Day UPV results

4. Conclusion

Influence of nano-sized calcite produced by top-down approach and high-volume fly ash (up to 50%) on the fresh and hardened properties of standardly produced cement mortars and also microstructural characteristics were investigated in this research. Based on the findings and discussions given before, the following conclusions can be drawn:

- ✓ Different mechanisms [nucleation (seeding) effect, dilution effect and chemical effect] were observed in the presence of nano-sized calcite with and/or without fly ash.
- ✓ Even though surface area to volume ratio is very high in nano-sized materials which results in higher water requirement, increase in NC replacement level resulted in lower degree of wetness since NC shows a hydrophobic property. In addition, the higher volume of fly ash the higher standard consistency value.
- ✓ Regardless of fly ash content, as a result of both seeding and chemical effects, hydration was promoted and thus shorter setting times were observed. Higher volume of fly ash lead to more delayed setting times because of slow pozzolanic reactivity. Moreover, reduction in setting times was clearer in the mixtures where NC and FA used together.
- ✓ Increase in fly ash content showed a lower strength development due to delayed pozzolanic reactivity. Regardless of fly ash, enhancement was monitored at both early

and later curing ages of mixtures and this strength-gain-accelerating efficacy was attributed to presence of NC particles which was acted as a nuclei in order to promote hydration of cement and to densify microstructure of matrix at the early ages

- ✓ For the mixtures including only normal Portland cement increase in NC amount showed a dilution effect, namely, the same or a slight decrease in compressive strength.
- ✓ Compressive strength values of NC_0.0_FA/PC_0.0 (including 100% cement) and NC_2.5_FA/PC_1.0 (including 50% cement) at curing age of 90 days were 43.2 MPa and 45.9 MPa, respectively, where a significant reduction in the carbon footprint of cement is obtained.
- ✓ In general, a 2.5% replacement level of NC showed better results in terms of contribution and economy.
- ✓ Tailored blended cements composed of higher fly ash content (up to 50% replacement level) can significantly reduce the carbon footprint of cement-based materials.
- ✓ In SEM images, more ettringite formation was observed in the mixtures including NC and ettringite was indirectly stabilized not to be transformed to monosulfate since the aluminate phase has been consumed by NC.
- ✓ Since CH has been consumed by calcium hemicarboaluminate hydrate (Hc) unhydrated fly ash particles (which were not

able to take place in pozzolanic reaction) were detected in some mixtures.

- ✓ UPV values were decreased in higher fly ash contents while UPV values were increased with the increase in the curing age.
- ✓ UPV results of NC_0.0_FA/PC_0.0 (including 100% cement) and NC_2.5_FA/PC_1.0 (including 50% cement) had almost the same value in common.

5. References

- Arora, A., Sant, G., & Neithalath, N. (2016). Ternary blends containing slag and interground/blended limestone: Hydration, strength, and pore structure. *Construction and Building Materials*, **102**, 113-124.
- Bentz, D. P., Ardani, A., Barrett, T., Jones, S. Z., Lootens, D., Peltz, M. A., ... & Weiss, W. J., (2015). Multi-scale investigation of the performance of limestone in concrete. *Construction and Building Materials*, **75**, 1-10.
- Bonavetti, V. L., Rahhal, V. F., & Irassar, E. F., 2001. Studies on the carboaluminate formation in limestone filler-blended cements. *Cement and Concrete Research*, **31(6)**, 853-859.
- Bosiljkov, V.B., 2003. SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler. *Cement and Concrete Research*, **33**, 1279–1286.
- Camiletti, J., Soliman, A. M., & Nehdi, M. L., 2013. Effect of nano-calcium carbonate on early-age properties of ultra-high-performance concrete. *Magazine of Concrete Research*, **65(5)**, 297-307.
- Cao, M., Ming, X., He, K., Li, L., & Shen, S., 2019. Effect of macro-, micro-and nano-calcium carbonate on properties of cementitious composites—A review. *Materials*, **12(5)**, 781.
- Damidot, D., Lothenbach, B., Herfort, D., & Glasser, F. P., 2011. Thermodynamics and cement science. *Cement and Concrete Research*, **41(7)**, 679-695.
- Das, S., Aguayo, M., Dey, V., Kachala, R., Mobasher, B., Sant, G., & Neithalath, N., 2014. The fracture response of blended formulations containing limestone powder: Evaluations using two-parameter fracture model and digital image correlation. *Cement and Concrete Composites*, **53**, 316-326.
- De Weerd, K., Justnes, H., Kjellsen, K. O., & Sellevold, E., 2010. Fly ash-limestone ternary composite cements: synergetic effect at 28 days. *Nordic Concrete Research*, **42(2)**, 51-70.
- De Weerd, K., Haha, M. B., Le Saout, G., Kjellsen, K. O., Justnes, H., & Lothenbach, B., 2011. Hydration mechanisms of ternary Portland cements containing limestone powder and fly ash. *Cement and Concrete Research*, **41(3)**, 279-291.
- De Weerd, K., Kjellsen, K. O., Sellevold, E., & Justnes, H., 2011. Synergy between fly ash and limestone powder in ternary cements. *Cement and concrete composites*, **33(1)**, 30-38.
- Demirhan, S., Turk, K., & Ulugerger, K., 2019. Fresh and hardened properties of self-consolidating Portland limestone cement mortars: Effect of high-volume limestone powder replaced by cement. *Construction and Building Materials*, **196**, 115-125.
- Duval, R., 2002. Effect of ultrafine particles on heat of hydration of cement mortars. *Materials Journal*, **99(2)**, 138-142.
- Ge, Z., Wang, K., Sun, R., Huang, D., & Hu, Y., 2014. Properties of self-consolidating concrete containing nano-CaCO₃. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, **3(3-4)**, 191-200.
- Hassiba, B., Mekki, M., & Fraid, R., 2018. The relationship between the compressive strength and ultrasonic pulse velocity concrete with fibers exposed to high temperatures. *International Journal of Energetica*, **3**, 31-6.
- He, Z., Zhu, X., Wang, J., Mu, M., & Wang, Y., 2019. Comparison of CO₂ emissions from OPC and recycled cement production. *Construction and Building Materials*, **211**, 965-973.
- Hosan, A., & Shaikh, F. U. A., 2020. Influence of nano-CaCO₃ addition on the compressive strength and microstructure of high-volume slag and high-volume slag-fly ash blended pastes. *Journal of Building Engineering*, **27**, 100929.

- Ipavec, A., Gabrovšek, R., Vuk, T., Kaučič, V., Maček, J., & Meden, A., 2011. Carboaluminate Phases Formation During the Hydration of Calcite-Containing Portland Cement. *Journal of the American Ceramic Society*, 94(4), 1238-1242.
- Jamora, J. B., Gudia, S. E. L., Go, A. W., Giduquio, M. B., & Loretero, M. E., 2020. Potential CO₂ reduction and cost evaluation in use and transport of coal ash as cement replacement: A case in the Philippines. *Waste Management*, 103, 137-145.
- Kakali, G., Tsvivilis, S., Aggeli, E., & Bati, M., 2000. Hydration products of C3A, C3S and Portland cement in the presence of CaCO₃. *Cement and concrete Research*, 30(7), 1073-1077.
- Karagöl, F., Demirboğa, R., Kaygusuz, M. A., Yadollahi, M. M., & Polat, R., 2013. The influence of calcium nitrate as antifreeze admixture on the compressive strength of concrete exposed to low temperatures. *Cold Regions Science and Technology*, 89, 30-35.
- Kenai, S.; Soboyejo, W.; Soboyejo, A., 2004. Some engineering properties of limestone concrete. *Materials and manufacturing processes*, 5, 949–961.
- Lertwattanaruk, P.; Sua-iam, G.; Makul, N., 2018. Effects of calcium carbonate powder on the fresh and hardened properties of self-consolidating concrete incorporating untreated rice husk ash. *Journal of Cleaner Production*, 172, 3265–3278.
- Liu, X.; Chen, L.; Liu, A.; Wang, X., 2012. Effect of Nano-CaCO₃ on properties of cement paste. *Energy Procedia*, 16, 991–996.
- Liu, M., Tan, H., & He, X., 2019. Effects of nano-SiO₂ on early strength and microstructure of steam-cured high volume fly ash cement system. *Construction and Building Materials*, 194, 350-359.
- Lu, G., & Wang, K., 2010. Investigation into yield behavior of fresh cement paste: model and experiment. *ACI Materials Journal*, 107(1), 12.
- Malhotra, V. M., 1976. Testing hardened concrete: Non-destructive methods, ISBN: 13: 978-1-4200-4005-0, ACI Monograph No. 9, ACI. Iowa State University Press, Ames, Iowa, USA, 8-14.
- Meng, T., Yu, Y., & Wang, Z., 2017. Effect of nano-CaCO₃ slurry on the mechanical properties and micro-structure of concrete with and without fly ash. *Composites Part B: Engineering*, 117, 124-129.
- Mohammed, B. S., Adamu, M., & Liew, M. S., 2018. Evaluating the effect of crumb rubber and nano silica on the properties of high volume fly ash roller compacted concrete pavement using non-destructive techniques. *Case studies in construction materials*, 8, 380-391.
- Mohseni, E., Ranjbar, M. M., & Tsavdaridis, K. D., 2015. Durability properties of high-performance concrete incorporating nano-TiO₂ and fly ash. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 8(4), 519-526.
- Moon, J., Oh, J. E., Balonis, M., Glasser, F. P., Clark, S. M., & Monteiro, P. J., 2012. High pressure study of low compressibility tetracalcium aluminum carbonate hydrates 3CaO·Al₂O₃·CaCO₃·11H₂O. *Cement and Concrete Research*, 42(1), 105-110.
- Nath, P., Sarker, P. K., & Biswas, W. K., 2018. Effect of fly ash on the service life, carbon footprint and embodied energy of high strength concrete in the marine environment. *Energy and Buildings*, 158, 1694-1702.
- Pera, J., Husson, S., & Guilhot, B., 1999. Influence of finely ground limestone on cement hydration. *Cement and Concrete Composites*, 21(2), 99-105.
- Rao, S. K., Sravana, P., & Rao, T. C., 2016. Experimental studies in Ultrasonic Pulse Velocity of roller compacted concrete pavement containing fly ash and M-sand. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 9(4), 289-301.
- Sanchez, F., & Sobolev, K., 2010. Nanotechnology in concrete—a review. *Construction and building materials*, 24(11), 2060-2071.
- Sandanayake, M., Gunasekara, C., Law, D., Zhang, G., & Setunge, S., 2018. Greenhouse gas emissions of different fly ash based geopolymer concretes in building construction. *Journal of cleaner production*, 204, 399-408.
- Sato, T., & Beaudoin, J. J., 2011. Effect of nano-CaCO₃ on hydration of cement containing supplementary

- cementitious materials. *Advances in Cement Research*, **23**(1), 33-43.
- Shaikh, F. U., & Supit, S. W., 2014. Mechanical and durability properties of high-volume fly ash (HVFA) concrete containing calcium carbonate (CaCO₃) nanoparticles. *Construction and building materials*, **70**, 309-321.
- Shwekat, K., & Wu, H. C., 2018. Benefit-cost analysis model of using class F fly ash-based green cement in masonry units. *Journal of Cleaner Production*, **198**, 443-451.
- Sobolev, K., & Gutiérrez, M. F., 2005. How nanotechnology can change the concrete world. *American Ceramic Society Bulletin*, **84**(10), 14.
- Sumesh, M., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z., Mo, K. H., & Alnahhal, M. F., 2017. Incorporation of nano-materials in cement composite and geopolymer based paste and mortar—A review. *Construction and Building Materials*, **148**, 62-84.
- Supit, S. W., & Shaikh, F. U., 2014. Effect of nano-CaCO₃ on compressive strength development of high-volume fly ash mortars and concretes. *Journal of Advanced Concrete Technology*, **12**(6), 178-186.
- Thongsanitgarn, P., Wongkeo, W., & Chaipanich, A., 2014. Hydration and compressive strength of blended cement containing fly ash and limestone as cement replacement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **26**(12), 04014088.
- Tosti, L., van Zomeren, A., Pels, J. R., & Comans, R. N., 2018. Technical and environmental performance of lower carbon footprint cement mortars containing biomass fly ash as a secondary cementitious material. *Resources, Conservation and Recycling*, **134**, 25-33.
- Tosti, L., van Zomeren, A., Pels, J. R., Damgaard, A., & Comans, R. N., 2020. Life cycle assessment of the reuse of fly ash from biomass combustion as secondary cementitious material in cement products. *Journal of cleaner production*, **245**, 118937.
- Turgut, P., 2018. Production of block by using fly ash, lime and glass powder. *Pamukkale University Journal Of Engineering Sciences-Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **24**(3), 413-418.
- Turgut, P., & Ogretmen, A., 2019. Optimum limestone powder amount in mortars with over silica fume. *Epitoanyag-Journal of Silicate Based & Composite Materials*, **71**(2).
- Uysal, M., 2012. Self-compacting concrete incorporating filler additives: Performance at high temperatures. *Construction and Building Materials*, **26**, 701-706
- Vance, K., Aguayo, M., Oey, T., Sant, G., & Neithalath, N., 2013. Hydration and strength development in ternary portland cement blends containing limestone and fly ash or metakaolin. *Cement and Concrete Composites*, **39**, 93-103.
- Voglis, N., Kakali, G., Chaniotakis, E., & Tsvilis, S., 2005. Portland-limestone cements. Their properties and hydration compared to those of other composite cements. *Cement and Concrete Composites*, **27**(2), 191-196.
- Wang, D., Shi, C., Farzadnia, N., Shi, Z., Jia, H., & Ou, Z., 2018. A review on use of limestone powder in cement-based materials: Mechanism, hydration and microstructures. *Construction and Building Materials*, **181**, 659-672.
- Wu, Z., Shi, C., & Khayat, K. H., 2018. Multi-scale investigation of microstructure, fiber pullout behavior, and mechanical properties of ultra-high-performance concrete with nano-CaCO₃ particles. *Cement and Concrete Composites*, **86**, 255-265.
- Wu, Z., Shi, C., Khayat, K. H., & Wan, S., 2016. Effects of different nanomaterials on hardening and performance of ultra-high strength concrete (UHSC). *Cement and Concrete Composites*, **70**, 24-34.
- Xiao, H., Wang, W., & Goh, S. H., 2017. Effectiveness study for fly ash cement improved marine clay. *Construction and Building Materials*, **157**, 1053-1064.
- Yang, H., Che, Y., & Leng, F., 2018. High volume fly ash mortar containing nano-calcium carbonate as a sustainable cementitious material: microstructure

and strength development. *Scientific reports*, **8**(1), 16439.

Yeşilmen, S., Al-Najjar, Y., Balav, M. H., Şahmaran, M., Yıldırım, G., & Lachemi, M., 2015. Nano-modification to improve the ductility of cementitious composites. *Cement and Concrete Research*, **76**, 170-179.

Zaitri, R., Bederina, M., Bouziani, T., Makhloufi, Z., & Hadjoudja, M., 2014. Development of high performances concrete based on the addition of grinded dune sand and limestone rock using the mixture design modelling approach. *Construction and Building Materials*, **60**, 8-16.

Zareei, S. A., Ameri, F., Bahrami, N., Shoaie, P., Moosaei, H. R., & Salemi, N., 2019. Performance of sustainable high strength concrete with basic oxygen steel-making (BOS) slag and nano-silica. *Journal of Building Engineering*, **25**, 100791.

Zou, F., Hu, C., Wang, F., Ruan, Y., & Hu, S., 2020. Enhancement of early-age strength of the high content fly ash blended cement paste by sodium sulfate and C–S–H seeds towards a greener binder. *Journal of Cleaner Production*, **244**, 118566.

Evaluation of the Track Geometry Quality with Standard Deviation Method and Quality Indices: Case study of Kütahya-Afyonkarahisar Railway Line

Polat YALINIZ^{1*}, Sezgin İÇA²

¹ Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kütahya.

² Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı, Kütahya.

*Sorumlu Yazar, e-posta¹: polat.yaliniz@dpu.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0373-9727>

e-posta²: sezgin.ica@ksbu.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-5194-7059>

Geliş Tarihi: 04.02.2020

Kabul Tarihi: 20.11.2020

Abstract

In this paper, a specific part of the railway line between Kütahya and Afyonkarahisar cities was investigated. The track geometry parameters alignment, cant, longitudinal level, track gauge and twist investigated at this track section in accordance with the related standard EN:13848-5 and evaluations conducted about the track geometry defects. A fatal train accident occurred on the Kütahya-Afyonkarahisar railway line in 2008, besides the line was completely renewed in 2013. For this reason, measurements were carried out by the help of track geometry measuring devices on the Kütahya-Afyonkarahisar railway line having the opportunity to compare the improvements at the track geometry quality, within four years period. Owing to measurements performed on the track section, improvements, degradations and degradation trends were determined using the standard deviation method mentioned in the standard EN:13848-5. In addition, the effects of the track renewal performed on the railway line discussed by the help of the Track Quality Indices (TQI), Overall Quality Indices (OQI) and Tamping Indices (TI) concepts. In light of the case study conducted at this paper, the quality of the track renewal and maintenance works performed by Turkish State Railways (TCDD) was examined.

Keywords

Railway; Alignment;
Longitudinal Level;
Track Geometry
Indices; Track
Geometry Quality

Yol Geometrisi Kalitesinin Standart Sapma Yöntemi ve Kalite Endeksleri İle Değerlendirilmesi: Kütahya-Afyonkarahisar Hattı Örneği

Öz

Bu çalışmada, Kütahya-Afyonkarahisar şehirleri arasındaki konvansiyonel taşımacılık yapılan demiryolu hattı üzerinde belirli bir bölüm incelenmiştir. Söz konusu yol kesiminde, yol geometrisi parametreleri olan dever, ekartman, nivelman, fleş ve burulma hataları ilgili EN:13848-5 normu çerçevesinde incelenmiş ve bu yol geometrisi kusurları ile ilgili değerlendirilmeler yapılmıştır. Kütahya-Afyonkarahisar demiryolu hattında 2008 yılında ölümlü tren kazasının meydana gelmiş olup, ayrıca bu hatta 2013 yılında ise poz çalışması yapılarak hat tamamen yenilenmiştir. Bu nedenle hattaki iyileşmelerin karşılaştırılma imkanı bulunan Kütahya-Afyonkarahisar demiryolu hattında dört yıllık zaman dilimi içerisinde yol geometrisi ölçüm aletleri ile ölçüm çalışmaları yapılmıştır. Yapılan ölçümler sayesinde yol bölümündeki iyileşmeler, bozulmalar ve bozulma eğilimleri EN:13848-5 normunda da yer alan standart sapma yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Ayrıca Kütahya- Afyonkarahisar demiryolu hattı üzerinde yapılan poz çalışmasının yol geometrisi kalitesine etkileri yol kalite endeksleri (QI), toplam yol kalite endeksi (OQI) ve buraj endeksi (TI) kavramları ile irdelenmiştir. Bu çalışmada yapılan örnek olay incelemesi sayesinde, TCDD tarafından yapılmış olan yol yenileme ve bakım çalışmalarının kalitesi araştırılmıştır.

Anahtar kelimeler

Demiryolu; Fleş;
Nivelman; Yol
Geometrisi Endeksleri;
Yol Geometrisi Kalitesi

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Introduction

As in the world in transportation sector huge investments are being made in recent years, among these high-speed rail investments are the leading

investments in this area. Tracks were built for high-speed rail standards with the new high budgeted investments on railways but more importantly, is to fulfil the operation, maintenance and safety

conditions while maintaining the standard of track under all conditions. As carrying out the timely maintenance activities, keeping under supervision track geometry defects incessantly is the most significant factor at preserving the track quality.

These vital maintenance, repair and track renewal activities are carried out and monitored by Track Maintenance and Repair Directorates at TCDD. Monitoring and quality control of the activities are also performed by the directorates with the help of the track geometry measurement machines (mpv7, krab, roger etc.). In order to reassure the quality of the maintenance, repair and track renewal activities carried out by the directorates, an independent double check process practised by this study.

In this study, a specific part of the Kütahya-Afyonkarahisar railway line was investigated in order to determine these track geometry defects, degradations, degradation trends and the effects of the maintenance works on track quality. At the case study, 2,5 km long railway section on the Kütahya – Afyonkarahisar railway line between Alayunt Railway Station (Km 66+874) and Çöğürler Railway Station (Km 86+505) was investigated which is located at the district of Turkish State Railways (TCDD) 71. Directorate Track Maintenance and Repair.

The results of the measurements performed semiannually by TCDD with track geometry measuring vehicle “Matisa MPV-7” obtained from related Track Maintenance and Repair Office. Moreover, unplanned measurements recorded by Czech Republic product “KRAB” track geometry measuring trolley, attained from the same institution. The results of measurements provided from these two measuring instruments were combined so as to monitor the quality of the track in time before and after the track renewal.

The main reasons of the selection of this line are as follows: occurrence of a fatal train accident on 27 January 2008, complete renewal of the track on the summer of 2013, presence of the measurements recorded periodically with MPV-7 and Krab for the line. Due to derailment of Pamukkale Express travelling from İstanbul to Denizli operating on stated line, 8 passengers in addition to driver were killed and 37 others were severely injured. It was

reported to be Turkey’s one of the most serious accident occurring in the last two decades. (Int. Rsc. 1).

Eskişehir (Km 0+000) - Konya (Km 433+685) conventional railway line is totally 433,685 km and the project speed of the line is 120 km/h. The selected Km 67+750 – 70+000 section is located between Alayunt and Çöğürler stations at the Kütahya district. At the selected section the slopes of the line are as follows; For the increasing kilometer from 67+700 to 68+700 %3,3 upwards, from 68+700 to 69+500 %4,8 upwards, from 69+500 to 69+900 %6,0 upwards, from 69+900 to 70+240 %8,8 upwards. There are 2 railway crossings situated on Km 68+041 and Km 68+912. Moreover, a curve 962 meter radius is located between the Km 68+790 – 69+210.

Eskişehir – Afyonkarahisar conventional railway line was initially built in 1896. After that date the track had been maintained and repaired but the last known date of the complete renewal of the track was in 1989. Alayunt – Afyonkarahisar section of the line had been renewed section by section between the years of 1982-1989. Since completion of the economic life of the track section which had intensive transportation in years, complete renewal of the track had been performed at the summer of 2013. At this period, UIC 60 rail, HM type rail fastening and B70 concrete sleepers compatible with the new standards were used on the renewed track.

Krab and MPV-7 measurement results recorded on the dates 11.04.2011, 16.04.2012, 11.12.2012 and 15.04.2013 (before the track renewal performed on the summer of 2013 year) between Alayunt and Çöğürler stations located on this line are available. Besides, KRAB measurement results recorded on the line – on the dates 09.01.2014, 09.02.2015 and 27.08.2015 (after the track renewal performed) are available. Similarly, MPV-7 measurement results recorded on the line by the Track Maintenance and Repair Office after the track renewal performed on the date 21.10.2014 are available. Since Krab the track geometry measuring trolley entering the TCDD inventory in 2012, no measurement could be provided before the year 2012.

A study is carried out to determine track geometry defects, degradations, degradation trends by comparing the above mentioned measurement results recorded before and after the track renewal the performed. In the light of this article, the quality of the track renewal performed by TCDD are intended to be evaluated by two different methods.

2. Material ve Method

At this paper, a track section between Km 67+750 – 70+000 is selected on the Kütahya-Afyonkarahisar railway line in order to investigate for the case study. On this selected track section variations at the track geometry quality were studied and the recorded data was evaluated by Krab8vNET software with quality indices (QI) and standard deviation (SD) as implemented at the EN:13848-5 standard. Map of the investigated route is shown at figure 1.



Figure 1. Map of the investigated route (Int. Rsc. 2).

Quality Index (QI) formulations can be determined by the rail infrastructure managers in the world, according to the characteristics of their own railway networks. Quality index of the track is a significant indicator in terms of assessing the efficiency and deterioration rate of the track. Quality indices enable infrastructure managers to optimize work force, machine, equipment and financial resources and to plan the maintenance works to be carried out. For the alignment, cant, longitudinal level and track gauge parameters QI values can be calculated separately at the track segment selected by the railway manager. In addition to calculating QI values separately, an overall quality index (OQI) can be calculated as an indicator of the total track quality in

order to monitor deteriorations and maintenance needs for the track segment.

Another criterion for determining the quality of the track geometry is standard deviation (SD) concept which is also mentioned in the EN: 13848-5 standard. As calculated for quality indices, standard deviation can be calculated for the alignment, cant, longitudinal level and track gauge parameters separately. For the alignment and longitudinal level parameters by the help of the limits defined in the EN: 13848-5 standard, deteriorations and maintenance needs for the track can be determined.

According to the EN:13848-5 standard, track quality levels are categorized to three main levels. Through these three quality levels the condition of the track can be directly identified and intervened by the railway infrastructure manager. These three quality levels are as follows:

- Immediate Action Limit (IAL): refers to the value which, if exceeded, leads to the Infrastructure Manager taking measures to reduce the risk of derailment to an acceptable level. This can be done either by closing the line, reducing speed or by correction of track geometry.

- Intervention Limit (IL): refers to the value, which, if exceeded, requires corrective maintenance in order that the immediate action limit shall not be reached before the next inspection;

- Alert Limit (AL): refers to the value which, if exceeded, requires that the track geometry condition is analyzed and considered in the regularly planned maintenance operations (CEN 2008).

By the help of the Track Quality Indices (QI), Overall Quality Indices (OQI) and Standard Deviation (SD) parameters quality level of the track geometry according to above mentioned limits can be determined and necessary precautions can be taken by railway infrastructure manager.

2.1 Standard Deviation Method According to EN 13848-5

Railway infrastructure managers used to combine all these mentioned defects (alignment, cant, longitudinal level and track gauge) into track-quality indices which would be a function of standard deviations of each defect and train permissible

speed (as reported in Zhao et al. 2006 and El-Sibaie and Zhang 2004, Andrade and Teixeira 2013). Nevertheless the standard deviation for the short wavelength (3–25m) of longitudinal-levelling defects is still regarded as the main indicator for planned-maintenance decisions as it is confirmed by a recent guide on best practices for optimum track geometry durability (Andrade and Teixeira 2013). As stated above track geometry defects obtained from the measurement results performed on a certain track section can be evaluated by using the standard deviation (SD) of the geometric variables. By the help of this statistical formulation the quality of the track section can be determined. The higher the value of standard deviation (SD) leads to the poorer the track quality; the lower values of standard deviation (SD) correspond to the opposite situation (Berawi 2013).

The standard deviation for each measured parameter is calculated using the following formula:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \tag{1}$$

Where;

S = Standart Deviation

\bar{x} = Average value of track defect (mm)

n = Number of track defects recorded at the track section studied

x_i = Value of the parameter at the point (mm)

According to EN 13848-5, standard deviation (SD)-Speed Zones tables are given below in table 1 and table 2. Evaluation of track can be performed with respect to Alert Limit (AL). Intervention Limit (IL) and Immediate Action Limit (IAL) are not determined at this approach.

Table 1 . Longitudinal level (AL) - standard deviation (SD) – speed zones table (CEN 2008)

Speed (in km/h)	Standard Deviation D1 (in mm)
V ≤ 80	2,3 to 3,0
80 < V ≤ 120	1,8 to 2,7
120 < V ≤ 160	1,4 to 2,4
160 < V ≤ 230	1,2 to 1,9
230 < V ≤ 300	1,0 to 1,5

Table 2 . Alignment (AL) - standard deviation (SD) – speed zones table (CEN 2008)

Speed (in km/h)	Standard Deviation D1 (in mm)
V ≤ 80	1,5 to 1,8
80 < V ≤ 120	1,2 to 1,5
120 < V ≤ 160	1,0 to 1,3
160 < V ≤ 230	0,8 to 1,1
230 < V ≤ 300	0,7 to 1,0

After the track renewal, the acceptable SD values would be the lowest SD values of each speed zone related. (e.g., for the alignment 80 < V ≤ 120 km/h speed zone 1,2 would be the acceptable SD value)

2.2 Quality Indices According to Krab Track Geometry Measurement System

Track Quality Index (TQI) is a numerical measure derived from the track geometry measurements to quantify the quality of the track condition. TQI has been widely used in track deterioration studies (El-Sibaie and Zhang 2004, Sharma et al. 2018) and has shown successful results. As summarized by Taciroğlu et al. (2020), Lasisi and Attoh-Okine (2019) there are some different track quality indices in the literature suggested by institutions and researchers. In this paper, the track quality index (TQI) of the Krab track geometry measurement trolley was studied. The formulations defined at Krab8vNET software were used for the evaluation of track geometry. These formulations are given below in formulas 2 and 3.

QI formulation determined on the basis of logarithmic transformation between standard deviation and QI, guarantees 80 percent of the QI values to be lower than 4 and having a mean of 3 (KZV 2002). The coefficients b' and m at the formulation are geometric variables related to standard deviation statistical values according to KZV (2002).

QI can be calculated with the following Eq. (2):

$$QI = \frac{\ln\left(\frac{STD}{b'}\right)}{m} \tag{2} \text{ (KZV 2002)}$$

The results of quality section evaluation of track according to quality indices are indicative (Izvolta and Smalo 2015). Measures, which are set for individual intervals of quality indices, are recommendatory tabulated at table 3.

Table 3 . The scale of the quality indices (QI) (Izvolta and Smalo 2015)

Interval of QI	Verbal assessment section a according to QI	Color of the QI in output
$0 < QI \leq 2$	The state of the track geometry is satisfactory	No color marking
$2 < QI \leq 3$	Recommended to plan the repair of the track geometry at the maintenance work plan	Green color
$3 < QI < 4$	Recommended to perform the repair of the track geometry at the nearest control	Violet color
$4 \leq QI \leq 6$	Recommended to perform immediate measures to ensure the safety of operation	Red color

Futhermore, Overall Quality Index (OQI) and Tamping Index (TI) are expressed as the sum of the geometrical variables; alignment, cant, longitudinal level and track gauge and they are used for the overall evaluation of the track quality (KZV 2002). OQI and TI summarizing the four basic geometric variables are expressed by the following Eq. (3):

$$OQI, TI = k \max \{ (W_{Al} SD_{Al} + W_{Ga} SD_{Ga}), (W_{Ct} SD_{Ct} + W_{Tp} SD_{Tp}) \} + q \quad (3) \text{ (KZV 2002)}$$

Where;

SDAl-WAl Standard deviation and weight of alignment parameter

SDGa-WGa Standard deviation and weight of track gauge parameter

SDCt-WCt Standard deviation and weight of cant parameter

SDTp-WTp Standard deviation and weight of longitudinal level parameter

k multiplier factor

q cumulative constant

3. Results

The collected track geometry data were evaluated by the standard deviation method and quality indices mentioned at the material and method section.

3.1. Evaluation of the Track Geometry Quality with Standard Deviation Method

As stated before, a complete track renewal was performed in 2013 summer on the Kütahya - Afyonkarahisar Railway Line. Measurements recorded on the dates 11.12.2012 (Krab), 11.04.2011 (MPV-7), 16.04.2012 (MPV-7) and

15.04.2013 (MPV-7) (before the track renewal performed) are available. Moreover, after the track renewal performed, measurements recorded by the Krab on the dates 09.01.2014, 09.02.2015 and 27.08.2015 are present. Having the opportunity to combine and analyze the data recorded by track geometry measuring devices before and after the track renewal, a track segment between Km 67+750 – 70+000 near Alayunt Railway Station selected as case study of this paper.

At this part of the study standard deviation of alignment parameter recorded at all measurements performed by both Krab and MPV-7 was calculated in order to create a graph to visualize the deterioration trend. Standard deviation of alignment defects in 3-25 m. (D1) wavelength are presented in figure 2.

Evaluating the measurement results obtained from MPV-7 and Krab, according to figure 1 it can be seen that as an indicator of the deterioration of track, SD value increases gradually in time. The SD values of alignment parameter before the track renewal are quite over the limits given in table 2.

As seen on the figure 2, the first three measurement results are well above the limits defined as 1.2 – 1.5 mm at the 80 km/h < V ≤ 120 km/h speed zone. For this reason, the trains were operated with the speed restrictions at very low speeds on this track segment.

Due to speed restrictions applied on the track, an unplanned maintenance was performed after the inspection carried out on 11.12.2012. Following this unplanned maintenance activity a notable improvement on the track was detected according to the measurement results recorded by MPV-7 on 15.04.2013. After the track renewal performed on the summer of 2013, the increase in track quality can be observed clearly by the help of the SD value which is quite under the limits according to the measurement results recorded on 09.01.2014 by Krab.

After this period, SD value of track increased at the two inspections carried out until 09.02.2015. Due to initial settlements at the newly constructed track, quality of track deteriorated as expected within the two years after the track renewal.

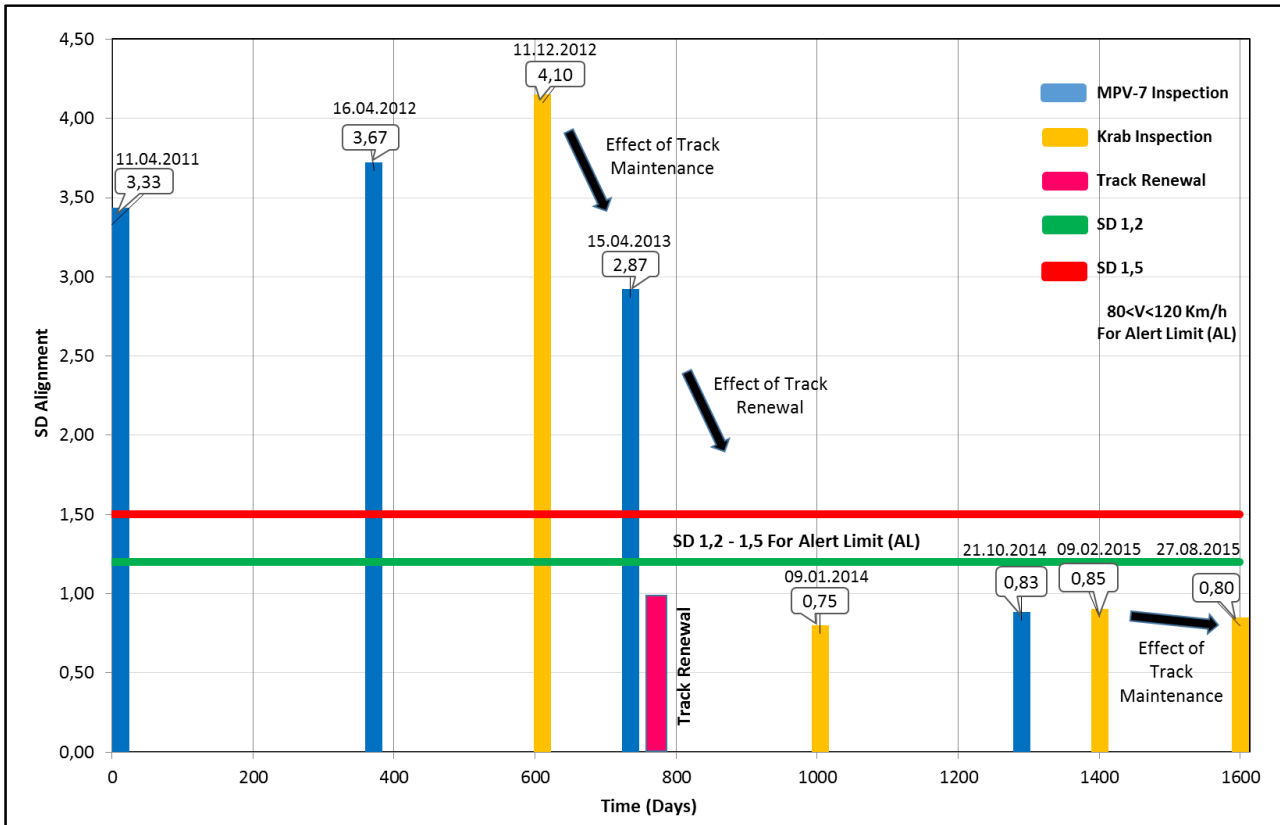


Figure 2. Standard deviation of alignment parameter vs time graph (İça 2015)

According to the figure 2 it can be inferred that, SD of the alignment parameter is an important indicator for the overall quality of the track. The standard deviation of horizontal-alignment defects (filtered in the wavelength range 3–25 m – SD-HA) showed to be a statistically significant predictor for all maximum permissible speed groups and for the three quality levels (AL – alert limit, IL – intervention limit and IAL – immediate action limit) (Andrade and Teixeira 2013).

The three inspections having low initial track quality and the other three inspections having high initial track quality are compared and evaluated, in order to determine the effects of the initial track quality to the track deterioration. During this study, inspections carried out on the dates of 15.04.2013 and 27.08.2015 after the unplanned maintenance activities, were not taken into consideration for the evaluation of the results so as to eliminate the initial effects of track renewal and track maintenance. Graphs of the standard deviation of alignment parameter obtained from the measurements carried out before the track renewal are given in

figure 3 and 4. Standard deviation of the alignment parameter before the track renewal was studied by linear and exponential approaches.

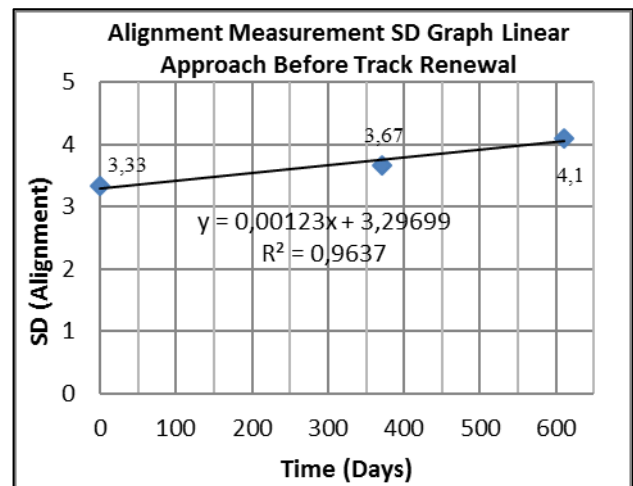


Figure 3. Alignment measurement-SD graph linear approach before track renewal

In the light of the present study, approximation models related to the deterioration of the track were developed with both linear and exponential approaches. Among these approximation models, exponential approach can be considered more

appropriate for the real track condition since having closer R2 value to 1. As a result of this it can be concluded that the track deterioration model has an exponential trend before the track renewal which had a low initial track quality.

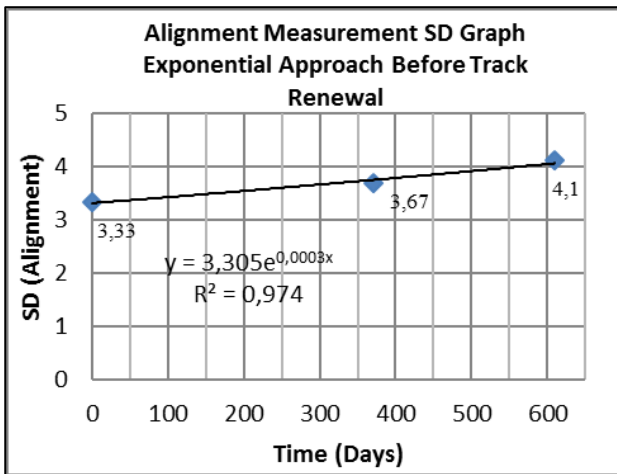


Figure 4. Alignment measurement-SD graph exponential approach before track renewal

In the same way, alignment parameter obtained from the measurements carried out after the track renewal was studied in order to develop an approximation model to monitor the rate of the track deterioration after the track renewal performed. As stated above, approximation models related to the deterioration of the track were developed with both linear and exponential approaches. Obtained graphs are presented in figure 5 and 6. Unlike the first case, since having closer R2 value to 1, this time linear approach can be considered more appropriate for the real track condition after the track renewal. Contrary to the previous situation it can be concluded that the track deterioration model has a linear trend after the track renewal, which had a high initial track quality.

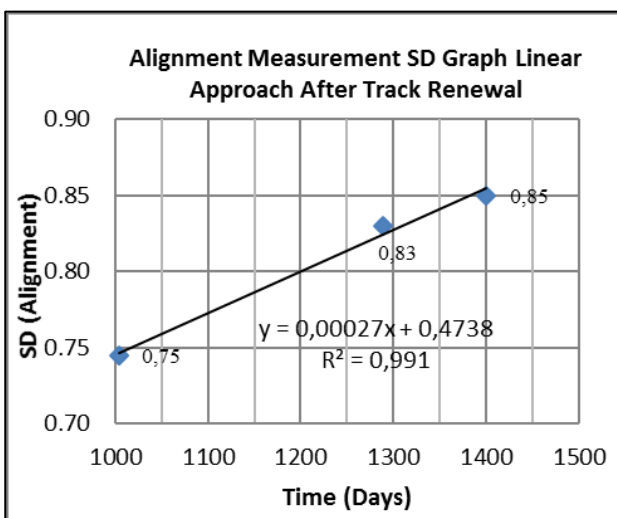


Figure 5. Alignment measurement-SD graph linear approach after track renewal

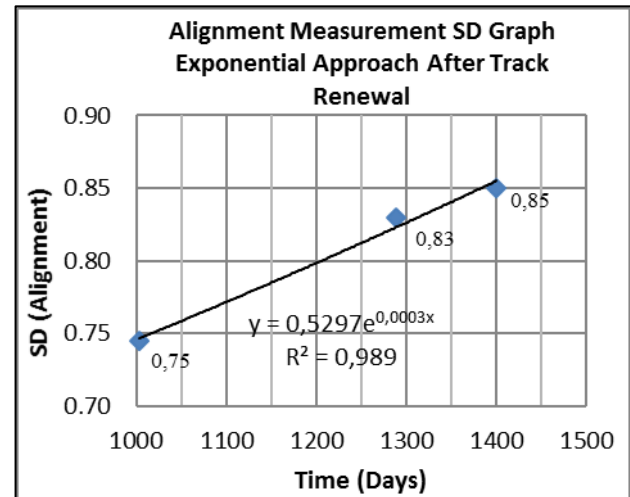


Figure 6. Alignment measurement-SD graph exponential approach after track renewal

As a result of the above conclusions;

- Average deterioration rates on the track having a low initial track quality before the track renewal were determined within the stated period (610 days) by the help of exponential approaches.
- Average deterioration rates on the track having a high initial track quality after the track renewal were determined within the stated period (396 days) by the help of linear approaches.
- In order to eliminate the initial effects of unplanned track maintenances performed, the duration between those period were not taken into consideration.

As summarized by Sasidharan et al. (2020), exponential (Quiroga and Schnieder 2011) and linear (Soleimanmeigouni, Ahmadi and Kumar 2018) are the two of the track deterioration models used in the literature. Using the mentioned models and according to the results obtained deterioration rates of the track before and after the renewal can be summarized at table 4.

Table 4. Deterioration rates of the track before and after renewal

Deterioration Rate Before Renewal		Deterioration Rate After Renewal	
(0 – 610 Days)		(1004 – 1400 Days)	
Exponential ($y = \alpha \cdot e^{\beta x}$)		Linear ($y = \alpha + \beta x$)	
α	β	α	β
3,33	0,0003	0,468	0,00028
3,09	0,0005	0,598	0,00018
3,33	0,0003	0,496	0,00025
Avg. $\beta = 0,000367$		Avg. $\beta = 0,000237$	

As can be seen above on the table, before the renewal (within 610 days from the first measurement date) average track deterioration rate (β) was computed 0.000367 mm / 100 day. On the other hand, after the renewal (within 400 days from the first measurement date) average track deterioration rate (β) was computed 0.000237 mm / 100 day.

3.2 Evaluation of the Track Geometry Quality with Quality Indices

In this paper, apart from the evaluating the track quality with the standard deviation at the previous section, the track quality also investigated with the track quality indices concepts according to Krab software. The measurements recorded on the dates 11.12.2012 and 09.01.2014 between Alayunt-Çöğürler railway stations (Km 67+700 – 70+000) evaluated. The quality indices obtained from the software given in figure 7. and 8. Before the track renewal performed as it can be seen in figure 7. alignment, cant, longitudinal level and track gauge parameters were in Immediate Action Limit (IAL) (in red colour) and Intervention Limit (IL) (in violet colour) according to color scale given at the table 3.

80<v<120 Km/h Km	Horizontal				Vertical				Overall Quality Index (OQI)	Tamping Index (TI)
	Alignment		Gauge		Cant		Longitudinal Level			
	SD	QI	SD	QI	SD	QI	SD	QI		
67+750 - 67+800	2,16	4,43	1,27	2,83	1,02	2,27	3,08	3,82	3,59	4,32
67+800 - 68+000	1,82	3,90	1,55	3,49	1,35	2,97	1,47	2,07	3,53	3,71
68+000 - 68+200	0,91	1,97	1,12	2,43	1,24	2,74	1,68	2,35	2,23	2,25
68+200 - 68+400	1,36	3,01	1,09	2,35	1,03	2,30	0,84	1,18	2,46	2,74
68+400 - 68+600	1,14	2,51	1,19	2,60	1,18	2,63	0,89	1,25	2,25	2,21
68+600 - 68+800	1,08	2,38	1,42	3,19	0,75	1,62	0,91	1,28	2,41	2,07
68+800 - 69+000	1,26	2,79	1,48	3,34	2,08	4,21	2,00	2,74	3,24	3,24
69+000 - 69+200	3,87	5,72	1,38	3,08	1,99	4,09	1,27	1,79	4,59	5,83
69+200 - 69+400	7,05	6,00	1,08	2,32	1,52	3,31	1,51	2,13	4,42	6,00
69+400 - 69+600	8,28	6,00	1,30	2,89	1,87	3,90	1,47	2,07	4,69	6,00
69+600 - 69+800	6,80	5,99	1,13	2,46	1,57	3,40	1,30	1,84	4,49	6,00
69+800 - 70+000	13,48	6,00	1,97	4,35	1,64	3,53	1,91	2,63	5,37	6,00

Figure 7. Standard deviation (STD) and quality indices (QI, OQI) values before the track renewal on the date 11.12.2012 (İça 2015).

Overall Quality Index (OQI), being the sum of these four track geometry parameters, was in Immediate

Action Limit (IAL) and Intervention Limit (IL) in certain track sections. According to the Overall Quality Index (OQI) track segment needed an immediate maintenance action between Km 69+000 and 70+000 indicated in red color. As stated at the standard deviation method at previous section, Overall Quality Index (OQI) by itself can indicate the real condition of the track, likewise standard deviation of horizontal-alignment defects. By the help of the OQI, the quality and the condition of the track can be determined directly.

As can be seen in figure 7, since the track renewal performed in 1989 until the measurement date (11/12/2012), longitudinal level parameter had less degradation when compared to other parameters. Accordingly, it may be inferred that the degradation rates of the track geometry parameters over time appears to be different for all parameters. For instance, while degradation is rapid at cant and alignment parameters, longitudinal level parameter is having a slow degradation according to the measurements.

80<v<120 Km/h Km	Horizontal				Vertical				Overall Quality Index (OQI)	Tamping Index (TI)
	Alignment		Gauge		Cant		Longitudinal Level			
	SD	QI	SD	QI	SD	QI	SD	QI		
67+750 - 67+800	0,69	1,40	0,52	0,83	1,04	2,30	0,90	1,27	1,48	1,48
67+800 - 68+000	1,04	2,26	1,22	2,70	0,95	2,09	1,25	1,78	2,13	1,96
68+000 - 68+200	1,48	3,26	0,55	0,91	0,81	1,77	1,74	2,42	2,01	3,00
68+200 - 68+400	0,61	1,21	0,49	0,78	0,93	2,06	1,42	2,00	1,72	1,72
68+400 - 68+600	1,30	2,89	0,63	1,11	1,14	2,53	1,22	1,72	1,87	2,60
68+600 - 68+800	0,39	0,67	0,53	0,86	0,89	1,97	1,49	2,09	1,72	1,72
68+800 - 69+000	0,59	1,15	0,60	1,04	1,31	2,89	1,99	2,73	2,52	2,52
69+000 - 69+200	0,77	1,62	0,67	1,23	0,88	1,93	1,45	2,05	1,68	1,68
69+200 - 69+400	0,58	1,13	0,55	0,91	0,94	2,08	1,51	2,12	1,79	1,79
69+400 - 69+600	0,43	0,77	0,46	0,69	0,91	2,00	1,92	2,64	2,01	2,01
69+600 - 69+800	0,58	1,13	0,49	0,78	1,02	2,26	1,79	2,49	2,07	2,07
69+800 - 70+000	0,51	0,97	0,52	0,84	0,52	1,08	1,32	1,88	1,18	1,18

Figure 8. Standard deviation (STD) and quality indices (QI, OQI) values after the track renewal on the date 09.01.2014 (İça 2015).

Analysis obtained from the inspections performed on the track has the similar results with the studies carried by Khouy *et al.* (2012) on the Swedish heavy haul railroad. According to the analysis performed by Khouy *et al.* (2012), the longitudinal level failure rate has a clear linear trend over time while the rates of failures for other parameters (cant,

alignment and twist) increases over time, possibly indicating an aging effect.

The positive effects of the track renewal performed can be directly seen when the measurements recorded after the renewal on the same track segment examined. After the renewal, IAL and IL alerts at this part of the track have turned into AL with the green color. As can be seen in figure 8, there is only alignment defect between Km 68+000 – 68+200 with intervention limit and tamping index (TI) alert is available at the same section in order to repair the indicated alignment defect.

Two years later after the track renewal, a new measurement is performed on 09.02.2015 at the same track section. Evaluation of the measurement recorded is given in figure 9. When compared the two evaluations given in figure 7. and 8., it can be reached that deteriorations on the track remained minimum between Km. 67+700 – 70+000. As can be seen in figure 9., alignment defect at Km 68+000 – 68+200 still exists and cant parameter has IL alert level between Km. 68+200 - 68+600 in this two years period. When compared the two evaluations given in figure 7. and 8., it can be reached that deteriorations on the track remained minimum between Km. 67+700 – 70+000. Since having high initial track quality, track geometry parameters have not been affected notably except these two defects.

As it is understood, having high initial track quality preserves the quality of the track much longer and takes more time to reach the limits for deteriorations (Sato 1997). The initial track quality has increased significantly with the high quality materials, track maintenance equipment and machines used at the track renewal. It can be referred that high initial quality of track enabled it to keep the standards of track under 9 million tonnes of freight carried in about two years’ time.

4. Discussion and Conclusion

The importance of repair, maintenance and optimization concepts has grown in recent years with the rapidly developing high-speed rail network in the world. The first priority of the maintenance and repair concept is to keep the quality of track geometry quality within the existing standards. Therefore, in this paper the five geometric variables (alignment, cant, longitudinal level, track gauge and twist) effecting the track geometry quality discussed in accordance with the standard EN:13848-5 used by TCDD. Track geometry defects, improvements, degradations, degradation trends and overall quality of the track investigated through the measurements at the Kütahya-Afyonkarahisar railway line by the help of track geometry measuring devices using the standard deviation and quality indices approaches.

According to the measurements performed on the track, as mentioned at the study of Andrade and Teixeira (2013), the standard deviation of horizontal-alignment defects is showed to be a statistically significant predictor for all maximum permissible speed groups and for the three quality levels (AL – alert limit, IL – intervention limit and IAL – immediate action limit). Therefore, degradation trends on the track were determined using the approximation models by the help of standard deviation of horizontal-alignment defects.

The average degradation rate of track within the 610 days from the first measurement date is computed (β) 0.000367 mm/100 days. On the other hand, the average degradation rate of track within the 396 days from the date of first measurement after the track renewal is calculated 0.000237 mm/100 days. Accordingly, the rate of deterioration

80<V<120 Km/h	Horizontal				Vertical				Overall Quality Index (OQI)	Tamping Index (TI)
	Alignment		Gauge		Cant		Longitudinal Level			
	SD	QI	SD	QI	SD	QI	SD	QI		
Km										
67+750 - 67+800	1,32	2,92	0,59	1,01	1,28	2,84	2,17	2,93	2,60	2,64
67+800 - 68+000	0,68	1,37	0,60	1,05	0,74	1,59	1,33	1,88	1,43	1,43
68+000 - 68+200	1,60	3,50	0,67	1,22	1,07	2,38	1,94	2,67	2,29	3,27
68+200 - 68+400	0,61	1,20	0,60	1,03	1,76	3,74	1,66	2,32	2,75	2,75
68+400 - 68+600	0,95	2,04	0,60	1,03	1,75	3,71	1,56	2,19	2,67	2,67
68+600 - 68+800	0,72	1,49	0,57	0,97	0,72	1,56	1,35	1,91	1,43	1,43
68+800 - 69+000	0,98	2,13	0,53	0,88	1,05	2,32	0,89	1,25	1,48	1,82
69+000 - 69+200	1,26	2,78	0,49	0,78	0,93	2,07	1,62	2,27	1,86	2,49
69+200 - 69+400	0,43	0,77	0,47	0,73	0,72	1,55	1,47	2,08	1,51	1,51
69+400 - 69+600	0,52	0,98	0,50	0,80	0,91	2,00	2,11	2,86	2,13	2,13
69+600 - 69+800	0,64	1,29	0,52	0,85	0,68	1,44	1,68	2,35	1,59	1,59
69+800 - 70+000	0,54	1,03	0,56	0,93	0,68	1,46	1,28	1,81	1,34	1,34

Figure 9. Standard deviation (STD) and quality indices (QI, OQI) values after the track renewal on the date 09.02.2015 (İça 2015).

of the track before the track renewal having low initial track quality can be evaluated as exponential, whereas the rate of deterioration of the track after the track renewal having high initial track quality can be defined as linear.

Moreover, track geometry parameters and overall track quality index (OQI) were determined using the software of the krab track geometry measuring trolley. The positive effects of the track renewal performed were directly presented by the improved quality of the track and quality index values measured. After the track renewal performed, significant improvements determined in overall quality of the track and in all track geometry parameters respectively. Track geometry parameters being at the Immediate Action Limit (IAL) level before track renewal, were observed to be even below the Alert Limit (AL) after the track renewal performed. Track geometry parameters in deterioration trends determined after track renewal in two years period. In this two years period approximately 4.5 million tons/year freight is carried on the line and according to the measurements performed, freight carried led to further deterioration especially on the horizontal-alignment and cant parameters.

In the light of this study it can be reached that initial track quality is a significant factor for determining the quality of the track as both at the quality index method and at the standard deviation method. Moreover, it can be concluded that track deterioration rate may develop linear or exponential depending on the initial track quality. In this study it can be seen that generally track deterioration rate grows linearly and deformations remain at a certain level since having low operating speeds on Kütahya - Afyonkarahisar conventional line. Limits of the standard are tolerable for the track geometry defects at low operating speeds. Therefore, regular inspection of the track is crucial for the quality, safety and efficiency of the line at high-speed railway lines. Considering the deterioration of the track to progress exponentially at high operating speeds, even the minor track geometry defects on the alert limit should be carefully examined. Under available budget constraints the optimum maintenance policy should

be pursued in order to provide high levels of quality, safety, comfort and efficiency.

Acknowledgement

The authors acknowledge the infrastructure and support of the Turkish State Railways (TCDD) 71. Directorate Track Maintenance and Repair Office staff for providing the mpv-7 and krab data, krab trolley, Krab8vNET software and also allowing data measurement at the line. Besides, the authors also would like to thank Mechanical Engineer Kotajny P. from Commercial Railway Research Ltd. (KZV Spol. s.r.o.) for the technical support about the krab trolley as the technical manager.

5. References

- Andrade, A. R. and Teixeira, P.F., 2014. Unplanned-Maintenance Needs Related To Rail Track Geometry. *Proceedings of the Institution of Civil Engineer-Transport*, **167(6)**, 400-410.
- Berawi, A.B., 2013. Improving Railway Track Maintenance Using Power Spectral Density (PSD). Doctoral Thesis, Faculdade De Engenharia Universidade Do Porto, Portugal, 260.
- CEN, 2008. EN 13848:2008 Railway applications - Track - Track geometry quality - part 5: Geometric quality levels, European Committee For Standardization, Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels, 7-18.
- El-Sibaie, M. and Zhang, Y., 2004. Objective track quality indices. *Transportation Research Record*, **1863(1)**, 81-87.
- Izvolta, L. And Smalo, M., 2015. Assessment of the track geometry quality from the aspect of safe and reliable operation of the railway track. *Procedia Engineering*, **111**, 344-350.
- İça, S., 2015. The investigation of the railway track geometry defects and suggested solutions: case study of Kütahya-Afyon Railway Line, Master of Science Thesis, Kütahya Dumlupınar University Institute Of Science Studies, Kütahya, 128.
- Khouy, I.A., Juntti, U., Nissen, A. and Schunnesson, H., 2012. Evaluation of track geometry degradation in Swedish heavy haul railroad - A Case Study. *International Journal of COMADEM*, **15(1)**, 11-16.
- Komerční železniční výzkum s.r.o. (KZV), 2002. Krab 8.1 Evaluation Software Manual Theoretical Overview,

Komerční železniční výzkum s.r.o. ul. U kapličky,
Praha, Czech Republic,10-31.

Lasisi, A., Attoh-Okine, N., 2019. An Unsupervised Learning Framework for Track Quality Index and Safety. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, **7**, 1-12.

Quiroga, L.M., Schnieder, E., 2011. Monte Carlo simulation of railway track geometry deterioration and restoration. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers - Part O: Journal of Risk and Reliability, **226**, 274–282.

Sasidharan, M., Burrow, M.P.N., Ghataora, G.S., 2020. A whole life cycle approach under uncertainty for economically justifiable ballasted railway track maintenance. *Research in Transportation Economics*, **80**.

Sato, Y., Conference Paper: Optimum Track Structure Considering Track Deterioration in Ballasted Track, Proceedings Sixth International Heavy Haul Railway Conference, Cape Town, South Africa, 6-10 April 1997.

Sharma, S., Cui, Y., He, Q., Mohammadi, R., Li, Z., 2018. Data-driven optimization of Railway maintenance for track geometry. *Transport, Research Part C*, **90**, 34–58.

Soleimanmeigouni, I., Ahmadi, A., Kumar, U. 2018. Track geometry degradation and maintenance modelling: A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers - Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, **232(1)**, 73–102.

Tacıroğlu, M.V., Karaşahin, M., Tığdemir, M., Işıker, H., 2020. Fractal analysis of high speed rail geometry data: A case study of Ankara-Eskişehir high speed rail. *Measurement*, **165**.

Zhao, J., Chan A.H.C., Stirling A.B. and Madelin K.B., 2006. Optimizing policies of railway ballast tamping and renewal. *Transportation Research Record*, **1943(1)**, 50–56.

Internet Sources

1-<https://www.bbc.com/turkce/haberler-turkiye-46551115>, (02.02.2020)

2- <https://i2.wp.com/rayhaber.com/wp-content/uploads/2019/02/tcdd-demiryollari-haritasi-2019-guncel.jpg?ssl=1>, (07.10.2020)

AKÜ FEMÜBİD 20 (2020) 065701 (1079-1084)

AKU J. Sci. Eng. 20 (2020) 065701 (1079-1084)

DOI: 10.35414/akufemubid.789007

Araştırma Makalesi / Research Article

Synthesis and Characterization of Silica and Carbon Aerogels from Hemp Fiber via freeze-drying Process

Alime ÇITAK

Eskisehir Osmangazi University, Department of Chemical Engineering, Eskisehir, TURKEY

e-posta: acitak@ogu.edu.tr. ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-3143-6646>

Geliş Tarihi: 01.09.2020

Kabul Tarihi: 12.12.2020

Abstract

In this study, it was aimed to synthesize and characterize cellulose based silica carbon aerogel by sol-gel method. Pooled and hand-peeled hemp fibers were used as the source of cellulose at the time of October-2018 harvest in Vezir Köprü, Samsun province. Hemp fiber containing crude cellulose was mechanically made into cellulose pulp. Then, Silica aerogel (SA) sample was synthesized by Sol-gel method and subsequent freeze-drying process. Finally, the synthesized SA sample was kept in a tube oven at a heating rate of 5 °C/min under a nitrogen flow of 120 ml/min for 2 hours at 500 °C to obtain cellulose-based carbon aerogel (SCA). Synthesized samples; Scanning Electron Microscopy (SEM), Energy dispersive spectrometer (EDS), Surface analysis measurement (BET), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), X-ray diffraction method (XRD) and electrical conductivity analyzes were performed. As a result of electrical conductivity analysis, the electrical resistances of the silica aerogels was found to be very high. It was interpreted that the synthesized samples could be used as an insulator.

Keywords

Aerogel; Carbon aerogel; Freeze-drying; Hemp fiber; Sol-gel method

Öz

Bu çalışmada selüloz esaslı silika karbon aerogelin sol-jel yöntemi ile sentezlenmesi ve karakterize edilmesi amaçlanmıştır. Samsun ili Vezir Köprü'de Ekim-2018 hasadı sırasında toplanmış ve elle soyulmuş kenevir lifleri selüloz kaynağı olarak kullanılmıştır. Ham selüloz içeren kenevir lifi, mekanik olarak selüloz hamuru haline getirildi. Daha sonra Silika aerogel (SA) numunesi Sol-gel yöntemi ve ardından dondurularak kurutma işlemi ile sentezlendi. Son olarak, sentezlenen SA numunesi, selüloz esaslı karbon aerogel (SCA) elde etmek için 500 ° C'de 2 saat boyunca 120 ml / dakika azot akışı altında 5 °C / dakika ısıtma hızında bir tüp fırınında tutuldu. Sentezlenmiş örnekler; Taramalı Elektron Mikroskopisi (SEM), Enerji dağılım spektrometresi (EDS), Yüzey analizi ölçümü (BET), Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (F-TIR), X ışını kırınım yöntemi (XRD) ve elektriksel iletkenlik analizleri yapıldı. Elektriksel iletkenlik analizi sonucunda silika aerogellerin elektrik dirençleri çok yüksek bulunmuştur. Sentezlenen numunelerin bir izolatör olarak kullanılabileceği yorumlandı.

Anahtar kelimeler

Aerogel; Karbon aerogel; Dondurarak kurutma; Kenevir lifi; Sol-gel yöntemi

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Introduction

Aerogels are porous and low density solids and because of the excess air in the pores of the material (88% to 99.8% porosity), it gives aerogels to be light weight properties like air due to excess air in the pores of the material (Hajizadeh *et al.* 2015).

Silica aerogel alone has less use due to its poor mechanical strength. Several methods have been used to improve the mechanical properties of silica aerogels. Shafi *et al.* 2019 investigated the effects of the added silica gel on the thermal conductivity and mechanical strength. Thus, they found that the composite not only had stronger mechanical

strength but also gave ultra-low thermal conductivity (Shafi *et al.* 2019).

Cellulose-based carbon aerogels (SCA) have many uses and are environmentally friendly materials due to their high surface area and pore structure controllability. SCA stands out for its renewable and sustainable production, low thermal and electrical conductivity, and high mechanical properties. Due to its thermal conductivity, it is used in building construction and insulation, solar panels, automobiles and space vehicles. The fact that cellulose in this material is extremely abundant and sustainable shows its applicability for large-scale industrial applications (Pircher *et al.* 2015). In addition, the development of super hydrophobic materials has been made by treating the synthesized cellulose nanofiber aerogels with titanium dioxide nanoparticles and silanes to be used as the separation medium for oil adsorbents or oil / water mixtures (Ciftci *et al.* 2017; Cervin *et al.* 2012).

Wang *et al.* fabricated spherical cellulose aerogels via supercritical CO₂ drying technology. Also, they determined the physical properties of the materials (i.e., shrink-age, specific surface area, thermal degradation, and micro-structure), such as a weak shrinkage of 4.03%, a specific surface area of up to 353 m²/g, and an average pore size of 8.86 nm (Wang *et al.* 2016)

Zhang *et al.* (2019) showed that hydrophobic porous carbon-200 aerogel (SHPC-200 aerogel) is a cost-effective raw material and can be easily produced in industry on a large scale. In particular, the authors stated that there is an aerogel that can be applied to less contaminated oil spill and wastewater pollution (Zhang *et al.* 2019).

Nguyen *et al.* (2013) investigated the use of aerogels made of paper waste cellulose fibers as absorbent materials to remove crude oil spills. In their work, they tested cellulose aerogels synthesized from paper waste cellulose fibers to remove different crude oils and found that they exhibit high absorption capacity (Nguyen *et al.* 2013).

Neugebaue *et al.* (2014) synthesized compressed granular aerogels in a sandwich panel with three-dimensional lattice core designed for insulation of walls due to low thermal conductivity (Neugebauer *et al.* 2014).

In this paper, the results of electrical conductivity measurements performed on the silica and cellulose-based carbon aerogels are reported.

2. Material and Method

Hemp fibers consisting of raw cellulose with 1-2% lignin content, pooled and peeled by hand, were used as cellulose raw material during the harvest period of Vezir Köprü district of Samsun province in October-2018.

2.1. Cellulose pulp production by mechanical method

10 grams of hemp fiber were added and soaked with water at a ratio of 1: 100 and boiled in a pressure cooker for 3 hours. The softened fibers were then forged for half an hour. This procedure was repeated three times.

2.2. Synthesis of cellulose based silica aerogel by sol-gel method

Synthesis of silica aerogel by Sol-Gel method using hemp fiber cellulose pulp was performed as follows. First, 0.2 g of the raw material was added to the mixture of 320 ml ethanol and 80 ml deionized water (DI). While the resulting solution was mixed homogeneously, 12 ml of NH₃H₂O (Ammonium hydroxide) was slowly added to the solution. The resulting mixture was stirred on magnetic stirrer for 1 day and then transferred to a glass flask and then stirred at room temperature for 5 hours. Then, 1.2 ml TEOS (tetraethyl orthosilicate) was added dropwise to the mixture and stirred continuously at 400 rpm for 18 hours. After the resulting mixture was washed several times with DI water and ethanol, the mixture was homogenized with 50 mL of anhydrous ethanol. The sample was converted to silica aerogel by freeze-drying for 120 hours at a vacuum pressure of 0.027 mbar and a temperature of -52.6 °C (Yuan *et al.* 2018).

2.3. Carbon aerogel synthesis

The silica aerogel synthesized was heated to 500 °C under a nitrogen flow of 120 ml / min at a heating rate of 5 °C per minute in the MSE Furnace and held at 500 °C for 1 hour. Silica carbon aerogel (SCA) was obtained after pyrolysis was completed (Yuan *et al.* 2018).

3. Results and Discussion

3.1 Characterizations of the aerogels

Characterizations were performed on cellulose-based silica aerogel and cellulose-based silica carbon aerogel. The bulk density of the nanostructure was classically calculated. The potentiostatic impedance measurements (EIS) were performed within the scope of synthesized SA and SCA characterization studies.

FTIR spectrum was collected by Perkin Elmer Spectrum Two FTIR spectrometer with KBr technique in the range from 400 to 4000 cm^{-1} . The obtained FTIR spectra are given in Fig. 1.

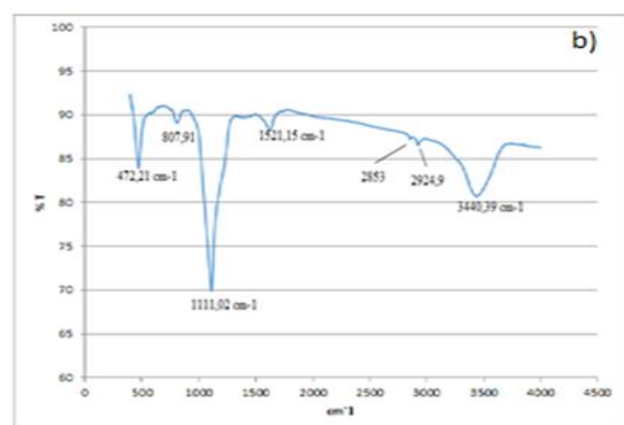
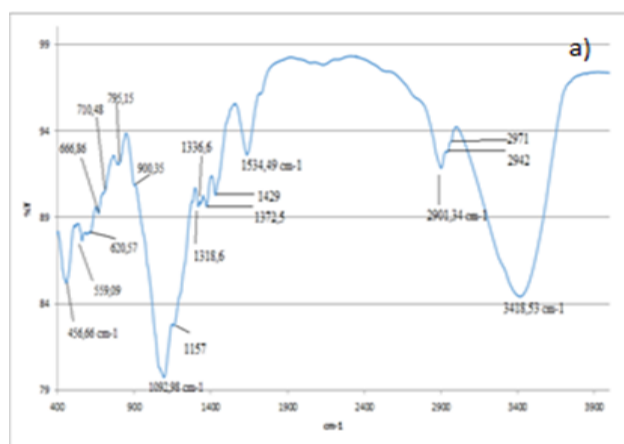


Figure 1. FTIR spectra of aerogels
a) SA b) SCA

The structural changes in the samples prepared for each different condition from the spectra were determined by the peaks given by the functional groups.

Silica aerogels have been shown to exhibit a spectrum similar to literature. Figure 1 shows the FTIR spectrum of the aerogel obtained. When this spectrum is examined, there is the O-H functional group at the center of 3418 cm^{-1} , CH_3 at the center of 2901 cm^{-1} , C = C at the center of 1634 cm^{-1} and the C-H tension vibration at the center of 1372 cm^{-1} , respectively. Si-O voltage vibrations asymmetric band was seen at 1093 cm^{-1} . This indicates the presence of SiO_2 . The O-Si symmetric band is 804 cm^{-1} , the Si-O-Si mesh band is 471 cm^{-1} and the -OH absorption band is 3440 cm^{-1} /1630 cm^{-1} . The presence of the crystal structure also shows that the fiber retains its crystal structure with the peak in the absorption band at 1429 cm^{-1} (Yuan *et al.* 2018; Zhang *et al.* 2005).

Compared to the spectrum of cellulose-based silica carbon aerogel, after the carbonization process of silica aerogel, the intensity of the O-H functional group at 3440 cm^{-1} and the C-H functional group at 2901 cm^{-1} is seen to be significantly weakened.

Crystal and amorphous structure of SA and SCA samples were analyzed by Panalytical MPYRA brand XRD and recorded in range of diffraction angle 2θ from 0° to 70° (Fig. 2). When looking at Figure 2a, It shows that a broad peak at $2\theta = 12^\circ - 30^\circ$ in the XRD patterns of the cellulose-based silica aerogel corresponds to the amorphous peak of SiO_2 (Yuan *et al.*, 2018). Also, it can be seen that the corresponding peak of SiO_2 can be covered by the two peaks at $2\theta = 15^\circ$ and 25° , corresponding to the (110) and (200) planes of the crystal structure of cellulose (Zhang *et al.*, 2019).

When Figure 2b is examined for cellulose-based silica carbon aerogel, it is seen that the peak at 15° has disappeared and the peak at 25° has become weaker. The wide peak (between 15° and 30°) of carbon aerogel obtained after pyrolysis shows the disappearance of the crystal structure and the

presence of amorphous structure. As a results, it can be seen that the cellulose-based silica carbon aerogel still retained their amorphous structure, and no crystalline structure could be detected (Yuan et al., 2018). These results demonstrated that the successful preparation of SA and SCA aerogels via using the Hemp fibers as raw materials by the freeze-drying/ pyrolysis process.

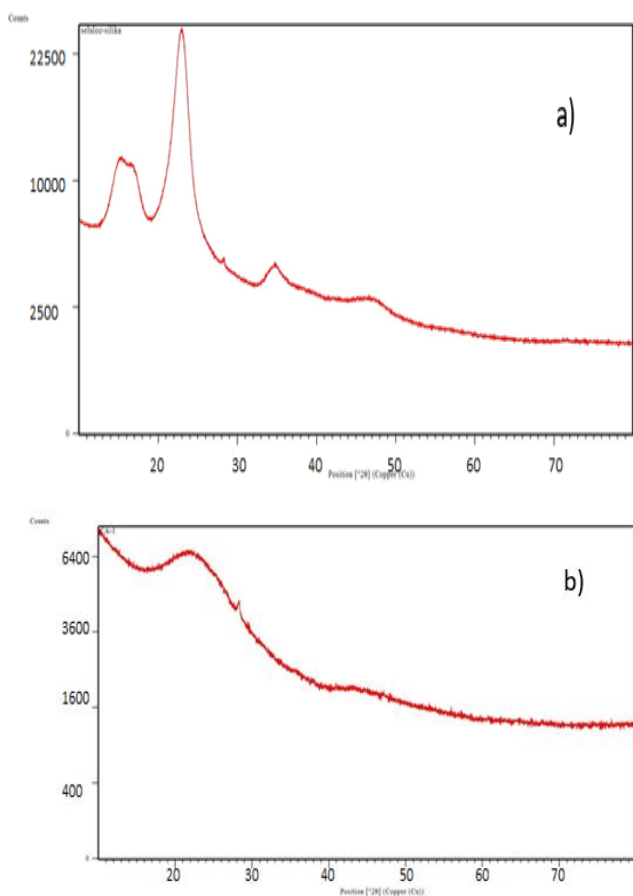


Figure 2. XRD spectra of aerogels a) SA b) SCA

SEM was used to analyze the surface morphology of nano-cellulose aerogels. Images were taken at 100 μm using a JEOL brand JSM 5600 scanning electron microscope (JSM-5600, JEOL, Japan). The SEM results are presented in Fig. 3. As shown in Fig. 3b, after prolysis, it was found that the SCA retained the structure and contained more pores and as a result increased total pore volume (0.244 ml/g).

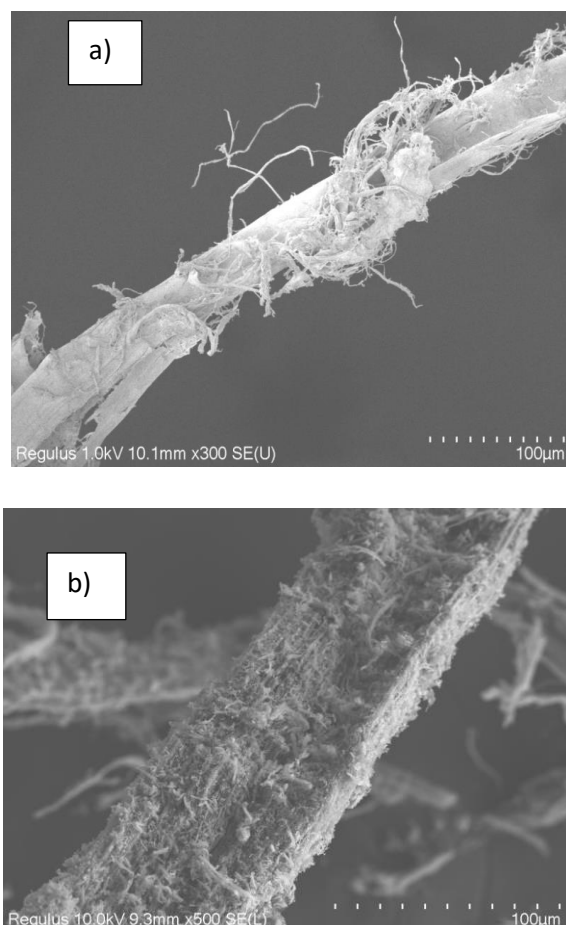


Figure 3. SEM images of aerogels a) SA b) SCA

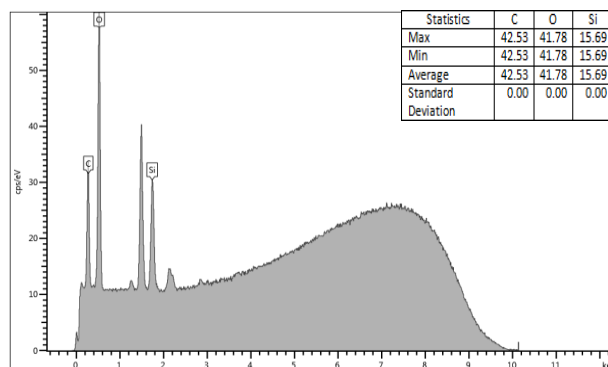


Figure 4. EDS analyse aerogel of Silica

As a result of EDS analysis of SA sample (Fig. 4) it was found that Si (15.69%) was added to the structure and the amount of C (42.53%) is in the result of the presence of cellulose based raw material (hemp fiber). With the addition of 1.2 ml TEOS, it is seen that the structure is compatible with approximately 15.16% Si in the calculation.

Density determination by weight:

The volume of the synthesized material was calculated as a result of the data. The density of the cellulose-based silica aerogel was calculated using the amount of mass. As a result the density of the synthesized SA material was determined to be 0.007 g/cm³ (close to the range given in the literature) (Fu et al., 2016).

N₂ sorption method:

Multi-point BET surface area of SA and SCA samples was determined using adsorption device (Quantachrome, Autosorb-1C) at 77 K by nitrogen adsorption-desorption measurements. The pore size distribution was calculated using the Barrett-Joyner-Halenda (BJH) formula. The samples of SA and SCA were degassed under vacuum at 100 °C and 200 °C respectively for 12 h prior to analysis. According to BET analysis, the specific surface area and total pore volume of the SA and SCA samples was determined 12 m²/g ve 0.0279 ml/g; 102.85 m²/g ve 0.244 ml/g, respectively (Zhang et al., 2019; He et al., 2017).

Electrical measurements:

The potentiostatic impedance measurements (EIS) were carried out by applying electrical frequency from 1 to 1x10⁶ Hz and operating voltage of 10 V at room temperature. The results of electrical resistance analysis for SA and SCA applied in Gamry ZRA Reference 3000 were given Fig. 5. The dependence of electrical resistance on applied frequency for two aerogels at 25 °C shows that the resistance increased greatly with decreasing frequency between 1 MHz and 1 kHz, and the resistance rise became less with frequency drop from 1 kHz to 1 Hz. Aerogels appear to have low resistance in this range (Huang, L., 2012).

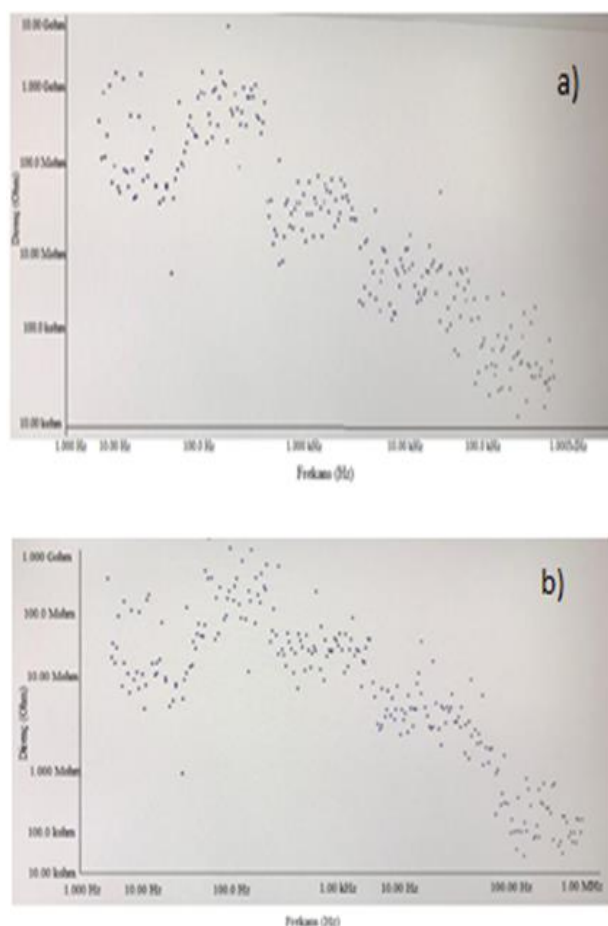


Figure 5. Electrical resistances of aerogels as functions of frequency, measured at 25 °C a) SA b) SCA

4. Conclusion

In this study, cellulose based silica aerogel (SA) was synthesized by sol-gel method by using pooled and hand-peeled hemp fiber containing 98% crude cellulose as starting material. The resulting silica aerogel was converted to carbon aerogel (SCA) by pyrolysis. The total surface area of the synthesized SA was found to be 12 m²/g. After pyrolysis, it was shown that the surface area of SCA increased to 102.85 m²/g. The morphology of the aerogel was observed under SEM and silica aerogel converted to carbon aerogel (SCA) by pyrolysis had more porosity compared to cellulose aerogel prepared by freeze-drying. In addition, as a result of electrical conductivity analysis, the electrical resistance of both aerogels was found to be too high (approximately 10 Gohm). Huang (2012) showed that silica aerogel has the lowest thermal conductivity value with 0.0144 W/mK and

accordingly it has the highest thermal resistance (Huang, L., 2012). As a result, it makes silica aerogels a good choice for energy saving and insulation in the building industry. It is seen that the aerogels in this study may be appealing. Thus, it was interpreted that these aerogels could be used as an insulator.

Compliance with ethical standards

Conflict of interest The corresponding author declares that there is no conflict of interest.

5. References

- Cervin N.T., Aulin C., Larsson P.T., Wågberg L., 2012. Ultra porous nanocellulose aerogels as separation medium for mixtures of oil/water liquids. *Cellulose*, **19**, 401–410.
- Ciftci D., Ubeyitogullari A., Huerta R.R., Ciftci O.N., Flores R.A., Saldaña M.D.A., 2017. Lupin hull cellulose nanofiber aerogel preparation by supercritical CO₂ and freeze drying. *The Journal of Supercritical Fluids*, **127**, 137–145.
- Fu J., Wang S., He C., Lu Z., Huang J., 2016. Facilitated fabrication of high strength silica aerogels using cellulose nanofibrils as scaffold. *Carbohydrate Polymers*, **147**, 89–96.
- Hajizadeh A., Bahramian A.R., Seifi A, Naseri I., 2015. Effect of initial sol concentration on the microstructure and morphology of carbon aerogels. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, **73**, 220–226.
- He S., Yang H., Chen X., 2017. Facile synthesis of highly porous silica aerogel granules and its burning behavior under radiation. *Journal of Sol-Gel Science and Technology* **82**, 407–416.
- Lang Huang, 30th May, 2012. Feasibility Study of Using Silica Aerogel as Insulation for Buildings, Master of Science Thesis, KTH School of Industrial Engineering and Management Energy Technology, Stockholm, 92.
- Nguyen S.T., Feng J., Le N.T., Le Ai.T.T., Hoang N., Tan V.B.C., Duong H.M., 2013. Cellulose Aerogel from Paper Waste for Crude Oil Spill Cleaning. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **52**, 18386–18391.
- Neugebauer A., Chen K., Tang A., Allgeier A., Glicksman L.R., Gibson L.J., 2014. Thermal conductivity and characterization of compacted, granular silica aerogel. *Energy and Buildings*, **79**, 47–57.
- Pircher N., Fischhuber D., Carbajal L., Strauß C., Nedelec J.M., Kasper C., Rosenau T., Liebner F., 2015. Preparation and Reinforcement of Dual-Porous Biocompatible Cellulose Scaffolds for Tissue Engineering. *Macromolecular Materials and Engineering*, **300**, 911–924.
- Shafi S., Navik R., Ding X., Zhao Y., 2019. Improved heat insulation and mechanical properties of silica aerogel/glass fiber composite by impregnating silica gel. *Journal of Non-Crystalline Solids*, **503–504**, 78–83.
- Wang X., Zhang Y., Jiang H., Song Y., Zhou Z., Zhao H., 2016. Fabrication and characterization of nanocellulose aerogels via supercritical CO₂ drying technology. *Materials Letters*, **183**, 179–182.
- Yuan D., Zhang T., Guo S., Qun F., Yang D., Ou Z., 2018. Geri Dönüşümlü Biyokütle Carbon, *Kimya Mühendisliği Dergisi*, **351**, 622–630.
- Zhang F., Meng Y., Gu Do., Yan Y., Chengzhong Yu., Tu B., Zhao D., 2005. A Facile Aqueous Route to Synthesize Highly Ordered Mesoporous Polymers and Carbon Frameworks with *1a3d* Bicontinuous Cubic Structure. *Journal of the American Chemical Society*, **127**, 13508–13509.
- Zhang T., Yuan D., Guo Q., Qiu F., Yang D., Ou Z., 2019. Preparation of a renewable biomass carbon aerogel reinforced with sisal for oil spillage clean-up: Inspired by green leaves to green Tofu. *Food and Bioproducts Processing*, **114**, 154–162.

Kale Havzasındaki (Denizli, GB-Türkiye) Kömür İçeren Mortuma Formasyonunun Mineralojik ve Jeokimyasal Özellikleri

Duygu ELÇİ¹, Tülay ALTAY^{2, *}

¹ Afyonkarahisar Ticaret ve Sanayi Odası, Afyonkarahisar

² Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar

*Sorumlu yazar e-posta: taltay@aku.edu.tr

e-posta: elciiduygu@gmail.com

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-3526-6717>

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-1011-9107>

Geliş Tarihi: 01.09.2020

Kabul Tarihi: 23.12.2020

Öz

Kale Havzası (Denizli/GB-Türkiye), KD-GB uzanımlı tektonik kontrollü bir havzadır. Havzanın batısında Menderes Masifi'ne ait metamorfik temel kayalar bulunurken, doğu ve güney bölümlerinde Mesozoyik yaşlı kireçtaşları ve Likya naplarına ait ofiyolitler yer alır. Kale Havzası'nı dolduran Oligosen yaşlı Mortuma formasyonuna ait istif, sığ-kıyı ortamını yansıtan çakıltaşları ile birlikte kaba kırıntılı tortullar ile başlayıp, üste doğru kumtaşı-çamurtaşı ve kıltaşı ile devam etmektedir. İnceleme alanında Türkiye Kömür İşletmeleri tarafından derinliği 426 m ile 780 m arasında değişen altı adet kömür araştırma sondajı yapılmıştır. İnceleme alanının kuzeyinde yapılan sondajlarda çamurtaşı ve kıltaşı içerisinde farklı seviyelerde 40-45 cm kalınlıkta siyahımsı ve parlak özellikte linyit damarları kesilmiştir. Diğer sondajlarda ise kalkerli çamurtaşı ve kıltaşıdan oluşan seviyelerde kalınlığı 1-3 cm arasında değişen kömür damarları gözlenmiştir. Sondajlar korele edildiğinde, inceleme alanının kuzeyinde havzanın daha sığ, enerjisinin daha düşük ve organik madde içeriğinin daha zengin olduğu, güneye doğru ani olarak derinleştiği belirlenmiştir. Havzada dolomit, kalsit, feldispat, kuvars ve kil mineralleri belirlenmiştir. Kil minerallerinden simektit, illit, klorit ve kaolinit tespit edilmiştir. ANT elementler HNT elementlere göre zenginleşme göstermektedir. Kil ve karbonat örneklerinin benzer bir NTE dağılımı göstermesi aynı kökenden kaynaklandığına işaret etmektedir. Örnekler Th/Co-La/Sc diyagramına göre asidik/felsik köken kayaç bölgesine düşmektedir.

Anahtar kelimeler

Mortuma Formasyonu;
Kil; Kömür; Kale
Havzası; Denizli;
GB-Türkiye.

Mineralogical and Geochemical Properties of Coal-Bearing Mortuma Formation in the Kale Basin, (Denizli, SW-Turkey)

Abstract

Kale Basin (Denizli/SW-Turkey) is a northeast-southwest trending tectonically controlled basin. While metamorphic basement rocks, belonged to the Menderes Massif are situated at the west of the basin, ophiolites which belong to Lycian nappes as well as Mesozoic limestones are located in the east and south. The sedimentary deposit of the Oligocene aged Mortuma formation which fill the Kale Basin begin with coarse clastic sediments accompanied by pebbles that reflect a shallow shoreline environment at the bottom and as goes further through upper layers, it contains sandstones-mudstones and claystone. Six coal exploration drillings with a depth of 426 m to 780 m were made by Turkish Coal Enterprise. In the north, 40-45 cm thick, blackish and shiny lignite veins were cut at different levels within mudstone and claystone in the drillings. In other drillings, coal veins 1- 3 cm thick have been observed in the calcareous mudstone and claystone. When the cores were correlated, it was determined that the basin was shallower, the energy was lower and the organic matter content was rich in the north of the study area and the sudden deepening of the basin towards the south. The minerals of dolomite, calcite, feldspar, quartz and clay have been determined. Smectite, illite, chlorite and kaolinite have been identified as clay minerals. HRE elements show enrichment according to LRE elements. A similar REE distribution of clay and carbonates indicates the same origin. According to Th / Co-La / Sc diagram, the samples fall to the acidic / felsic origin rock area.

Keywords

Mortuma Formation;
Clay; Coal; Kale Basin;
Denizli; SW-Turkey.

1. Giriş

Denizli-Kale Havzası, Batı Anadolu'da bulunan KD-GB uzanımlı bir havzadır (Şekil 1a ve b). Kale havzasını dolduran tortul istif alttan üste doğru, sığkırı ortamını yansıtan çakıltaşlarına eşlik eden kaba kırıntılı tortullar ile başlamakta olup, üste doğru sığneritik ortama ait kumtaşı-çamurtaşı ve marnlardan oluşan tortullarla devam etmektedir. Çamurtaşı ve marnlar içinde oldukça yaygın biçimde yaprak ve kömürleşmiş bitki kırıntılarının yanı sıra, özellikle yol yarmalarında kalınlığı 5-10 cm arasında değişen kömür damarları yer almaktadır. Bölgede TKİ (Türkiye Kömür İşletmeleri) Genel Müdürlüğü altı adet kömür araştırma sondajı yapmıştır. Sondajlarda çamurtaşı ve kilaşları içerisinde farklı seviyelerde kalınlıkları 45 cm ye kadar değişen kömür damarları kesilmiştir.

Bölgede daha önce yapılan çalışmalar havzanın jeolojik, sedimantolojik, paleontolojik ve tektonik evrimine yönelik yapılmıştır (Okay 1989, Savaşçın vd. 1990, Savaşçın ve Güleç 1990, Hasdiğen ve Bayhan 2003, İslamoğlu vd. 2006, Karadenizli vd. 2009, Akdeniz 2011, Şengüler ve Aydın 2017). Mortuma formasyonunun mineralojisi ve jeokimyası ile ilgili bir çalışma mevcut değildir. Bugüne kadar inceleme alanında mostra da yüzeysel çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmada elde edilen sondaj verilerine dayanılarak, çalışma alanının yer altı jeolojisinin ortaya çıkarılması için sondajların korelasyonu yapılmıştır. Çalışmanın amacı havzada TKİ tarafından kömür arama amaçlı yapılan derin sondajlarda tespit edilen sedimanter birimlerin yanal ve düşey dağılımlarını belirlemek; mineralojik ve jeokimyasal özelliklerini incelemektir.

2. Materyal ve Metot

İnceleme alanında çalışmanın amacına uygun olarak altı adet sondaj takip edilmiş ve örnekleme yapılmıştır (K-1 sondaj derinliği: 780.7m, K-2 sondaj derinliği: 553 m, K-3 sondaj derinliği: 426.4 m, K-4 sondaj derinliği: 555.6 m, K-5 sondaj derinliği: 654.8 m ve K-6 sondaj derinliği: 497.9 m) (Şekil 1b). Sondajların dikme kesitleri hazırlanmış ve birbirleri

ile korele edilmiştir. Arazi gözlemleri sonrası yürütülen laboratuvar çalışmalarında ilk olarak, seçilen numuneler kurutulduktan sonra XRD analizi için halkalı değirmen yardımı ile -100 µm boyutuna kadar öğütülmüştür. Örneklerin tüm kayaç mineralojik analizi Afyon Kocatepe Üniversitesinde TUAM laboratuvarında yapılmıştır ($2\theta=2^{\circ}-70^{\circ}$). X-ışınları çözümlenmeleri, Shimadzu 6000 model ve Bruker D8 Advance X-ışınları difraktometreleri kullanılarak yapılmıştır. Mineral tanımlamaları JCPDS (1993) kartlarından faydalanılarak yapılmıştır. Minerallerin % içerikleri kütle absorpsiyon katsayıları kullanılarak belirlenmiştir (Gündoğdu 1982). Bu metodun nispi doğruluğu ± 15 dir.

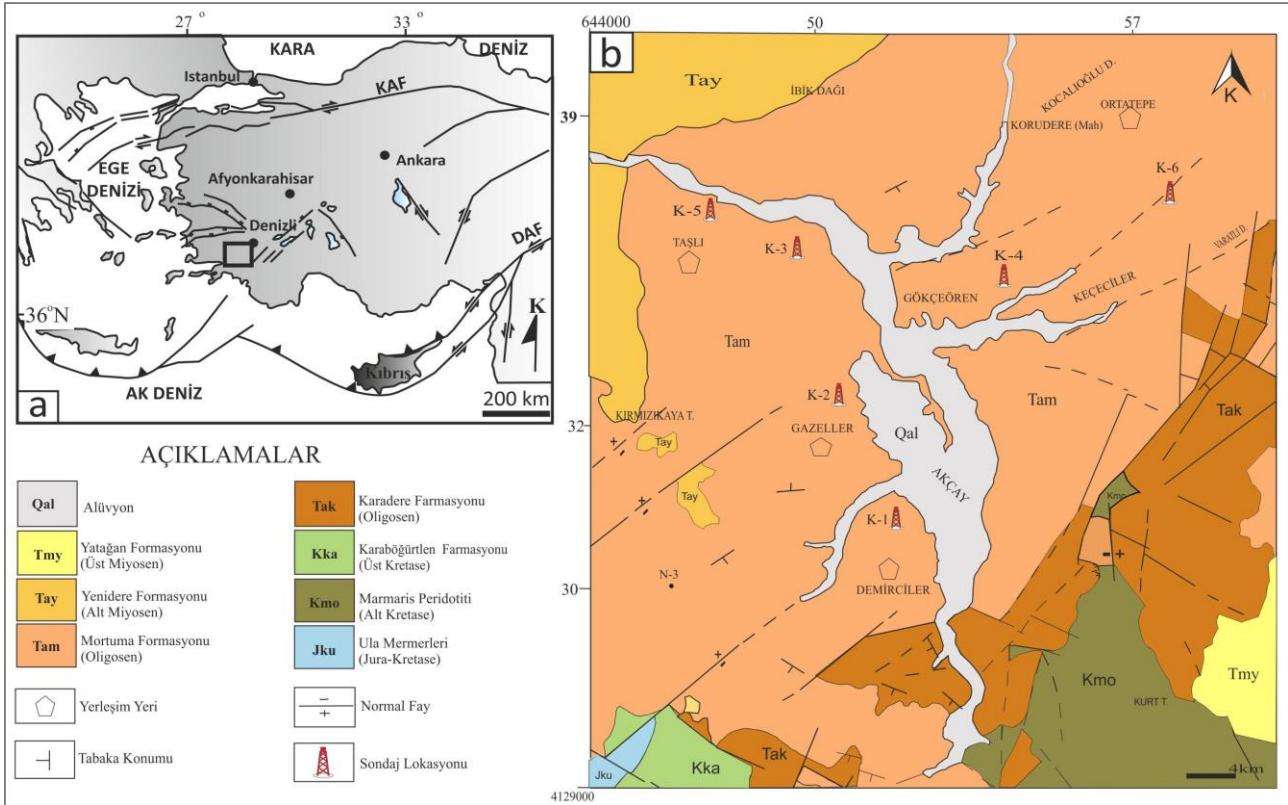
Örneklerin mineralojik analizi değerlendirildikten sonra seçilen kil ve karbonatça zengin olanların jeokimyasal analizleri Acme (Kanada) Laboratuvarlarında yaptırılmıştır. Analizlerde ICP-MS ve EAS (Inductial Couple Plazma – Mass Spectrometry, Emission Spectrometry) ile ana, iz, nadir toprak element ve ateşte kayıp, Leco analizi ile karbonat ve sülfatlı örneklerde toplam C ve toplam S analizleri yaptırılmıştır.

3. Genel Jeoloji

Çalışma alanındaki en yaşlı birim Jura-Kretase yaşlı Ula mermerleridir. Çalışma sahasının güney batısında yüzeyleyen birim genel olarak, kristalize kireçtaşı ve özellikle batıda çört-sparitik kireçtaşı araldanması şeklinde görülür. Bu birimin üzerine Alt Kretase yaşlı Marmaris peridotiti gelmekte olup, çalışma alanının güneydoğusunda yayılım göstermektedir. Marmaris peridotitinin üzerine uyumsuz olarak çalışma alanının güneybatı kesimlerinde yayılım gösteren Üst Kretase yaşlı Karaböğürtlen formasyonu gelmektedir. Türbiditik karakterli çakıltaşı, kumtaşı, kireçtaşından oluşan Karaböğürtlen formasyonu, özellikle üst seviyelerde irili-ufaklı volkanik ve metamorfik kaya bloklarını kapsar. Karaböğürtlen formasyonu üzerine uyumsuz olarak Karadere formasyonu gelmektedir. Çalışma alanının güneydoğusunda yayılım gösteren formasyon çakıltaşı, kumtaşı ve

çamurtaşından oluşur. Karadere formasyonu yanal geçişli olduğu Mortuma formasyonuna göre Oligosen yaşında olmalıdır (Hakyemez 1989). Çalışma alanında geniş yayılım gösteren, esas çalışma konusunu oluşturan Hakyemez ve Örçen (1982) tarafından adlanan Oligosen yaşlı Mortuma formasyonunun en alt bölümü başlıca çakıltaş, kumtaşı araldanmasından, üst bölümü ise, çakıltaşlarıyla başlayan, kumtaşı-ince linyit düzeyli çamurtaşı ve kiltası araldanmasından oluşur. Şengüler ve Aydın (2017) birimin kıyı ovası, lagün, örgülü ırmak ve menderesli ırmak çökellerinden oluştuğunu belirtmiştir. Sözbilir (2005) Geç Oligosen yaşlı Mortuma formasyonunu molas karakterinde, örgülü ve menderesli akarsu çökeltme ortamlarında depolanmış konglomeralar ile kömür

seviyeleri içeren ince kırıntılı lagüner çökellerden oluştuğunu belirtmiştir. Çalışma sahasında Alt Miyosen yaşlı Yenidere formasyonu Mortuma formasyonu üzerine açısal uyumsuzlukla gelmektedir. Çalışma alanının kuzey batısında yayılım gösteren formasyon genel olarak çakıltaş, kumtaşı, çamurtaşı, ince killi kireçtaşı ara katmanlı siltaşı ve kiltaşlarından oluşur (Hakyemez ve Örçen 1982). Yenidere formasyonu üzerine çalışma alanının güneydoğusunda dar alanda yüzeyleyen Geç Miyosen yaşlı Yatağan formasyonu gelmektedir. Genel olarak çakıltaş, kumtaşı ve dağınık jips kristalli, kalış yumrulu çamurtaşı araldanmasından oluşan formasyon, yer yer tüf ve tüfit ara katmanları da içerir. En üstte ise alüvyal çökeller bulunmaktadır (Akdeniz 2011).



Şekil 1. (a) Çalışma alanının yer bulduru haritası, (b) Çalışma alanının jeoloji haritası (Akdeniz 2011) ve sondaj lokasyonları.

4. Bulgular

4.1. Sondaj Karotlarının Litolojik Özellikleri

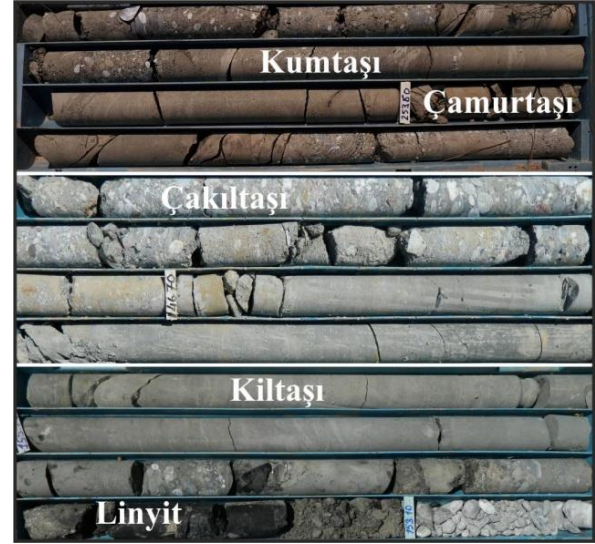
Çalışma alanında yapılan sondajların derinlikleri 426 m ile 780 m arasında değişmektedir. Sondajlarda çakıltaş, kumtaşı ve yer yer linyit

damarları içeren çamurtaşı ve kiltaşlarından oluşan Mortuma formasyonuna ait kalın bir Oligosen istifi kesilmiştir (Şekil 2).

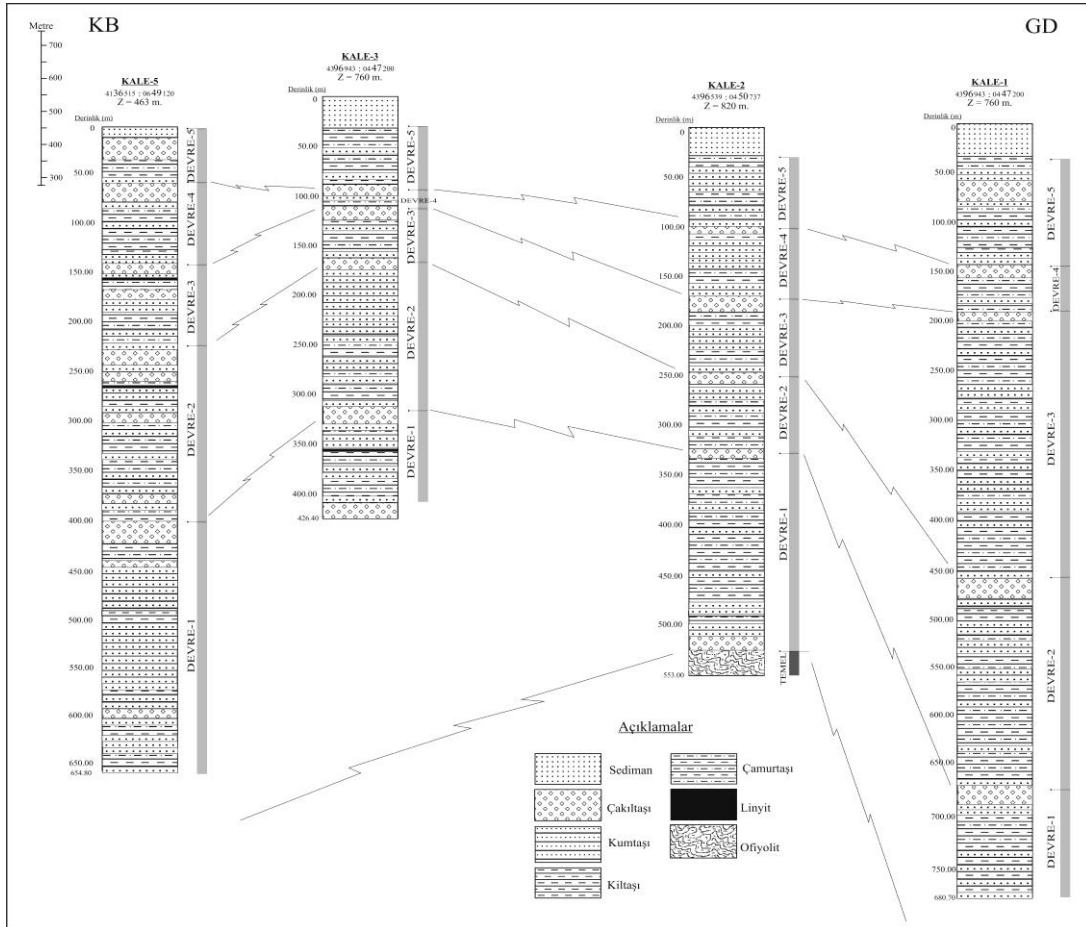
Sondajlar; çoğunlukla zayıf pekişmiş, yeşilimsi gri ve sarımsı renklere, her biri kalkerli çamurtaşı, kiltası, kumtaşı içeren ve kaba taneli kanal dolgusu

çakıltaşları ile sonlanan ve birbirlerinden çakıltaşı seviyeleri ile ayrılabilen, alttan üste doğru tekrarlayan toplam beş; K-6 sondajında ise dört farklı devresel düzeyi içeren bir regresif istifden oluşmaktadır. Çakıltaşı taneleri ofiyolitlerden ve Mesozoyik yaşlı kireçtaşlarından türemiştir. Genellikle tüm sondajlarda istifin kalkerli çamurtaşı ve kiltaşından oluşan düzeylerinde kalınlığı 1-3 cm arasında değişen kömür damarları olağan olarak gözlenir. Bununla birlikte K-3 sondajının 366. metresinde, koyu gri renkli kiltaşları içinde 45 cm kalınlığında bir kömür damarı kesilmiştir. Ayrıca K-5 sondajının üst bölümünde 155-156 metreler arasında, kumtaşı ve çamurtaşları içinde kalınlığı 40 cm'ye ulaşan bir kömür damarının varlığı saptanmıştır. K-5 sondajının 262. metresinde ise, 10 cm kalınlığında bir kömür damarı kesilmiştir. K-6 sondajı karotunda kalkerli çamurtaşı ve kiltaşından oluşan tortullar içinde, 78. metrede kalınlığı 20 cm'ye ulaşan bir kömür damarının varlığı saptanmıştır. Sondajın 238. metresinde 10 cm ve 259. metresinde ise 45 cm olmak üzere iki farklı seviyede yer alan kömür damarlarının varlığı

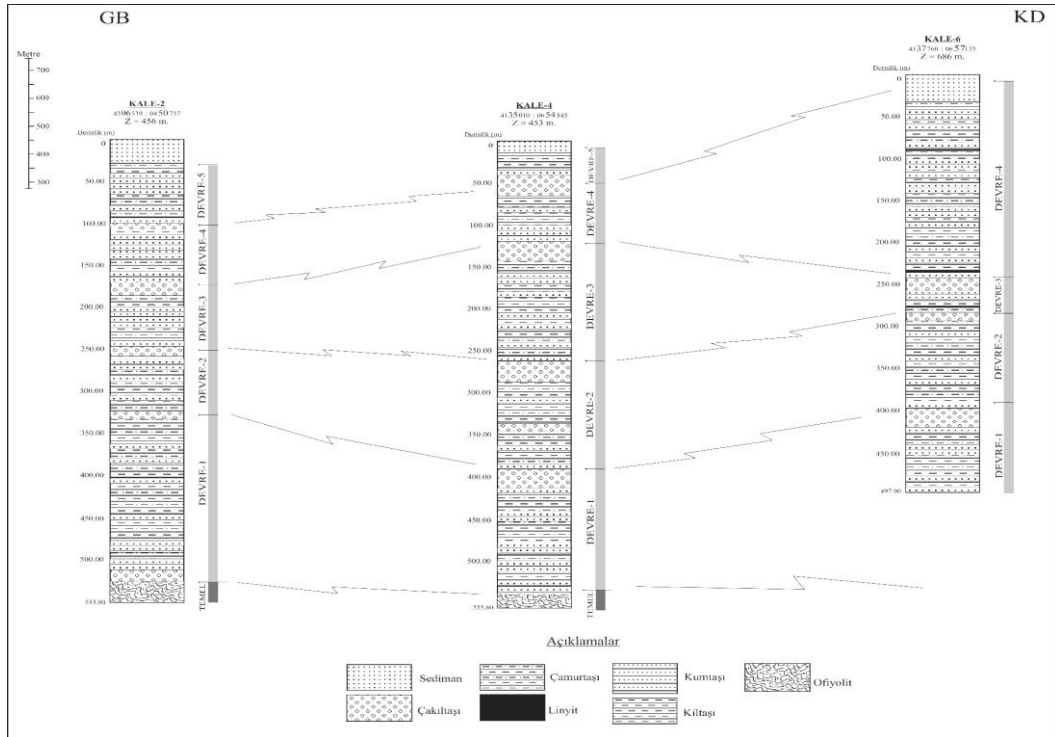
saptanmıştır. Sondajlarda kesilen kömür damarları siyahımsı, parlak özellikte linyitten yapıdadır. K-2 sondajında 525-553 m arasında koyu yeşilimsi gri ile kırmızımsı renklerde, çoğunlukla breşik özellikte serpantinitten oluşan, ofiyolitik temel kayaları kesilmiştir (Şekil 2, Şekil 3 ve Şekil 4).



Şekil 2. Sondajlara ait karotlardan görüntüler



Şekil 3. Çalışma alanında yapılan sondajların KB-GD yönlü korelasyonu (Sondajların haritadaki yeri için Şekil 1b'ye bakınız).



Şekil 4. Çalışma alanında yapılan sondajların GB-KD yönlü korelasyonu (Sondajların haritadaki yeri için Şekil 1b'ye bakınız).

4.2. Mineralojik İncelemeler

Çalışma sahasında K-1, K-4, K-5 ve K-6 sondajlarından seçilen 42 adet örneğin tüm kaya mineralojik bileşimleri XRD analizleri ile belirlenmiştir (Çizelge 1). Değerlendirilen örneklerde kalsit, dolomit, feldispat, kuvars ve kil mineralleri tespit edilmiştir. Karbonat mineralleri her örnekte tespit edilmiştir. Havzada ana karbonat minerali kalsittir. Dolomit daha az oranda bulunmaktadır. Kalsit minerali sondaj istiflerinin her seviyesinde bulunurken, dolomit alt seviyelerde daha yaygındır. Dolomit içeren örneklerde kil içeriği oldukça yüksektir. Havzada tespit edilen kil mineralleri ise simektit, klorit, kaolinit ve illittir. En yaygın kil minerali simektittir.

İnceleme alanında kalsit minerali 3.03 Å da bilinen ana piki ile tanımlanmıştır. Mineralin tanımlanmasında kullanılan diğer pikler 2.85 Å, 2.49 Å, 2.45 Å, 2.28 Å, 2.09 Å, 1.91 Å, 1.87 Å, 1.63 Å, 1.52 Å ve 1.50 Å da gözlenmiştir (Şekil 5). X ışınları çekimleri sonucunda dolomit minerali için 2.88 Å ve 2.89 Å da karakteristik olan oldukça şiddetli ve kristalinitesi yüksek olan pik

gözlenmiştir. Ayrıca 4.03 Å, 2.68 Å, 2.09 Å, 2.07 Å, 1.81 Å, 1.78 Å ve 1.41 Å da dolomitin diğer tanımlayıcı pikleri gözlenmiştir (Şekil 5). XRD çalışmaları ile dolomit mineralinde Ca/Mg oranı tespit edilebilir (Goldsmith and Graf 1958). Havza da bulunan dolomitlerin çoğunluğunun ideal dolomit (2.88-2.89 Å) olduğu belirlenmiştir.

Tespit edilen silikat mineralleri kuvars, feldispat ve kil mineralleridir. Kuvars mineralinin 3.34 Å ve 3.35 Å da şiddetli ve kristalinitesi yüksek olan başlıca pikleri gözlenmiştir. Kuvars mineralinin tanımlanmasında kullanılan diğer pikler 4.27 Å, 4.21 Å, 2.85 Å, 2.45 Å, 2.28 Å, 2.12 Å, 2.09 Å, 1.81 Å, 1.67 Å, 1.54 Å, 1.41 Å ve 1.37 Å da gözlenmiştir. X-ışınları çekimleri sonucunda 3.20 Å da feldispat mineralinin ana piki belirlenmiştir. Feldispatın tanımlayıcı diğer pikleri 3.86 Å, 3.65 Å ve 3.22 Å da gözlenmiştir (Şekil 5).

Kaolinit mineralinin 7.12 Å ile 7.34 Å arasında ana pik değerleri gözlenmiştir. Klorit mineralinin 14.07 Å ile 14.58 Å arasında ana pikleri tanımlanmıştır. İllit mineralinin 10.08 Å ile 10.13 Å arasında ana pik değerleri gözlenmiştir. Bununla beraber 4.81 Å,

4.61 Å, 4.18 Å, 4.99 Å ve 1.67 Å da illitin diğer tanımlayıcı pikleri gözlenmiştir. Simektit mineralinin 14.58 Å, 14.38 Å, 14.34 Å, 14.24 Å da tanımlayıcı pikleri gözlenmiştir (Şekil 5).

Çizelge 1. Sondaj örneklerinin mineralojik bileşimleri

Örnek No	KİL	KUVARS	FELDİSPAT	KALSİT	DOLOMIT
K1-41.30	***	**	*	*	*
K1-98.40	****	*	*	*	*
K1-135.00	*****	*	*	*	*
K1-164.50	***	*	*	**	*
K1-198.00	***	**	*	*	*
K1-264.20	***	**	*	*	*
K1-381.0	***	**	*	**	*
K1-482.50	****	*	*	*	*
K1-587.00	***	**	*	**	**
K1-663.00	***	**	*	**	**
K1-720.50	***	**	*	**	*
K1-769.60	***	*	*	**	*
K1-780.00	****	**	*	*	*
K4-12.20	****	**	*	*	*
K4-95.00	****	**	*	**	*
K4-117.50	*****	**	*	*	*
K4-177.00	****	*	*	**	*
K4-217.00	****	*	*	**	*
K4-328.00	****	**	*	*	*
K4-336.50	***	*	*	**	**
K4-386.00	****	*	*	*	*
K4-452.00	***	**	*	**	*
K4-476.90	****	*	*	*	*
K4-503.00	***	*	*	**	**
K5-100.70	****	*	*	**	*
K5-135.00	****	**	*	*	*
K5-160.40	*****	*	*	*	*
K5-205.90	*****	**	*	*	*
K5-237.90	*****	**	*	*	*
K5-268.00	*****	**	*	*	*
K5-345.20	*****	**	*	*	*
K5-436.20	*****	**	*	*	*
K5-531.30	****	**	**	**	*
K5-622.10	****	**	*	**	*
K6-31.20	***	*	*	**	**
K6-85.00	**	*	*	**	**
K6-128.80	**	*	*	**	**
K6-258,30	****	*	*	*	*
K6-266,60	***	*	*	**	**
K6-321.60	****	*	*	**	*
K6-450.00	*****	**	*	*	*
K6-485.10	***	*	*	**	**

Not: Minerallerin nispi bollukları '*' işareti ile belirtilmiştir

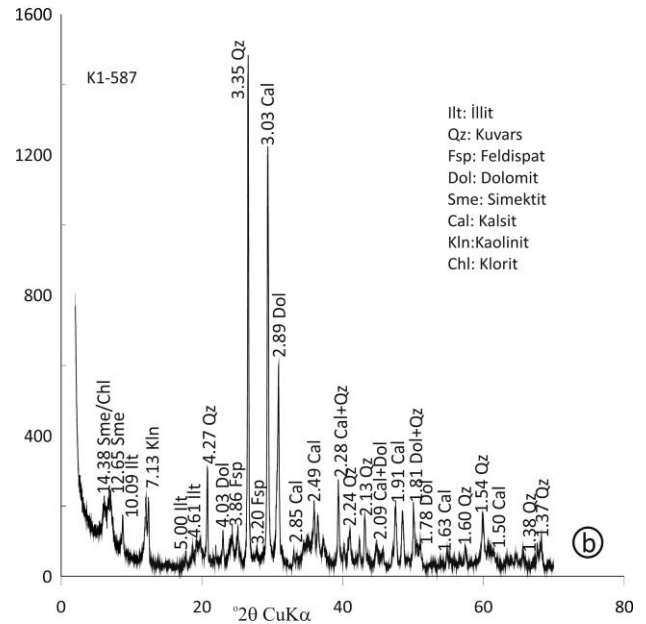
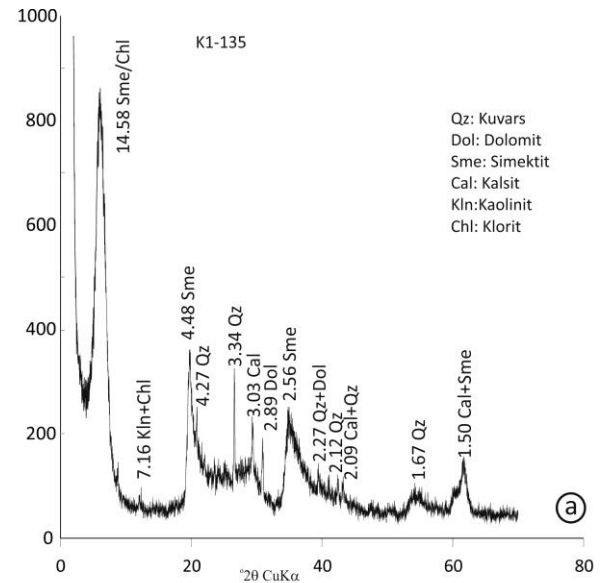
4.3. Jeokimyasal İncelemeler

4.3.1 Ana ve iz element kimyası

Çalışma sahasında yapılan K-1 ve K-6 sondajlarından derlenen kil ve karbonat içeriği yüksek 15 adet örneğin major, minor, nadir toprak element (NTE), ateş kaybı (AK) ve toplam C ve S analizleri yapılmıştır. Analizleri yapılan numunelerin ana element oksit, ateşte kaybı (AK), toplam C (TOT/C), toplam S (TOT/S) ve iz element içerikleri Çizelge 2' de verilmiştir.

Al₂O₃ ile SiO₂ arasında K-1 ve K-6 sondaj örneklerinde pozitif korelasyon gözlenmiştir. K₂O ile Al₂O₃ arasında K-1 sondajında korelasyon gözlenmemiştir, K-6 sondajında ise kuvvetli pozitif korelasyon gözlenmiştir. MgO ile CaO arasında K-1 sondajında pozitif korelasyon gözlenirken K-6 sondajında negatif korelasyon gözlenmektedir. CaO ile Toplam C arasında K-1 ve K-6 sondajlarında çok kuvvetli pozitif korelasyon gözlenmiştir.

SiO₂ ye karşılık Al₂O₃+K₂O+Na₂O (Suttner and Dutta 1986) grafiğinde örneklerin kurak/yarı kurak koşullar altında oluştuğu tespit edilmiştir (Şekil 6).



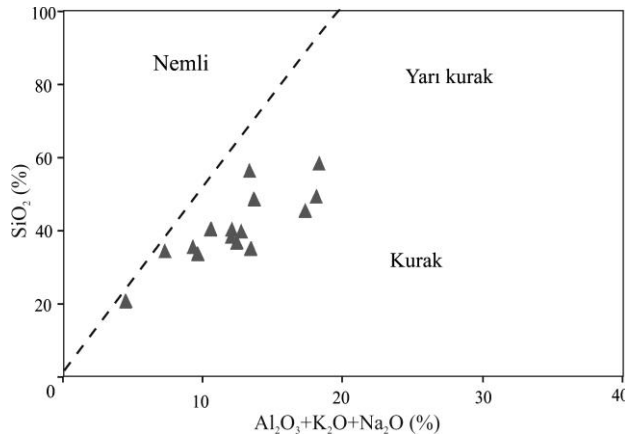
Şekil 5. a) K1-135nolu örneğin tüm kaya XRD analizi, b) K1-587 örneğin tüm kaya XRD analizi.

K-1 sondajında Zr içeriği 72.1 ppm ve 440 ppm, Sr içeriği 61.1 ppm ve 138.6 ppm, Ni içeriği 207 ppm ve 775 ppm, V içeriği 72 ppm ve 130 ppm arasında değişmektedir. K6 sondaj örneklerinde ise Zr içeriği

43.6 ppm ve 103 ppm, Sr içeriği 77.2 ppm ve 206.7 ppm, Ni içeriği 450 ppm ve 1309 ppm, V içeriği 46 ppm ve 108 ppm arasında değişmektedir.

Çizelge 2. Sondajların ana element oksit içerikleri (%) ve iz element içerikleri (ppm)

Örnek No	K1	K1	K1	K1	K1	K1	K1	K6	K6	K6	K6	K6	K6	K6	K6
SiO ₂	52.88	46.6	38.08	54.59	33.38	38.75	35.54	34.32	21.26	32.65	43.26	33.98	36.85	45.97	38.59
Al ₂ O ₃	10.13	15.19	9.6	13.78	5.76	8.07	9.39	7.29	3.68	7.32	13.21	10.46	9.14	10.34	9.11
Fe ₂ O ₃	5.97	4.34	6.31	8.01	5.55	6.27	6.49	6.3	4.02	5.49	6.21	6.21	7.01	9.09	6.67
MgO	5.47	8.53	9.32	6.51	11.71	11.08	11.04	13.91	11.3	13.08	10.46	10.73	13.5	14.38	11.84
CaO	9.26	2.79	14.63	3.62	18.17	14.31	15.06	14.13	27.14	16.15	7.49	14.37	11.91	4.21	12.02
Na ₂ O	0.87	1.13	0.47	0.87	0.45	0.62	0.35	0.43	0.29	0.56	0.74	0.61	0.63	0.62	0.74
K ₂ O	1.43	0.37	1.84	2.2	0.86	1.29	1.88	1.12	0.61	1.26	2.02	1.44	1.51	1.76	1.46
TiO ₂	0.56	0.78	0.51	0.68	0.36	0.44	0.43	0.36	0.22	0.37	0.66	0.55	0.49	0.45	0.48
P ₂ O ₅	0.11	0.25	0.15	0.08	0.1	0.11	0.09	0.06	0.07	0.08	0.08	0.06	0.08	0.05	0.07
MnO	0.14	0.04	0.18	0.07	0.2	0.1	0.11	0.07	0.19	0.14	0.07	0.12	0.11	0.1	0.07
Cr ₂ O ₃	0.082	0.011	0.055	0.068	0.132	0.108	0.066	0.098	0.06	0.078	0.075	0.057	0.089	0.118	0.089
AK	12.8	19.6	18.5	9.2	23	18.5	19.2	21.5	30.8	22.4	15.3	21.1	18.2	12.4	18.5
Top	99.82	99.7	99.75	99.79	99.73	99.74	99.73	99.69	99.75	99.7	99.71	99.72	99.68	99.68	99.71
TOT/C	2.51	0.48	4	1.15	5.38	3.83	3.99	4.64	8.11	5.24	2.97	4.88	3.67	1.29	3.88
TOT/S	<0.02	<0.02	0.02	0.07	<0.02	0.03	<0.02	<0.02	<0.02	0.03	0.03	<0.02	0.04	<0.02	0.03
Ba	233	315	258	307	194	211	253	210	145	282	380	291	264	235	261
Ni	466	207	433	573	775	662	561	806	450	665	676	464	796	1309	824
Sc	13	9	13	17	10	13	14	11	6	10	16	12	13	16	13
Be	<1	1	1	2	<1	<1	<1	<1	<1	1	2	1	2	<1	<1
Co	38.4	25	41.8	46.6	50.9	49.9	55.2	59.3	33.6	46.3	54.6	36.8	61.3	81	63.8
Cs	4.5	0.5	7.4	7.2	2.5	3.3	5.5	4.3	2	4.1	10.1	6.3	5.3	8.8	5.6
Ga	12.8	14	12.6	16.7	6.7	9.9	11.7	9.2	4.4	9.1	17.6	12.9	11.3	12.7	11
Hf	3.5	11.2	2.3	3.6	2.3	2.3	1.9	1.7	1.1	1.9	3.1	2.7	2.4	2	2.4
Nb	12.4	28.7	11.3	13.7	7.5	9	8.3	7.1	5	7.2	13.7	11.9	9.4	8.7	9.5
Rb	68.4	14.6	75.5	110.8	35.4	52.4	69.5	49.4	25	54.8	97	66.2	64.5	84.8	67.3
Sr	82.5	166.6	124.5	61.1	136.2	124.8	138.6	131.3	206.7	145.4	111.5	142.9	134.4	77.2	127
Ta	0.8	2	0.7	0.9	0.4	0.5	0.5	0.4	0.3	0.4	0.8	0.8	0.6	0.6	0.6
Th	8.1	50.9	6	10.3	4.3	5.4	5.5	4.6	2.5	5.5	9.6	7.8	6.4	6.5	6.3
V	101	95	92	129	72	90	97	82	46	82	118	97	101	108	97
W	1.3	2.9	1.1	2	1.4	0.9	1.4	1.3	0.8	1.5	8.4	3.2	2.1	2.1	2.4
Zr	137.9	440	94.8	138.3	82.3	90	72.1	64.9	43.6	70.4	124.1	103	92.7	81.4	88.5
Y	22.3	20.9	23.5	24.2	12.9	19.7	19.2	13	10	14.1	21.2	16.7	15.9	16.3	16.2



Şekil 6. Sondajlara ait örneklerin paleoklimsel koşulları gösteren SiO₂ ye karşılık (Al₂O₃+K₂O+Na₂O) diyagramı.

4.3.2 Nadir toprak element kimyası

Örneklerin NTE (Nadir toprak element) içerikleri, anomali ve oranları Çizelge 3'de verilmiştir.

İnceleme alanındaki sondaj örneklerinin NTE içerikleri Kondrit'e göre (Boynton 1984, Sun and McDonough 1989) ve NASC'a göre (NASC:Average North American Shale, Taylor and McLennan 1985) normalize edilmiştir. NT elementlerinin NASC'a göre normalleştirilmiş değerlerini gösterir grafiklere bakıldığında NTE eğilimlerinin yataya yakın ve dolayısıyla NASC değerlerine paralel olduğu görülmektedir (Şekil 7). NT elementlerinin Kondrit'e göre normalleştirilmiş değerlerini gösterir grafiklere bakıldığında hafif nadir toprak elementlerinin ağır nadir toprak elementlerine oranla zenginleşme gösterdiği tespit edilmiştir (Şekil 8).

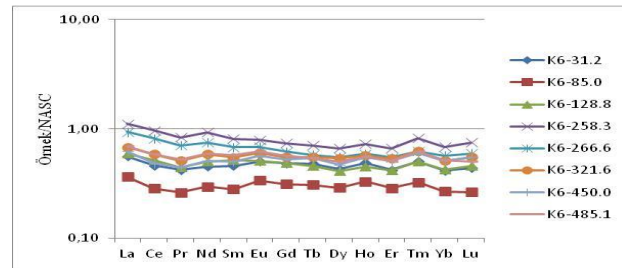
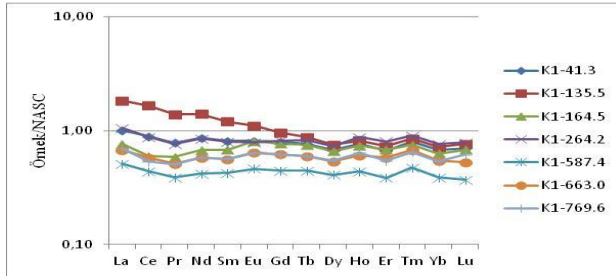
NT elementlerinde NASC'a göre Eu* anomalisi 0.98 ile 1.14 arasında değişirken, Ce* anomalisi 0.89 ile 1.04 arasında değişmektedir (Çizelge 3). Kondrit'e göre ise Eu* anomalisi 0.68-0.76 arasında

değişmekte olup, negatif anomali gözlenmiştir. Ce* anomali ise NASC'a benzerdir (Çizelge 3).

Çizelge 3. Sondaj örneklerinin nadir toprak element içerikleri (ppm), anomali ve oranları

Örnek No	K1 41.3	K1 135.5	K1 164.5	K1 264.2	K1 587.4	K1 663.0	K1 769.6	K6 31.2	K6 85.0	K6 128.8	K6 258.3	K6 266.6	K6 321.6	K6 450.0	K6 485.1
La	31.5	57.3	23.8	32.8	15.9	21.1	21.6	17.4	11.3	18.5	34.5	29.1	21.1	19.5	21.7
Ce	59.9	111.5	40.2	59	29.5	38.9	36.1	31	19.1	34.7	64.7	54.7	39.3	32.4	39.2
Pr	6.96	12.33	5.25	6.8	3.45	4.55	4.49	3.75	2.33	3.98	7.46	6.24	4.53	3.95	4.69
Nd	26.4	42.7	20.6	25.8	12.7	17.7	17.6	13.8	9	15.2	28.2	22.9	17.8	15.5	18.1
Sm	4.85	7.2	4.08	4.79	2.56	3.35	3.38	2.73	1.67	3.11	4.86	4.05	3.27	3.02	3.47
Eu	1.02	1.38	1.02	0.99	0.58	0.81	0.79	0.63	0.42	0.64	0.99	0.85	0.75	0.71	0.78
Gd	4.38	5.31	4.23	4.5	2.45	3.41	3.39	2.66	1.71	2.69	4.06	3.4	3.05	2.9	3.14
Tb	0.65	0.75	0.64	0.7	0.38	0.51	0.51	0.41	0.26	0.39	0.6	0.49	0.47	0.46	0.46
Dy	3.75	4.19	3.66	4.06	2.27	2.99	3.03	2.37	1.6	2.29	3.67	3.04	2.98	2.6	2.79
Ho	0.76	0.82	0.74	0.88	0.44	0.61	0.64	0.49	0.33	0.45	0.73	0.59	0.57	0.55	0.56
Er	2.18	2.39	2.23	2.64	1.26	1.89	1.78	1.38	0.94	1.37	2.16	1.79	1.74	1.66	1.66
Tm	0.32	0.34	0.3	0.36	0.19	0.27	0.26	0.2	0.13	0.2	0.33	0.25	0.25	0.24	0.25
Yb	2.1	2.23	1.96	2.38	1.21	1.69	1.67	1.29	0.83	1.32	2.13	1.77	1.58	1.59	1.62
Lu	0.32	0.35	0.31	0.36	0.17	0.24	0.28	0.2	0.12	0.21	0.34	0.27	0.25	0.25	0.23
NASC'a göre															
Eu/Eu*	1.02	1.02	1.13	0.98	1.06	1.10	1.07	1.07	1.14	1.02	1.02	1.05	1.09	1.10	1.08
Ce/Ce*	1.00	1.04	0.89	0.98	0.99	0.99	0.91	0.95	0.92	1.00	1.00	1.01	1.00	0.92	0.96
Kondrit'e göre															
Eu/Eu*	0.68	0.68	0.75	0.65	0.71	0.73	0.71	0.71	0.76	0.68	0.68	0.70	0.73	0.73	0.72
Ce/Ce*	0.97	1.01	0.87	0.95	0.96	0.96	0.88	0.92	0.90	0.97	0.97	0.98	0.97	0.89	0.94
HNTE/ ONTE	8.10	11.39	6.25	7.81	7.09	7.04	6.80	7.10	6.97	7.56	9.04	9.09	7.46	6.97	7.47
HNTE/ ANTE	25.3	42.15	18.72	21.67	21.75	20.11	20.00	21.48	21.66	23.35	27.19	27.68	21.66	19.08	22.26

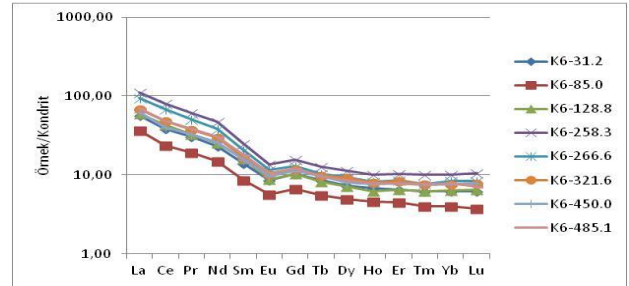
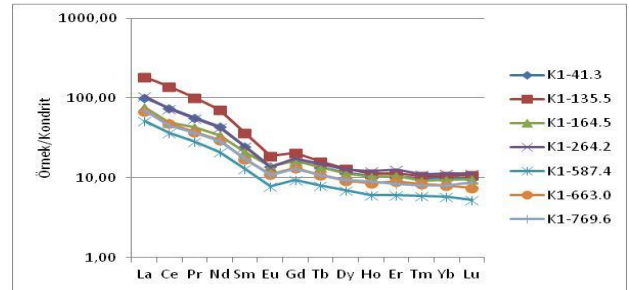
Not: $Eu/Eu^* = Eu_N / [Sm_N Gd_N]^{1/2}$, $Ce/Ce^* = Ce_N / [La_N Pr_N]^{1/2}$



Şekil 7. K-1 ve K-6 sondaj örneklerinin NT elementlerinin NASC'a göre değişim diyagramları

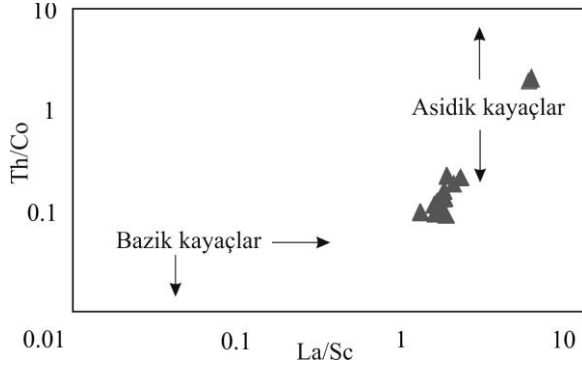
K-1 sondaj örneklerinin HNTE/ONTE (hafif nadir toprak element/ortalama nadir toprak element) oranları, 6.25 ve 11.39 arasında değişmektedir. K-6 sondaj örneklerinde ise HNTE/ONTE 6.97 ve 9.09 arasında değişmektedir. K-1 sondaj örneklerinin HNTE/ANTE (Hafif nadir toprak elementler/ağır

nadir toprak elementler) oranları 18.72 ve 42.15 arasında değişirken, K-6 sondaj örneklerinin oranı 19.08 ve 27.68 arasında değişmektedir. Ortalama ve ağır nadir toprak elementler, hafif nadir toprak elementlere göre zenginleşme göstermektedir.



Şekil 8. K-1 ve K-6 sondaj örneklerinin NT elementlerinin Kondrit'e göre değişim diyagramları

Cullers (2002) kil ve kireçtaşı örneklerinin Th/Co-La/Sc ilişkisine bağlı olarak köken kayalar hakkında bilgi vermiştir. Sondajlara ait örneklerin Th/Co-La/Sc diyagramına bakıldığında asidik/felsik köken kayalar bölgesine düşmektedir (Şekil 9).



Şekil 9. Sondajlara ait örneklerin Th/Co-La/Sc diyagramı

5. Tartışma ve Sonuç

İnceleme alanı, Batı Anadolu da Kale havzasını içine almaktadır. Kale Havzası (Denizli), KD-GB uzanımlı kıyı ovası, akarsu ve lagünel tortullarla doldurulan bir havzadır. Çalışma alanında TKİ tarafından altı adet kömür araştırma sondajı yapılmıştır. Sondajların derinlikleri 426m ile 780m arasında değişmektedir. Bu sondajlarda sığ-kıyı ortamda çökelmiş ve çakıltası, kumtaşı ve yer yer linyit damarları içeren çamurtaşı ve kiltaşlarından oluşan Mortuma formasyonuna ait kalın bir Oligosen istifi kesilmiştir.

Sondajlar kalkerli çamurtaşı, kiltası, kumtaşı seviyeleri içeren ve kaba taneli kanal dolgusu çakıltaları ile sonlanan, alttan üste doğru tekrarlayan toplam beş; K6 sondajında ise dört farklı devresel düzeyi içeren bir istifden oluşmaktadır. Çakıltasını oluşturan taneler ofiyolitlerden ve Mesozoyik yaşlı kireçtaşlarından türemiştir.

Havzanın kuzeyinde yapılan sondajlarda kiltası ve kalkerli çamurtaşından oluşan tortullar içinde kalınlıkları 45 cm ye varan siyahımsı, parlak özellikte linyit damarları tespit edilmiştir. Diğer sondajlarda ise kalkerli çamurtaşı ve kiltasından oluşan seviyelerde kalınlığı 1-3 cm arasında değişen

kömür damarları gözlenmiştir. Sondajlar korele edildiğinde, kömür katmanlarının kuzeyden güneye doğru, Oligosen istifi içinde yanal yönde ince taneli deltalık tortullara geçiş gösterdikleri görülmüştür. Havzanın güneye doğru ani olarak derinleşmesi, havza içinde yer alan büyüme fayı ile ilgili olmalıdır.

Su seviyesinin arttığı dönemlerde havzaya kil, silt ve kum boyutunda kırıntılı malzeme çökelişi olmuştur. Havzada zaman zaman sular çekilmiş ve bataklık ortamı egemen olmuştur. Organik malzemenin bataklık ortamında birikimi ile kömür oluşumu meydana gelmiştir. Havza çevresindeki metamorfik, ofiyolitik ve volkanosedimanter kayaların çökeltme havzasına taşınan kırıntılı malzemenin başlıca kaynağı olduğu düşünülmektedir.

Seçilen sondajlardan alınan örneklerin tüm kaya mineralojik bileşimleri XRD analizleri ile belirlenmiştir. Değerlendirilen örneklerde kalsit, dolomit, feldispat, kuvars ve kil mineralleri tespit edilmiştir. Karbonat mineralleri her örnekte tespit edilmiştir. Havzada ana karbonat minerali kalsittir. Havzada tespit edilen kil mineralleri ise simektit, klorit, kaolinit ve illittir. En yaygın kil minerali simektittir.

Ortam tuzluluğunun ve alkalinitesinin düşük olduğu evrelerde kalsit çökelişi gerçekleşmiş, tuzluluk ve alkalinitenin kısmen artışı ile de ortamda Mg zenginleşmesi olmuş ve dolomit çökelmiştir. Havzadaki karbonatın kaynağı havzayı çevreleyen, mermerlerden oluşan temel birimlerdir. XRD çalışmaları ile dolomit mineralinde Ca/Mg oranlarına bakıldığında havza da bulunan dolomitlerin çoğunluğunun ideal dolomit (2.88-2.89 Å) olduğu belirlenmiştir.

NTE ve Th, Ti, Zr, Ta, Nb, Sc, Y, Co ve Hf gibi elementler hareketsiz elementlerdir ve jeolojik süreçlerde korunduklarından köken belirlemede kullanılmaktadır. Düşük iyon yarıçaplı, yüksek yüklü olan HFS (High Field Strength) elementleri ve iyon yükü düşük olan büyük iyon yarıçaplı olan LIL (Large Ion Lithophile) elementler uyumsuz elementlerdir. Hafif NTE uyumlu iken, Ağır NTE uyumsuz

elementlerdir. Bu elementlerin birbirlerine oranları ve dağılımları köken kayaç ayırımında kullanılır (Taylor and McLennan 1985, Wronkiewichz and Condie 1987, 1989). Sondajlara ait örneklerin Th/Co-La/Sc diyagramına bakıldığında asidik/feslik köken kayaç bölgesine düşmektedir. Havzada orta ve ağır nadir toprak elementler hafif nadir toprak elementlere göre zenginleşme göstermektedir. Nadir toprak elementlerinin NASC ve Kondrit'e göre normalize edilmiş değişim diyagramlarına bakıldığında benzer bir dağılım göstermektedir. Bu durum NTE'nin aynı köken kayaçtan kaynaklandığını gösterir.

NT elementlerinde NASC'a göre Eu* ve Ce* anomalisi gözlenmemiştir. Kondrit'e göre ise Eu* da negatif anomali gözlenmiştir. Ce* anomalisi ise NASC'a benzerdir. NT elementlerinde NASC ve Kondrit'e göre gözlenen anomali ve oranlar havza da bulunan sedimanter kayaçların kıtasal kabuk kökenli olduğunu ve asidik kaynak kayaçtan beslendiğini göstermektedir.

Teşekkür

Bu araştırmaya 17.FEN.BİL.60 numaralı proje ile maddi destek veren Afyon Kocatepe Üniversitesi BAP Koordinatörlüğüne, arazi ve sondaj çalışmalarındaki desteklerinden dolayı TKİ Genel Müdürlüğü'nün Kömür Aramaları proje ekibine teşekkür ederiz.

6. Kaynaklar

- Akdeniz, N., 2011. 1/100000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları. Denizli N-21 Paftası Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Raporu. Arşiv No:163, Ankara.
- Boynton, W.V., 1984. Geochemistry of rare earth elements: meteorite studies. Pp. 63–114 in: Rare Earth Element Geochemistry (P. Henderson, ed.). Elsevier, Amsterdam.
- Cullers, R.L., 2002. Implications of elemental concentrations for provenance, redox conditions, and metamorphic studies of shales and limestones near Pueblo, CO, USA. *Chemical Geology*, **191** (4), 305–327.
- Goldsmith, J. R. and Graf, D.L., 1958. Relations between lattice constants and compositions of the Ca-Mg carbonates. *American Mineralogist*, **43**, 84–101.

- Gündoğdu, N.M., 1982. Neojen yaşlı Bigadiç sedimanter baseninin jeolojik, mineralojik ve jeokimyasal incelenmesi, Hacettepe Üniversitesi, Doktora Tezi, 386.
- Hakyemez, H. Y. ve Örçen, S., 1982. Muğla-Denizli Arasındaki (GB Anadolu) Senozoyik Yaşlı Çökellerin Sedimentolojik ve Biyostratigrafik İncelenmesi. Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü Rapor No: 7311, Ankara (Yayınlanmamış).
- Hakyemez, H. Y., 1989. Kale-Kurbalık (GB Denizli) Bölgesinde Senozoyik yaşlı Çökel Kayaların Jeolojisi ve Stratigrafisi. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, **109**, 9–22.
- Hasdiğen, S. ve Bayhan E., 2003. Kale (GB Denizli) bölgesindeki Tersiyer yaşlı kayaçlarının kil sedimentolojisi. *Yer Bilimleri*, **27**, 47–58.
- İslamoğlu, Y., Gedik, F., Aydın, A., Atay, G., Hakyemez, A. ve Babayiğit, S., 2006. Denizli Bölgesi'ndeki (GB Türkiye) Oligosen yaşlı lagüner ve Denizli çökellerin mollusk, foraminifera, nannoplankton, mercan ve sstrakoda biyostratigrafisi. 59. Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildirileri, 20–24 Mart 2006, Ankara, 245–249.
- JCPDS, 1993. Mineral Powder Diffraction File Databook, Joint Committee on Powder Diffraction Standards. Swarthmore, Pennsylvania, 781.
- Karadenizli, L., Saraç, G. Şen, Ş. Seyitoğlu, G. Gedik, F. Kangal, Ö. Kayakıran, İ. Kazancı, N. Gül, A. ve Erten, H., 2009. Batı ve Orta Anadolu Oligosen Paleocoğrafyası. MTA Rapor No:11225.
- Okay, A., 1989. Denizli'nin güneyinde Menderes Masifi ve Likya naplarının Jeolojisi. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, **109**, 45–58.
- Savaşçın, M.Y. and Güleç, N., 1990. Neogene volcanism of Western Anatolia, Field Excursion B3, Intern. Earth Sci. Con. On Aegean Region, *IESCA Publ. No. 3*, 78.
- Savaşçın, M.Y., Güleç, N. and Tankut, A., 1990. Geochemical character and tectonic significance of Neogene volcanism extending from Aegean to Central Anatolia. IAVGE. Mainz 1990, Inter. Vol. Cong. Abstracts.
- Sözbilir, H., 2005. Oligo-Miocene extension in the Lycian orogen: evidence from the Lycian molasse basin, SW Turkey. *Geodinamica Acta*, **18/3-4**, 255–282.
- Sun, S.S. and McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition processes. Pp. 313–345 in:

Magmatism in the Ocean Basins (A.D. Saunders and M.J. Norry, editors). Special Publication 42, Geological Society, London.

Suttner, L.J. and Dutta, P.K., 1986. Alluvial sandstone composition and paleoclimate, I. Framework mineralogy. *International Journal of Sediment Research*, **56**, 329-345.

Şengüler, İ. ve Aydın, H., 2017, Akçay vadisi (Aydın, Muğla, Denizli) ve civarının jeolojisi. *Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni*, **24**, 1-6

Taylor, S.R. and McLennan, S.M., 1985. The continental Crust: Its Composition and Evolution. Blackwell, London, 312.

Wronkiewichz, D. J. and Condie, K. C., 1987. Geochemistry of Archean shales from the Witwaterstrand Supergroup, South Africa; source-area weathering and provenance. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **51**, 2401-2416.

Wronkiewichz, D. J. and Condie, K. C., 1989. Geochemistry and provenance of sediments from the Pangola Supergroup, South Africa: Evidence for a 3.0 Ga-old continental craton. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **53**, 1537-1549.

Derivation of Dimensionless Governing Equations for Axisymmetric Incompressible Turbulent Flow Heat Transfer Based on Standard $k-\epsilon$ Model

Eyüb CANLI^{1*}, Ali ATEŞ², Şefik BİLİR³

¹Selçuk University, Technology Faculty, Mechanical Engineering Department, Konya, Turkey.

²Selçuk University, İlgin V.H.S., Machinery and Metal Technologies Department, Konya, Turkey.

³Konya Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Mechanical Engineering Department, Konya, Turkey.

* Corresponding author ¹e-mail: ecanli@selcuk.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9358-1603>

²e-mail: aates@selcuk.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5506-8200>

³e-mail: sbilir@ktun.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7552-3437>

Geliş Tarihi: 04.11.2020

Kabul Tarihi: 02.12.2020

Abstract

In this work, equations that govern axisymmetric incompressible turbulent flow for heat transfer calculations are derived assuming constant thermo-physical properties and a specific nondimensionalization scheme. Vector algebra is used for expanding vector form of governing equations in cylindrical coordinate system. Emphasis is on the derivatives of unit vectors according to azimuthal direction. Reynolds decomposition is used for separating time averaged terms and Reynolds Stress terms. Standard $k-\epsilon$ turbulence model is selected for solving closure problem due to the Reynolds stresses. Organization of the governing equations after model inputs is done explicitly. Also, parameters that constitute nondimensionalization scheme are given. Evaluations of the complete process are given. Two major aims of the work are presenting necessary equations explicitly and revealing some key steps for reorganization of the equations. It is also aimed to present novel illustrations in order to contribute comprehension of the concepts.

Keywords

Axisymmetric Flow;
Cylindrical
Coordinates; $k-\epsilon$
Turbulence Model;
Reynolds
Decomposition.

Standart $k-\epsilon$ Modeli Temelinde Eksenel Simetrik Sıkıştırılmaz Türbülanslı Akış Isı Transferi için Boyutsuz Ana Denklemlerin Türetilmesi

Öz

Bu çalışmada, sabit termo-fiziksel özellikler kabul edilerek ve belirli bir boyutsuzlaştırma şeması kullanılarak, ısı transferi hesaplamaları için eksenel simetrik sıkıştırılmaz türbülanslı akışı yöneten ana denklemler türetilmiştir. Silindirik koordinat sisteminde ana denklemlerin vektör formlarının açılması için vektör cebri kullanılmıştır. Açılmalara göre birim vektörlerin türevleri üzerine vurgulama yapılmıştır. Zaman ortalamalı terimler ile Reynolds gerilmeleri terimlerinin ayrılması için Reynolds bileşenlerine ayırma yöntemi kullanılmıştır. Reynolds gerilmelerinden kaynaklanan kapama sorununu çözmek için standart $k-\epsilon$ türbülans modeli seçilmiştir. Model girdilerinden sonra ana denklemlerin düzenlenmesi açık olarak verilmiştir. Ayrıca boyutsuzlaştırma şemasını oluşturan parametreler verilmiştir. Bütün sürecin değerlendirmeleri verilmiştir. Çalışmanın iki ana amacı, gerekli denklemlerin açık olarak verilmesi ve denklemlerin düzenlenmesindeki bazı anahtar adımların ortaya konmasıdır. Ayrıca kavramların anlaşılmasına katkı sağlamak için özgün görsellerin sunumu amaçlanmıştır.

Anahtar kelimeler

Eksenel Simetrik Akış;
Silindirik Koordinatlar;
 $k-\epsilon$ Türbülans Modeli;
Reynolds Bileşenlerine
Ayrırma.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Introduction

Coordinate systems for spatial resolution of a flow field are very important in fluid mechanics and computational fluid dynamics (CFD). In finite volume

method, for instance, variables are integrated over the control volumes according to the coordinate system. Although coordinate systems are not changing the ultimate and correct results after a

computational process, process itself can become chaotic with selection of a specific coordinate system and related approach. Literature has frequently uses index notation abbreviations or shorthand notations. Also, the basic examples are mostly on Cartesian coordinates. Therefore, in this work, an axisymmetric flow field in two dimensional cylindrical coordinates is considered for derivation of flow, turbulence modeling and energy equations from conservation laws in vector forms.

Governing equations in fluid mechanics are well established over nearly two centuries. Their background is based on physics by conservation laws and they are expressed by mathematical models. These mathematical expressions are axioms. In other words, they cannot be validated mathematically but they are known. However, mathematic itself has a language and sometimes this language has differences in symbols for different fields. This changing mathematical alphabet sometimes leads to vast amount of writings for a single statement. In order to overcome this cumbersome situation, literature developed kind of abbreviation by notations such as “shorthand” notations, index notations and vector operators. As a side effect, users of this language can be mistaken for a step while extracting the compact notation to reach original statement. Equations of fluid mechanics are used and investigated by many disciplines and practitioners including mathematicians, physicists, and engineers. Accordingly, symbols, expressions, methods, applications and approaches differ and constitute a widespread field. Therefore, people dealing with fluid mechanics, especially people from industry and new practitioners can have problems for, let’s say, special arrangements such as coordinate systems. An example can be given as Computational Fluid Dynamics (CFD) governing equations in cylindrical coordinate systems.

Cylindrical coordinates offer advantages for certain conditions and geometries such as axisymmetric flows, i.e. pipes, nozzles and such. A cylindrical surface can be defined only by changes in coordinates and no additional operations are needed for simple geometries. However, additional terms emerge in governing equations. Most of these

terms are due to growing arc in positive radial direction, as it leads to a growing surface as in pipes. Nevertheless, finding or recognizing these extra terms is not straightforward. The main reason is using mathematical procedure, not physical reasoning, and missing details of operators and notations special to the coordinate system. Even so, correct form of operators can correct a lot of errors, in the absence of physical reasoning. Considering the capacity of modern literature resources, citable literature contributions about explicit mathematical expressions and their derivation processes can reduce mistakes.

The major problem associated with deriving CFD governing equations for cylindrical coordinates is examples in reference books. Most of them are for Cartesian coordinates. Some resources use index notation or Einstein notation for abbreviation. However, preparing a recipe to extract equations in index notations to cylindrical coordinates is not seen logical and haven’t been encountered. Writing equations in cylindrical coordinates using vector forms seems to be the most appropriate one but one should pay attention to use correct operators because operators and operations change according to the coordinate systems. The final tool can be General Orthogonal Curvilinear Coordinates (GOCC). This tool can be very useful but still needs to have knowledge about vector operations. And sometimes become cumbersome. Also, it is hard to find all equation relations, especially for turbulent model equations.

This work uses some well-known references alongside of new ones in order to write conservation expressions in cylindrical coordinates. Conservation expressions in vector form are written from Moukalled et al. (2016). This book is relatively new and includes computer codes for MATLAB and OpenFOAM. It also gives vector operations in necessary amount for fluid dynamics. Book of Anderson et al. is used for GOCC and Reynolds Decomposition (RD) (Anderson et al. 1984). For GOCC, book of Happel and Brenner is a more comprehensive resource (Happel and Brenner 2012). Books of Versteeg and Malalasekera (2007), Patankar (1980) and Tennekeys and Lumley (1972) are used for the general frame. Of course, well

known reference of Launder and Spalding (1974) is used for k-ε method.

In this work, governing equations are derived from vector forms by using vector operations for heat transfer and turbulent fluid flow of an incompressible fluid in 2D axisymmetric domain and cylindrical coordinates. RD is performed and equations are then written in non-dimensional form. Vector operations and simplifications special to the cylindrical coordinates are emphasized. Implications relating to the work are evaluated. A citable document is aimed for related audience by presenting explicit forms of equations and operations.

2. Theory

2.1 Expanding vector forms

All symbols in the paper are given in a nomenclature after references section. Vectors are written in straight font while scalars are written italic. Also, parenthesis changes according to content. Round parenthesis (), square brackets [] and braces {} are used for scalars, vectors and tensors respectively.

In the following, continuity, momentum and energy equations in vector form are given between (1)-(3) respectively.

Vector dot product (shown with \cdot symbol) is a special vector algebra operation. By vector dot product, vector components of one vector are multiplied with their corresponding parts of another vector. The dot product of two vectors returns a scalar.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho \mathbf{v}] = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} [\rho \mathbf{v}] + \nabla \cdot \{\rho \mathbf{v} \mathbf{v}\} = \mathbf{f} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho e) + \nabla \cdot [\rho \mathbf{v} e] = \\ -\nabla \cdot \dot{q}_s - \nabla \cdot [\rho \mathbf{v}] + \nabla \cdot [\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{v}] + \mathbf{f}_b \cdot \mathbf{v} + \dot{q}_v \end{aligned} \tag{3}$$

For incompressible fluid, continuity equation becomes;

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \tag{4}$$

Force term of equation (2) can be expressed as (5) in the absence of gravity and other external sources.

$$\mathbf{f}_s = -\nabla p + [\nabla \cdot \boldsymbol{\tau}] \tag{5}$$

(5) contains surface forces in the absence of body forces.

Shear stress tensor can be expressed in (6) for Newtonian fluids.

$$\boldsymbol{\tau} = \mu \{ \nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T \} + \lambda (\nabla \cdot \mathbf{v}) \mathbf{I} \tag{6}$$

Divergence of $\boldsymbol{\tau}$ is as following.

$$[\nabla \cdot \boldsymbol{\tau}] = \nabla \cdot \left[\mu (\nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T) \right] + \nabla (\lambda \nabla \cdot \mathbf{v}) \tag{7}$$

When (4) is used with (6) and (7) in (2) and viscosity is assumed constant, the equation has the following form.

$$\frac{\partial}{\partial t} [\rho \mathbf{v}] + \nabla \cdot \{\rho \mathbf{v} \mathbf{v}\} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} \tag{8}$$

In energy equation, temperature is used in most studies as a primitive variable. Therefore, energy equation is modified as shown in (9) to have a form in terms of temperature.

$$\begin{aligned} c_p \left[\frac{\partial}{\partial t} (\rho T) + \nabla \cdot [\rho \mathbf{v} T] \right] = \nabla \cdot [k \nabla T] \\ - \left(\frac{\partial (\ln \rho)}{\partial (\ln T)} \right)_p \frac{Dp}{Dt} + (\boldsymbol{\tau} : \nabla \mathbf{v}) + \dot{q}_v \end{aligned} \tag{9}$$

Double dot product in (9) produces viscous dissipation. With constant viscosity assumption, incompressibility and no additional heat generation, (9) reduces to (10).

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p T) + \nabla \cdot [\rho c_p \mathbf{v} T] = \nabla \cdot [k \nabla T] + \Phi \tag{10}$$

In order to extract equations (1)-(10) in cylindrical coordinates, operators and operations should be written in cylindrical coordinates. To do so, required vector operator and operations are given in Table 1.

Table 1. List of required vectors, tensors, operators and operations.

Vectors	Tensors	Operators	Operations
\mathbf{v}	$\boldsymbol{\tau}$	∇	\cdot
-	$\{\mathbf{v} \mathbf{v}\}$	∇^2	:
-	-	-	\times

Velocity vector in cylindrical coordinates is given below.

$$v = u\hat{e}_x + v\hat{e}_r + w\hat{e}_\theta \quad (11)$$

Del operator can be converted from Cartesian coordinates to cylindrical coordinates by below procedure between (12) and (23).

$$\nabla = \hat{e}_x \frac{\partial}{\partial x} + \hat{e}_y \frac{\partial}{\partial y} + \hat{e}_z \frac{\partial}{\partial z} \quad (12)$$

Comparison of Cartesian and cylindrical coordinates is given in Figure 1 in a schematic manner. This figure does not only give axes but also compares spaces.

Conversion of the coordinates follows below steps:

$$r = \sqrt{z^2 + y^2} \quad (13)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{y}{z} \quad (14)$$

$$\frac{\partial r}{\partial z} = \frac{2z}{2\sqrt{z^2 + y^2}} = \frac{z}{\sqrt{z^2 + y^2}} = \frac{z}{r} = \frac{r \cos \theta}{r} = \cos \theta \quad (15)$$

$$\frac{\partial r}{\partial y} = \frac{2y}{2\sqrt{z^2 + y^2}} = \frac{y}{\sqrt{z^2 + y^2}} = \frac{y}{r} = \frac{r \sin \theta}{r} = \sin \theta \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial z} &= \frac{1}{1 + \frac{y^2}{z^2}} \frac{-y}{z^2} = \frac{z^2}{z^2 + y^2} \frac{-y}{z^2} \\ &= \frac{-y}{z^2 + y^2} = \frac{-r \sin \theta}{r^2} = \frac{-\sin \theta}{r} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{1}{1 + \frac{y^2}{z^2}} \frac{z}{z^2} = \frac{z^2}{z^2 + y^2} = \frac{r \cos \theta}{r^2} = \frac{\cos \theta}{r} \quad (18)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} = \frac{\partial r}{\partial z} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial \theta}{\partial z} \frac{\partial}{\partial \theta} \quad (19)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} = \frac{\partial r}{\partial y} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial \theta}{\partial y} \frac{\partial}{\partial \theta} \quad (20)$$

$$\hat{e}_z = \cos \theta \hat{e}_r + \sin \theta \hat{e}_\theta \quad (21)$$

$$\hat{e}_y = \sin \theta \hat{e}_r + \cos \theta \hat{e}_\theta \quad (22)$$

$$\nabla = i \frac{\partial}{\partial x} + (\sin \theta \hat{e}_r + \cos \theta \hat{e}_\theta) \left(\frac{\partial r}{\partial y} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial \theta}{\partial y} \frac{\partial}{\partial \theta} \right) \quad (23a)$$

$$+ (\cos \theta \hat{e}_r - \sin \theta \hat{e}_\theta) \left(\frac{\partial r}{\partial z} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial \theta}{\partial z} \frac{\partial}{\partial \theta} \right)$$

$$\nabla = i \frac{\partial}{\partial x} + (\sin \theta \hat{e}_r + \cos \theta \hat{e}_\theta) \left(\sin \theta \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\cos \theta}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \right) \quad (23b)$$

$$+ (\cos \theta \hat{e}_r - \sin \theta \hat{e}_\theta) \left(\cos \theta \frac{\partial}{\partial r} - \frac{\sin \theta}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \right)$$

$$\begin{aligned} \nabla &= i \frac{\partial}{\partial x} + \sin^2 \theta \hat{e}_r \frac{\partial}{\partial r} + \sin \theta \frac{\cos \theta}{r} \hat{e}_r \frac{\partial}{\partial \theta} \\ &+ \cos \theta \sin \theta \hat{e}_\theta \frac{\partial}{\partial r} + \cos \theta \frac{\cos \theta}{r} \hat{e}_\theta \frac{\partial}{\partial \theta} \end{aligned} \quad (23c)$$

$$+ \cos^2 \theta \hat{e}_r \frac{\partial}{\partial r} + \cos \theta \frac{-\sin \theta}{r} \hat{e}_r \frac{\partial}{\partial \theta}$$

$$- \sin \theta \cos \theta \hat{e}_\theta \frac{\partial}{\partial r} - \sin \theta \frac{-\sin \theta}{r} \hat{e}_\theta \frac{\partial}{\partial \theta}$$

$$\nabla = \hat{e}_x \frac{\partial}{\partial x} + \hat{e}_r \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r} \hat{e}_\theta \frac{\partial}{\partial \theta} \quad (23d)$$

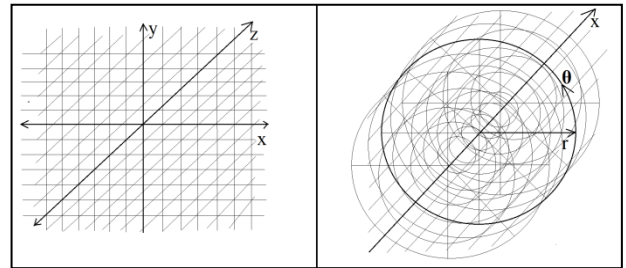


Figure 1. Schematic comparison of Cartesian and cylindrical coordinate systems.

Writing del operator in cylindrical coordinates is very crucial because additional terms in governing equations emerge from partial derivation of azimuthal and radial unit vectors according to azimuthal direction. By mathematical expression;

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \hat{e}_r = \hat{e}_\theta \quad \text{and} \quad \frac{\partial}{\partial \theta} \hat{e}_\theta = -\hat{e}_r$$

According to vector dot operation principle and del operator in cylindrical coordinates, continuity can be written as:

$$\nabla \cdot v = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{v}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial r} = 0 \quad (24)$$

Newly emerging terms in del operator creates additional terms in continuity for cylindrical

coordinates. This is mainly due to the derivation according to the azimuthal direction.

The second term in (8) is divergence of a tensor and forms a vector.

$$\nabla[\{\rho v v\}] = \left[\hat{e}_x \frac{\partial}{\partial x} + \hat{e}_\theta \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} + \hat{e}_r \frac{\partial}{\partial r} \right] \left\{ \begin{array}{l} \hat{e}_x \hat{e}_x \rho u u + \hat{e}_x \hat{e}_r \rho u v + \hat{e}_x \hat{e}_\theta \rho u w \\ \hat{e}_r \hat{e}_x \rho v u + \hat{e}_r \hat{e}_r \rho v v + \hat{e}_r \hat{e}_\theta \rho v w \\ \hat{e}_\theta \hat{e}_x \rho w u + \hat{e}_\theta \hat{e}_r \rho w v + \hat{e}_\theta \hat{e}_\theta \rho w w \end{array} \right\} \quad (25a)$$

When special care is paid on partial derivation of azimuthal and radial unit vectors according to azimuthal direction, (25a) can be written as (25b).

$$\nabla[\{\rho v v\}] = \hat{e}_x \left[\begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial x} \rho u u + \frac{\partial}{\partial r} \rho u v + \frac{\rho w}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} u \\ + \frac{u}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \rho w + \frac{\rho v}{r} \end{array} \right] + \hat{e}_r \left[\begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial x} \rho u v + \frac{\partial}{\partial r} \rho v v + \frac{\rho w}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} v + \frac{v}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \rho w \\ + \frac{\rho v v}{r} - \frac{r w^2}{r} \end{array} \right] + \hat{e}_\theta \left[\begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial x} \rho u w + \frac{\rho v w}{r} + \frac{\rho w v}{r} + \frac{\rho w}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} w \\ + \frac{w}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \rho w + \frac{\partial}{\partial r} \rho v w \end{array} \right] \quad (25b)$$

For the last term of (8), Laplacian operator should be written in cylindrical coordinates. This can be done by dot product of two del operators.

$$\nabla \nabla = \left[\hat{e}_x \frac{\partial}{\partial x} + \hat{e}_r \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r} \hat{e}_\theta \frac{\partial}{\partial \theta} \right] \quad (26a)$$

$$\left[\hat{e}_x \frac{\partial}{\partial x} + \hat{e}_r \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r} \hat{e}_\theta \frac{\partial}{\partial \theta} \right] \quad (26b)$$

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \quad (26b)$$

Del operator itself is a vector. Therefore, dot product of a vector with del operator means a divergence and forms a scalar. Accordingly, Laplacian operator is a scalar operator. However, this scalar operator still contains partial derivative according to azimuthal direction and therefore yields additional terms comparing to its Cartesian counterpart. Accordingly, the last term of (8) can be expanded as following.

$$\mu \nabla^2 v = \mu \left[\begin{array}{l} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \right) \\ [u \hat{e}_x + v \hat{e}_r + w \hat{e}_\theta] \end{array} \right] \quad (27a)$$

$$\mu \nabla^2 v = \mu \left[\begin{array}{l} \hat{e}_x \frac{\partial^2}{\partial x^2} u + \hat{e}_x \frac{\partial^2}{\partial r^2} u + \hat{e}_x \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} u \\ + \hat{e}_x \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} u + \hat{e}_r \frac{\partial^2}{\partial x^2} v + \hat{e}_r \frac{\partial^2}{\partial r^2} v \\ + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial}{\partial \theta} v \hat{e}_r \right) + \hat{e}_r \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} v \\ + \hat{e}_\theta \frac{\partial^2}{\partial x^2} w + \hat{e}_\theta \frac{\partial^2}{\partial r^2} w + \hat{e}_\theta \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} w \\ + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial}{\partial \theta} w \hat{e}_\theta \right) \end{array} \right] \quad (27b)$$

$$\mu \nabla^2 v = \mu \left[\begin{array}{l} \hat{e}_x \left(\begin{array}{l} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \\ + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \end{array} \right) \\ \hat{e}_r \left(\begin{array}{l} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} \\ + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} - \frac{v}{r^2} \\ - \frac{1}{r^2} \frac{\partial w}{\partial \theta} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial w}{\partial \theta} \end{array} \right) \\ \hat{e}_\theta \left(\begin{array}{l} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \\ + \frac{1}{r^2} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial v}{\partial \theta} \\ + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} - \frac{w}{r^2} \end{array} \right) \end{array} \right] \quad (27c)$$

At this phase, conservation of momentum can be divided into three considering its components in three directions. Nevertheless, three equations seem very complicated and can be reorganized in order to obtain a simpler form by using (24). When left side of the three momentum equations are rearranged, (24) appears in them and since (24) is equal to "0", those terms vanish.

Final forms are:

x-momentum;

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{w}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (28a)$$

$$\tau = \mu \left\{ \begin{array}{ccc} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial r} & \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} \\ \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial r} & \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} - \frac{w}{r} \\ \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} - \frac{w}{r} + \frac{\partial w}{\partial r} & \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} + \frac{v}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} + \frac{v}{r} \end{array} \right\} \quad (31)$$

r-momentum;

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{w}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} - \frac{w^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial w}{\partial \theta} - \frac{v}{r^2} \right) \quad (28b)$$

($\tau : \nabla v$) vector operation is simple but time and space consuming operation. Therefore, it is skipped here. However, some key steps can be summarized as; double dot product by doing dot product two times while paying attention to the order of the terms. This order causes unit vectors interact with partial derivatives and partial derivatives containing azimuthal direction changes unit vectors and creates new terms. The final form of ($\tau : \nabla v$) is given in (32).

θ -momentum;

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{w}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} + \frac{vw}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v}{\partial \theta} - \frac{w}{r^2} \right) \quad (28c)$$

$$(\tau : \nabla v) = \mu \left\{ \begin{array}{l} \left(\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right)^2 + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial \theta} \right. \\ \left. + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} \frac{\partial w}{\partial r} + 2 \frac{v}{r} \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} + \left(\frac{v}{r} \right)^2 - \frac{w}{r} \frac{\partial w}{\partial r} - \frac{w}{r} \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} \right) \\ \left(\left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} \right)^2 + \left(\frac{w}{r} \right)^2 \right) \end{array} \right\} \quad (32)$$

A scalar is obtained when vector operations are applied on energy equation (10). The final term, viscous dissipation, should be written from ($\tau : \nabla v$). In order to extract (6), a tensor is formed as in (29).

$$\{\nabla v\} = \left\{ \left[\hat{e}_x \frac{\partial}{\partial x} + \hat{e}_\theta \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} + \hat{e}_r \frac{\partial}{\partial r} \right] \left[u \hat{e}_x + w \hat{e}_\theta + v \hat{e}_r \right] \right\} \quad (29a)$$

$$\{\nabla v\} = \left\{ \begin{array}{ccc} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial r} & \frac{\partial v}{\partial r} & \frac{\partial w}{\partial r} \\ \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} & \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} - \frac{w}{r} & \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} + \frac{v}{r} \end{array} \right\} \quad (29b)$$

Transpose of (29b) can be written as (30).

$$\{\nabla v\}^T = \left\{ \begin{array}{ccc} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial r} & \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial r} & \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} - \frac{w}{r} \\ \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial r} & \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} + \frac{v}{r} \end{array} \right\} \quad (30)$$

Therefore, stress tensor can be written as in (31).

Energy equation in terms of temperature in cylindrical coordinates is given explicitly in (33).

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{w}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{v}{c_p} \left\{ \begin{array}{l} \left(\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right)^2 + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} \frac{\partial w}{\partial r} \right) \\ \left(\frac{v}{r} \right)^2 - \frac{w}{r} \frac{\partial w}{\partial r} - \frac{w}{r} \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} \right) \\ \left(\left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} \right)^2 + \left(\frac{w}{r} \right)^2 \right) \end{array} \right\} \quad (33)$$

For 2D steady axisymmetric constant viscosity case, governing equations for flow become as following, in respect to their presented order at the beginning of this section.

Continuity equation;

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{v}{r} + \frac{\partial v}{\partial r} = 0 \quad (34)$$

x-momentum;

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (35)$$

r -momentum;

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r^2} \right) \quad (36)$$

Energy equation for 2D steady axisymmetric constant thermo-physical properties flow can be written with transient term since heat transfer can be transient while flow is steady due to the constant properties assumption.

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \\ + \frac{\nu}{c_p} \left(2 \left(\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial r} + \left(\frac{v}{r} \right)^2 \right) + \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right) \end{aligned} \quad (37a)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\Phi}{\rho c_p} \quad (37b)$$

Final equations are checked by using GOCC.

2.2 Reynolds decomposition

The next step is to decompose governing equations into their time average and fluctuating parts and then again taking time average of the whole. The decomposition procedure is known as Reynolds Decomposition (RD). A schematic drawing is given in Figure 2 in order to explain decomposition. Since this work only considers incompressible flows, turbulent velocity component has only two parts; i.e. steady and fluctuating.

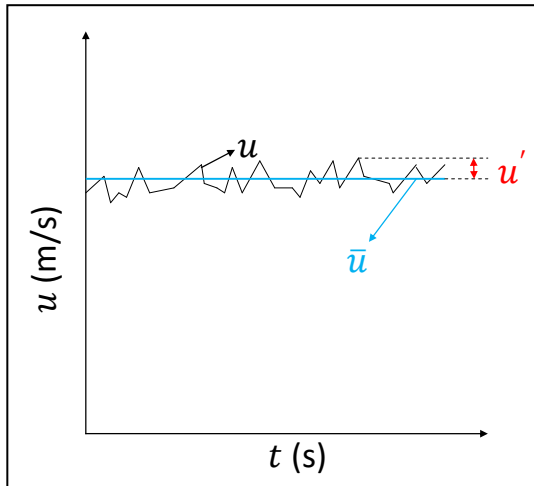


Figure 2. Components of u velocity for decomposition.

RD rules are given as following:

$$\bar{\bar{u}} = \frac{\sum_{i=0}^{i=n} u}{n} \quad (38)$$

$$u' = u - \bar{u} \quad (39)$$

$$\sum_{i=0}^{i=n} u' = 0 \quad (40)$$

$$\sum_{i=0}^{i=n} \bar{u} u' = 0 \quad (41)$$

$$\sum_{i=0}^{i=n} u' u' \neq 0 \quad (42)$$

$$\frac{\sum_{i=0}^{i=n} u' u'}{n} = \overline{u' u'} \neq 0 \quad (43)$$

When governing equations between (34)-(37) are decomposed with RD rules, fluctuating components of the diffusive parts vanish. Convective terms yield new double correlation fluctuating terms and source term in energy equation also yields a fluctuating clone of itself.

Decomposition and time averaging steps of governing equations are given in (44)-(47).

Continuity equation;

$$\frac{\partial(\bar{u} + u')}{\partial x} + \frac{(\bar{v} + v')}{r} + \frac{\partial(\bar{v} + v')}{\partial r} = 0 \quad (44a)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\bar{v}}{r} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial r} + \frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{v'}{r} + \frac{\partial v'}{\partial r} = 0 \quad (44b)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\bar{v}}{r} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial r} = 0 \quad (44c)$$

x -momentum;

$$\begin{aligned} (\bar{v} + v') \frac{\partial(\bar{u} + u')}{\partial r} + (\bar{u} + u') \frac{\partial(\bar{u} + u')}{\partial x} \\ = -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial(\bar{p} + p')}{\partial x} + \nu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial(\bar{u} + u')}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2(\bar{u} + u')}{\partial x^2} \right] \end{aligned} \quad (45a)$$

$$\begin{aligned} & \overline{v \frac{\partial \bar{u}}{\partial r} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + v' \frac{\partial \bar{u}}{\partial r} + u' \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}} \\ & \overline{+v \frac{\partial u'}{\partial r} + \bar{u} \frac{\partial u'}{\partial x} + v' \frac{\partial u'}{\partial r} + u' \frac{\partial u'}{\partial x}} \\ & = -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \nu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \bar{u}}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} \right] \end{aligned} \quad (45b)$$

$$\begin{aligned} & -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial p'}{\partial x} + \nu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u'}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 u'}{\partial x^2} \right] \\ & \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial r} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \\ & + \nu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \bar{u}}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} \right] \overline{-v' \frac{\partial u'}{\partial r} - u' \frac{\partial u'}{\partial x}} \end{aligned} \quad (45c)$$

$$\begin{aligned} & \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial r} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \nu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \bar{u}}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} \right] \\ & - \left[\left(v' \frac{\partial u'}{\partial r} = \frac{\partial u' v'}{\partial r} - u' \frac{\partial v'}{\partial r} \right) + \left(u' \frac{\partial u'}{\partial x} = \frac{\partial u' u'}{\partial x} - u' \frac{\partial u'}{\partial x} \right) \right] \end{aligned} \quad (45d)$$

$$\begin{aligned} & \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial r} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \nu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \bar{u}}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} \right] \\ & - \left[\frac{\partial u' v'}{\partial r} + \frac{\partial u' u'}{\partial x} - \left(u' \frac{\partial v'}{\partial r} + u' \frac{\partial u'}{\partial x} = -\frac{u' v'}{r} \right) \right] \end{aligned} \quad (45e)$$

$$\begin{aligned} & \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial r} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \nu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \bar{u}}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} \right] \\ & - \left(\frac{\partial \bar{u} u'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u} v'}{\partial r} + \frac{\bar{u} v'}{r} \right) \end{aligned} \quad (45f)$$

r-momentum;

$$\begin{aligned} & (\bar{v} + v') \frac{\partial (\bar{v} + v')}{\partial r} + (\bar{u} + u') \frac{\partial (\bar{v} + v')}{\partial x} \\ & = -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial (\bar{p} + p')}{\partial r} + \nu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r(\bar{v} + v'))}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 (\bar{v} + v')}{\partial x^2} \right] \end{aligned} \quad (46a)$$

$$\begin{aligned} & \overline{v \frac{\partial \bar{v}}{\partial r} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + v' \frac{\partial \bar{v}}{\partial r} + u' \frac{\partial \bar{v}}{\partial x}} \\ & \overline{+v \frac{\partial v'}{\partial r} + \bar{u} \frac{\partial v'}{\partial x} + v' \frac{\partial v'}{\partial r} + u' \frac{\partial v'}{\partial x}} \\ & = -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial \bar{p}}{\partial r} + \nu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r\bar{v})}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} \right] \\ & - \frac{1}{\rho_f} \frac{\partial p'}{\partial r} + \nu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (rv')}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v'}{\partial x^2} \right] \end{aligned} \quad (46b)$$

$$\bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial r} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} = -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial \bar{p}}{\partial r} \quad (46c)$$

$$\begin{aligned} & + \nu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r\bar{v})}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} \right] \overline{-v' \frac{\partial v'}{\partial r} - u' \frac{\partial v'}{\partial x}} \\ & \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial r} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} = -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial \bar{p}}{\partial r} + \nu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r\bar{v})}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} \right] \\ & - \left[\left(v' \frac{\partial v'}{\partial r} = \frac{\partial v' v'}{\partial r} - v' \frac{\partial v'}{\partial r} \right) + \left(u' \frac{\partial v'}{\partial x} = \frac{\partial u' v'}{\partial x} - v' \frac{\partial u'}{\partial x} \right) \right] \end{aligned} \quad (46d)$$

$$\begin{aligned} & \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial r} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} = -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial \bar{p}}{\partial r} + \nu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r\bar{v})}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} \right] \\ & - \left[\frac{\partial v' v'}{\partial r} + \frac{\partial u' v'}{\partial x} - \left(v' \frac{\partial u'}{\partial x} - v' \frac{\partial v'}{\partial r} = -\frac{v' v'}{r} \right) \right] \end{aligned} \quad (46e)$$

$$\begin{aligned} & \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial r} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} = -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial \bar{p}}{\partial r} + \nu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r\bar{v})}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} \right] \\ & - \left(\frac{\partial \bar{v} v'}{\partial r} + \frac{\partial \bar{u} v'}{\partial x} + \frac{\bar{v} v'}{r} \right) \end{aligned} \quad (46f)$$

Only final form of the energy equation is given below since above steps are repeated.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \bar{v} \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} + \bar{u} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} = \alpha \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial x^2} \right] \\ & - \left[\frac{\partial \bar{u} T'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v} T'}{\partial r} + \frac{\bar{T} v'}{r} \right] + \frac{\Phi}{\rho c_p} + \frac{\varepsilon}{\rho c_p} \end{aligned} \quad (47)$$

2.3 Turbulence modeling

In order to reduce number of unknowns in RD equations between (44)-(47), turbulence viscosity modeling can be used. For the present case, following modeling statements are written.

$$-\overline{u' u'} = \nu_T \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) - \frac{2}{3} k \quad (48)$$

$$-\overline{v' v'} = \nu_T \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial r} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial r} \right) - \frac{2}{3} k \quad (49)$$

$$-\overline{u' v'} = -\overline{v' u'} = \nu_T \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial r} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \quad (50)$$

with $\alpha_T = \frac{v_T}{\sigma_T}$ and $\sigma_T = 0.9$

$$-\overline{u'T'} = \alpha_T \frac{\partial \overline{T}}{\partial x} \quad (51)$$

$$-\overline{v'T'} = \alpha_T \frac{\partial \overline{T}}{\partial r} \quad (52)$$

(48)-(52) is written in (44)-(47) to give modeled equations for turbulent flow. Continuity equation is not written again because it does not contain fluctuating variables. Also, turbulent kinetic energy terms are absorbed in pressure terms. Residual turbulent kinetic energy term in radial momentum equation vanishes by reorganizing the equation. Reorganization also changes some terms due to continuity.

x-momentum;

$$\begin{aligned} \overline{v} \frac{\partial \overline{u}}{\partial r} + \overline{u} \frac{\partial \overline{u}}{\partial x} = & -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x} + v \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \overline{u}}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \overline{u}}{\partial x^2} \right] \\ & + \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[v_T \left(2 \frac{\partial \overline{u}}{\partial x} \right) - \frac{2}{3} k \right] + \frac{\partial}{\partial r} \left[v_T \left(\frac{\partial \overline{u}}{\partial r} + \frac{\partial \overline{v}}{\partial x} \right) \right] \right\} \\ & + \left\{ \frac{1}{r} \left[v_T \left(\frac{\partial \overline{u}}{\partial r} + \frac{\partial \overline{v}}{\partial x} \right) \right] \right\} \end{aligned} \quad (53a)$$

$$\begin{aligned} \overline{v} \frac{\partial \overline{u}}{\partial r} + \overline{u} \frac{\partial \overline{u}}{\partial x} = & -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial}{\partial x} \left(\overline{p} + \frac{2}{3} \rho_f k \approx \overline{p} \right) \\ & + v \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \overline{u}}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \overline{u}}{\partial x^2} \right] + v_T \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \overline{u}}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \overline{u}}{\partial x^2} \right] \\ & + v_T \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \overline{u}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v}}{\partial x} + \frac{\overline{v}}{r} = 0 \right) \end{aligned} \quad (53b)$$

$$\overline{v} \frac{\partial \overline{u}}{\partial r} + \overline{u} \frac{\partial \overline{u}}{\partial x} = -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x} + (v + v_T) \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \overline{u}}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \overline{u}}{\partial x^2} \right] \quad (53c)$$

r-momentum;

$$\begin{aligned} \overline{v} \frac{\partial \overline{v}}{\partial r} + \overline{u} \frac{\partial \overline{v}}{\partial x} = & -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial \overline{p}}{\partial r} + v \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r\overline{v})}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \overline{v}}{\partial x^2} \right] \\ & + \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left[v_T \left(2 \frac{\partial \overline{v}}{\partial r} \right) - \frac{2}{3} k \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[v_T \left(\frac{\partial \overline{v}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u}}{\partial r} \right) \right] \right\} \\ & + \left\{ \frac{1}{r} \left[v_T \left(2 \frac{\partial \overline{v}}{\partial r} \right) - \frac{2}{3} k \right] \right\} \end{aligned} \quad (54a)$$

$$\begin{aligned} \overline{v} \frac{\partial \overline{v}}{\partial r} + \overline{u} \frac{\partial \overline{v}}{\partial x} = & -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial}{\partial r} \left(\overline{p} + \frac{2}{3} \rho_f k \approx \overline{p} \right) \\ & + v \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r\overline{v})}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \overline{v}}{\partial x^2} \right] \end{aligned} \quad (54b)$$

$$\begin{aligned} \overline{v} \frac{\partial \overline{v}}{\partial r} + \overline{u} \frac{\partial \overline{v}}{\partial x} = & -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial \overline{p}}{\partial r} + v \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r\overline{v})}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \overline{v}}{\partial x^2} \right] \\ & + \left[2v_T \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial \overline{v}}{\partial r} \right) + v_T \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial \overline{v}}{\partial x} + v_T \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial \overline{u}}{\partial r} \right] \\ & + \left[2v_T \frac{1}{r} \left(\frac{\partial \overline{v}}{\partial r} \right) - \frac{1}{r} \frac{2}{3} k \right] \end{aligned} \quad (54c)$$

$$\begin{aligned} \overline{v} \frac{\partial \overline{v}}{\partial r} + \overline{u} \frac{\partial \overline{v}}{\partial x} = & -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial \overline{p}}{\partial r} + v \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r\overline{v})}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \overline{v}}{\partial x^2} \right] \\ & + \left[v_T \frac{\partial^2 \overline{v}}{\partial r^2} + v_T \frac{1}{r} \left(\frac{\partial \overline{v}}{\partial r} \right) + v_T \frac{\partial^2 \overline{v}}{\partial x^2} \right] \\ & + \left[v_T \frac{\partial^2 \overline{v}}{\partial r^2} + v_T \frac{1}{r} \left(\frac{\partial \overline{v}}{\partial r} \right) + v_T \frac{\partial}{\partial r} \frac{\partial \overline{u}}{\partial x} - \frac{1}{r} \frac{2}{3} k \right] \end{aligned} \quad (54d)$$

$$\begin{aligned} \overline{v} \frac{\partial \overline{v}}{\partial r} + \overline{u} \frac{\partial \overline{v}}{\partial x} = & -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial \overline{p}}{\partial r} + v \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r\overline{v})}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \overline{v}}{\partial x^2} \right] \\ & + \left[v_T \frac{\partial^2 \overline{v}}{\partial r^2} + v_T \frac{1}{r} \left(\frac{\partial \overline{v}}{\partial r} \right) + v_T \frac{\partial^2 \overline{v}}{\partial x^2} \right] \\ & + \left[v_T \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\overline{v}}{r} + \frac{\partial \overline{v}}{\partial r} + \frac{\partial \overline{u}}{\partial x} = 0 \right) + v_T \frac{\overline{v}}{r^2} - \frac{1}{r} \frac{2}{3} k \right] \end{aligned} \quad (54e)$$

$$\begin{aligned} \overline{v} \frac{\partial \overline{v}}{\partial r} + \overline{u} \frac{\partial \overline{v}}{\partial x} = & -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial \overline{p}}{\partial r} + v \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r\overline{v})}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \overline{v}}{\partial x^2} \right] \\ & + \left[v_T \left(\frac{\partial^2 \overline{v}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial \overline{v}}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \overline{v}}{\partial x^2} - \frac{\overline{v}}{r^2} + \frac{\overline{v}}{r^2} + \frac{\overline{v}}{r^2} \right) - \frac{1}{r} \frac{2}{3} k \right] \end{aligned} \quad (54f)$$

$$\begin{aligned} \overline{v} \frac{\partial \overline{v}}{\partial r} + \overline{u} \frac{\partial \overline{v}}{\partial x} = & -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial \overline{p}}{\partial r} + v \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r\overline{v})}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \overline{v}}{\partial x^2} \right] \\ & + v_T \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r\overline{v})}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \overline{v}}{\partial x^2} \right] + \left[2v_T \frac{\overline{v}}{r^2} - \frac{1}{r} \frac{2}{3} k \right] \end{aligned} \quad (54g)$$

$$\begin{aligned} \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial r} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} &= -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial \bar{p}}{\partial r} \\ + (v + v_T) \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r\bar{v})}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} \right] \\ + \left[2v_T \frac{1}{r} \left(\frac{\bar{v}}{r} \right) - \frac{1}{r} \frac{2}{3} k \right] \end{aligned} \quad (54h)$$

$$\begin{aligned} \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial r} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} &= -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial \bar{p}}{\partial r} \\ + (v + v_T) \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r\bar{v})}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} \right] \\ + \left[2v_T \frac{1}{r} \left(-\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \frac{\partial \bar{v}}{\partial r} \right) - \frac{1}{r} \frac{2}{3} k \right] \end{aligned} \quad (54i)$$

$$\begin{aligned} \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial r} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} &= -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial \bar{p}}{\partial r} \\ + (v + v_T) \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r\bar{v})}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} \right] \\ + \left[-\frac{1}{r} \left(2v_T \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + 2v_T \frac{\partial \bar{v}}{\partial r} \right) - \frac{1}{r} \frac{2}{3} k \right] \end{aligned} \quad (54j)$$

$$\begin{aligned} \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial r} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} &= -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial \bar{p}}{\partial r} \\ + (v + v_T) \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r\bar{v})}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} \right] \\ + \left[-\frac{1}{r} \left(-u'u' + \frac{2}{3} k - v'v' + \frac{2}{3} k \right) - \frac{1}{r} \frac{2}{3} k \right] \end{aligned} \quad (54k)$$

$$\begin{aligned} \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial r} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} &= -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial \bar{p}}{\partial r} \\ + (v + v_T) \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r\bar{v})}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} \right] \\ + \left[\frac{1}{r} (u'u' + v'v' = 2k) - \frac{1}{r} 2k \right] \end{aligned} \quad (54l)$$

$$\begin{aligned} \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial r} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} &= -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial \bar{p}}{\partial r} \\ + (v + v_T) \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r\bar{v})}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} \right] \end{aligned} \quad (54m)$$

Above procedure is valid for the energy equation. Therefore, only final form is given below.

$$\begin{aligned} \left[\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \bar{v} \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} + \bar{u} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} \right] \\ = \left(\frac{k}{\rho c_p} + \alpha_T \right) \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial x^2} \right] + \frac{\Phi}{\rho c_p} + \frac{\varepsilon}{\rho c_p} \end{aligned} \quad (55)$$

A way of calculating turbulent viscosity is using k-ε turbulence modeling approach. The relation between turbulent kinetic energy, dissipation and turbulent viscosity is given in (56).

$$v_T = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (56)$$

$$C_\mu = 0.09 \quad (57)$$

Derivation of equations for turbulent kinetic energy and its dissipation is explained in [4,6]. In order to obtain turbulent kinetic energy equation, momentum equations before decomposition are multiplied by velocity components in their respected direction. Obtained equations are decomposed and time averaged. Then those equations are put together to form a single equation. Similarly, decomposed and time averaged momentum equations are multiplied by time averaged velocity components in their direction. Those equations are also added together. This second summation forms kinetic energy equation of the mean flow. When second summation is subtracted from first summation, turbulent kinetic energy is obtained. Dissipation equation requires additional and different approaches. Obtained turbulent kinetic energy and dissipation equations are modeled by using turbulent viscosity approach. This is required because those equations have triple correlations of fluctuating terms. This complex process can lead practitioners to mistakes. Instead, vector form from [1] is used again in order to write k and ε equations in cylindrical coordinates.

$$\nabla[(\rho v k)] = \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + \mu_T \Phi - \rho \varepsilon \quad (58)$$

$$\nabla[(\rho v \varepsilon)] = \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{\varepsilon,1} \frac{\varepsilon}{k} \mu_T \Phi - C_{\varepsilon,2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (59)$$

Model constants are $\sigma_k = 1$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$, $C_{\varepsilon,1} = 1.44$ and $C_{\varepsilon,2} = 1.92$.

The final forms of turbulent kinetic energy and dissipation equations in cylindrical coordinates are given in (60) and (61).

Turbulent kinetic energy model equation;

$$\begin{aligned} \bar{u} \frac{\partial k}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial k}{\partial r} &= \left(\frac{\nu_T}{\sigma_k} \right) \left[\frac{\partial^2 k}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial k}{\partial r} \right) \right] \\ + \nu_T &\left\{ \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial r} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right)^2 + 2 \left[\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\bar{v}}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial r} \right)^2 \right] \right\} - \varepsilon \end{aligned} \quad (60)$$

Turbulent kinetic energy dissipation equation;

$$\begin{aligned} \bar{u} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} &= \left(\frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \left[\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right) \right] \\ + C_{\varepsilon,1} \frac{\varepsilon}{k} \nu_T &\left\{ \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial r} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right)^2 + 2 \left[\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\bar{v}}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial r} \right)^2 \right] \right\} \\ - C_{\varepsilon,2} \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (61)$$

Standard k - ε turbulence model necessitates wall functions since isotropic turbulence assumption is not valid near walls. Viscous sub-layer and logarithmic layers are solved by means of wall functions as source terms. Related standard wall functions are written below after the arrangement for cylindrical coordinates.

x -momentum wall function that models wall stress

$$-\frac{\tau_w}{\rho_f} A_w = -\frac{C_\mu^{1/4} k^{1/2} \bar{u}}{\frac{1}{\kappa} \ln \left(E \frac{C_\mu^{1/4} k^{1/2} (r_w - r)}{\nu} \right)} r \Delta x \quad (62)$$

where $\kappa=0.41$ and $E=9.793$.

Wall function for k equation production and dissipation terms;

$$\begin{aligned} (P_k - \varepsilon) \Delta V \\ = \left[\frac{\tau_w}{\rho_f (r_w - r)} \bar{u} - \frac{C_\mu^{3/4} k^{3/2} \ln \left(E \frac{C_\mu^{1/4} k^{1/2} (r_w - r)}{\nu} \right)}{\kappa (r_w - r)} \right] r \Delta r \Delta x \end{aligned} \quad (63)$$

Wall function for ε value at the calculation node;

$$\varepsilon = \frac{C_\mu^{3/4} k^{3/2}}{\kappa (r_w - r)} \quad (64)$$

Generally numerical grid is arranged for flow solution. Accordingly, the node at which wall function of the energy equation is solved can lie in

linear or logarithmic layers. Therefore, two types of wall functions are given below for the energy equation. These wall functions calculate the wall heat flux.

For logarithmic layer;

$$\frac{q_w A_w}{\rho c_p} = \frac{(T_w - T) C_\mu^{1/4} k^{1/2}}{\sigma_T \left[\frac{1}{\kappa} \ln \left(E \frac{C_\mu^{1/4} k^{1/2} (r_w - r)}{\nu} \right) + P \right]} r \Delta x \quad (65)$$

P in (65) is a function described in [8],[9] and it is given below.

$$P = 9.24 \left[\left(\frac{\text{Pr}}{\sigma_T} \right)^{3/4} - 1 \right] \left[1 + 0.28 e^{-0.007 \left(\frac{\text{Pr}}{\sigma_T} \right)} \right] \quad (66)$$

Wall function for the energy equation in linear region is given below.

$$\frac{q_w A_w}{\rho c_p} = \frac{(T_w - T) C_\mu^{1/4} k^{1/2}}{\text{Pr} \frac{C_\mu^{1/4} k^{1/2} (r_w - r)}{\nu}} r \Delta x \quad (67)$$

2.4 Nondimensionalization

The last step is making equations non-dimensional. Following parameters are proposed for this process.

$$u^* = \frac{\bar{u}}{u_0} \quad (68)$$

$$v^* = \frac{\bar{v}}{u_0} \quad (69)$$

$$T^* = \frac{\bar{T} - T_0}{T_1 - T_0} \quad (70)$$

$$x^* = \frac{x}{2r_w} \quad (71)$$

$$r^* = \frac{r}{2r_w} \quad (72)$$

$$d^* = d_{wf} = \frac{d}{2r_w} \quad (73)$$

$$k_{wf} = \frac{k_w}{k_f} \quad (74)$$

$$\alpha_{wf} = \frac{\alpha_w}{\alpha_f} \quad (75)$$

$$t^* = \frac{t\alpha_f}{4r_w^2} = \text{Fo} \quad (76)$$

$$P^* = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho u_0^2} \quad (77)$$

$$k^* = \frac{k}{\frac{u_0^2}{2}} \quad (78)$$

$$\varepsilon^* = \frac{\varepsilon}{\frac{u_0^3}{2r_w}} \quad (79)$$

$$v_T^* = \frac{v_T}{u_0 2r_w} \quad (80)$$

$$\alpha_T^* = \frac{\alpha_T}{u_0 2r_w} \quad (81)$$

$$q_w^* = \frac{q_w 2r_w}{k(T_1 - T_0)} \Rightarrow \quad (82)$$

$$q_w^* = \frac{\text{Pe}(T_w^* - T_{fp}^*) C_\mu^{1/4} k^{*3/2}}{\sqrt{2}\sigma_T \left[\frac{1}{\kappa} \ln \left(E \frac{C_\mu^{1/4} k^{*3/2} \text{Re}(0.5 - r^*)}{\sqrt{2}} \right) + P \right]}$$

$$\text{Re} = \frac{u_0 2r_w}{\nu} \quad (83)$$

$$\text{Pr} = \frac{\mu c_p}{k} = \frac{\nu \rho c_p}{k} \quad (84)$$

$$\text{Pe} = \frac{2r_w u_0 \rho c_p}{k} = \frac{2r_w u_0}{\alpha} \quad (85)$$

$$\text{Ec} = \frac{u_0^2}{c_p (T_1 - T_0)} \quad (86)$$

Dimensionless governing equations are given in the following by using above dimensionless parameters. Their order is; continuity equation, x momentum and r momentum equations, turbulent kinetic energy and turbulent kinetic energy dissipation equations, energy equation and wall functions.

$$\frac{\partial v^*}{\partial r^*} + \frac{v^*}{r^*} + \frac{\partial u^*}{\partial x^*} = 0 \quad (87)$$

$$v^* \frac{\partial u^*}{\partial r^*} + u^* \frac{\partial u^*}{\partial x^*} = -\frac{1}{2} \frac{\partial p^*}{\partial x^*} \quad (88)$$

$$+ \left(\frac{1}{\text{Re}} + v_T^* \right) \left[\frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial r^*} \left(r^* \frac{\partial u^*}{\partial r^*} \right) + \frac{\partial^2 u^*}{\partial x^{*2}} \right]$$

$$v^* \frac{\partial v^*}{\partial r^*} + u^* \frac{\partial v^*}{\partial x^*} = -\frac{1}{2} \frac{\partial p^*}{\partial r^*} \quad (89)$$

$$+ \left(\frac{1}{\text{Re}} + v_T^* \right) \left[\frac{\partial}{\partial r^*} \left(\frac{1}{r^*} \frac{\partial r^* v^*}{\partial r^*} \right) + \frac{\partial^2 v^*}{\partial x^{*2}} \right]$$

$$u^* \frac{\partial k^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial k^*}{\partial r^*} = \left(\frac{v_T^*}{\sigma_k} \right) \left[\frac{\partial^2 k^*}{\partial x^{*2}} + \frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial r^*} \left(r^* \frac{\partial k^*}{\partial r^*} \right) \right] \quad (90)$$

$$+ 2v_T^* \left\{ \left(\frac{\partial u^*}{\partial r^*} + \frac{\partial v^*}{\partial x^*} \right)^2 + 2 \left[\left(\frac{\partial u^*}{\partial x^*} \right)^2 + \left(\frac{v^*}{r^*} \right)^2 + \left(\frac{\partial v^*}{\partial r^*} \right)^2 \right] \right\} - 2\varepsilon^*$$

$$u^* \frac{\partial \varepsilon^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial \varepsilon^*}{\partial r^*} = \left(\frac{v_T^*}{\sigma_\varepsilon} \right) \left[\frac{\partial^2 \varepsilon^*}{\partial x^{*2}} + \frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial r^*} \left(r^* \frac{\partial \varepsilon^*}{\partial r^*} \right) \right]$$

$$+ 2C_{\varepsilon,1} \frac{\varepsilon^*}{k^*} v_T^* \left\{ \left(\frac{\partial u^*}{\partial r^*} + \frac{\partial v^*}{\partial x^*} \right)^2 + 2 \left[\left(\frac{\partial u^*}{\partial x^*} \right)^2 + \left(\frac{v^*}{r^*} \right)^2 + \left(\frac{\partial v^*}{\partial r^*} \right)^2 \right] \right\} \quad (91)$$

$$- 2C_{\varepsilon,2} \frac{\varepsilon^{*2}}{k^*}$$

$$v_T^* = \frac{C_\mu k^*}{4 \varepsilon^*} \quad (92)$$

$$\frac{1}{\text{Pe}} \frac{\partial T^*}{\partial t^*} + v^* \frac{\partial T^*}{\partial r^*} + u^* \frac{\partial T^*}{\partial x^*}$$

$$= \left(\frac{1}{\text{Pe}} + \alpha_T^* \right) \left[\frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial r^*} \left(r^* \frac{\partial T^*}{\partial r^*} \right) + \frac{\partial^2 T^*}{\partial x^{*2}} \right] \quad (93)$$

$$+ \frac{\text{Ec}}{\text{Re}} \Phi^* + \text{Ec} \varepsilon^*$$

$$- \tau_w^* A_w^* = - \frac{C_\mu^{1/4} k^{*3/2} u^*}{\sqrt{2} \ln \left(EC_\mu^{1/4} k^{*3/2} \frac{\text{Re}}{\sqrt{2}} (0.5 - r^*) \right)} r^* (\Delta x)^* \quad (94)$$

$$2(P_k^* - \varepsilon^*) \Delta V^* = 2 \left[\frac{\frac{C_\mu^{1/4} k^{*3/2} u^{*2}}{\sqrt{2} \ln \left(EC_\mu^{1/4} k^{*3/2} \frac{\text{Re}}{\sqrt{2}} (0.5 - r^*) \right)} (0.5 - r^*)}{C_\mu^{3/4} k^{*3/2} \ln \left(EC_\mu^{1/4} k^{*3/2} \frac{\text{Re}}{\sqrt{2}} (0.5 - r^*) \right)} \right] r^* (\Delta r)^* (\Delta x)^* \quad (95)$$

$$\varepsilon^* = \frac{C_\mu^{3/4} k^{*3/2}}{2^{3/2} \kappa (0.5 - r^*)} \quad (96)$$

$$\frac{q_w^* A_w^*}{\text{Pe}} = \frac{(T_w^* - T^*) C_\mu^{1/4} k^{3/2}}{\sqrt{2} \sigma_\tau \left[\frac{1}{\kappa} \ln \left(E \frac{C_\mu^{1/4} k^{3/2}}{\sqrt{2}} \text{Re}(0.5 - r^*) \right) + P \right]} r^* (\Delta x)^* \quad (97)$$

$$\frac{q_w^* A_w^*}{\text{Pe}} = \frac{(T_w^* - T^*)}{\text{Pr Re}(0.5 - r^*)} r^* (\Delta x)^* \quad (98)$$

Finally, dimensionless wall coordinate is derived from y^* by using k - ϵ turbulence model.

$$y^* = \frac{C_\mu^{1/4} k^{1/2} (r_w - r)}{\nu} = \frac{C_\mu^{1/4} k^{3/2} \text{Re}(0.5 - r^*)}{\sqrt{2}} \quad (99)$$

In the next section, this formulation flow and its implications are evaluated.

3. Implications

The first point to be addressed in the governing equations written in cylindrical coordinates is additional terms containing $1/r$. From geometrical and physics point of view, these terms emerge due to increasing surface area of a differential volume as radius increases. In order to conserve mass, for instance, velocity in radial direction should decrease; otherwise mass would be generated due to increasing arc area. This phenomenon is tried to be illustrated by Figure 3. Figure 3 is a pseudo-schematic arrangement in which flow enters the domain having only axial velocity component and exits with only radial velocity component. This fictional domain has nothing to do with the derivational procedure of the previous section. It is drawn only for physical reasoning.

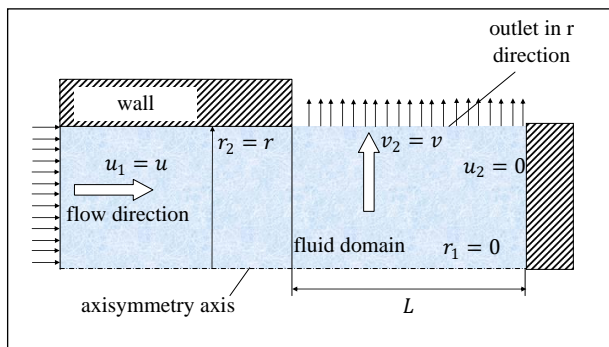


Figure 3. Schematics for illustrating $1/r$ terms by continuity.

For a 2D axisymmetric control volume as depicted in Figure 3, continuity can be written by a sequence of mathematical operations given in (100)-(107). Since mass is conserved, inlet and outlet mass flow rates are equal. Therefore, the relation between axial and radial velocities can be expressed as (102). Taking partial spatial derivatives of velocity components and summing them for conservation of mass flow rate should necessitate a deficit as ΔV since there should be additional term for continuity. After reorganization, the additional term is found as in (107).

$$\dot{m} = \rho VA \quad (100)$$

$$\frac{\rho u \pi r^2}{2\pi} = \rho v \left[\left(\frac{2\pi}{2\pi} \right) r L \right] \quad (101)$$

$$\frac{ur}{2} = vL \quad (102)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u_2 - u_1}{L} = \frac{0 - u}{L} = -\frac{u}{L} = -\frac{\frac{2vL}{r}}{L} = -\frac{2v}{r} \quad (103)$$

$$\frac{\partial v}{\partial r} = \frac{v_2 - v_1}{r_2 - r_1} = \frac{v - 0}{r - 0} = \frac{v}{r} \quad (104)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial r} + \Delta V = 0 \quad (105)$$

$$-\frac{2v}{r} + \frac{v}{r} + \Delta V = 0 \quad (106)$$

$$\Delta V = \frac{v}{r} \quad (107)$$

Next issue is the appearance of Reynolds stresses (turbulent stresses) and turbulence modeling in momentum equations. Reynolds stresses have negative sign comparing with viscous diffusion of momentum while modeled turbulence terms have positive sign. In order to explain this phenomenon an illustrative example is presented. A probe immersed in developed steady turbulent pipe flow at the symmetry axis would measure an axial velocity as in Figure 4. Of course, this schematic illustration is for identifying components of the measured velocity and roles of turbulence and turbulence modeling on them. Axial velocity, fluctuating with time for steady regime has two

components; time averaged constant component and fluctuating component that has different values by time. Turbulent stresses or Reynolds stresses disturb layers of laminar flow, decreasing effects of molecular viscosity towards symmetry axis. However, these stresses have their energy cost and hence they have contribution to pressure drop of the flow. As local velocity increases, turbulence also increases and acts as a regulator. This is resulted with a relatively lower developed velocity at symmetry axis comparing with the laminar flow case. Modeled terms induce this effect with a different mechanism. They reduce flow energy with a pseudo viscosity (turbulence viscosity) that changes its value locally. In other words, Reynolds stresses decrease the effects of diffusion of laminar stresses while modeled turbulence decreases momentum flux and hence flow energy.

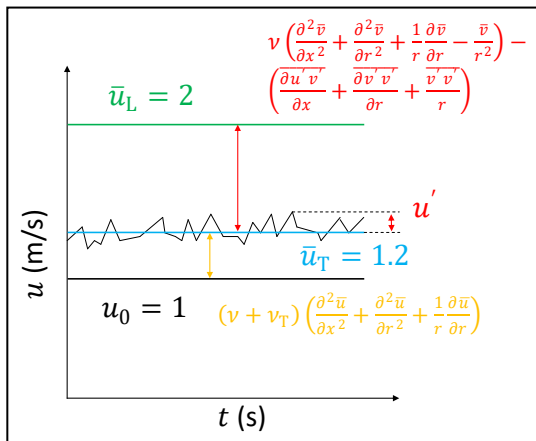


Figure 4. Schematics for dimensionless axial velocity component at symmetry axis for a pipe flow.

A similar projection can be made for pipe flow axial velocity profile in radial direction (Figure 5). While turbulent stresses make velocity profile less parabolic, turbulence modeling extract energy from uniform velocity profile to reach the same power-law profile.

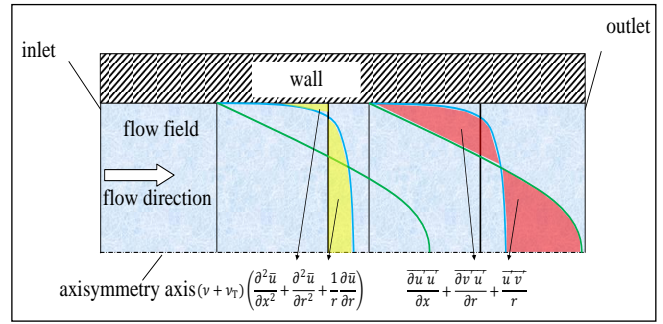


Figure 5. Schematics for velocity profiles, Reynolds stresses and modelled turbulence terms.

Next focus is on non-dimensionalization. For making governing equations non-dimensional, simple scales are preferred, aiming Reynolds number the only parameter for momentum equations. For hydrodynamic investigation, only length and velocity scales are used as pipe radius and inlet velocity respectively. This leads to Reynolds number and dimensionless turbulent viscosity in the momentum equations. Since turbulent viscosity is calculated, only independent parameter to be investigated is Reynolds number.

Temperature in energy equation is not just dimensionless but also normalized. This is desired because it limits the investigation to an interval where all assumptions such as constant viscosity are valid, and no additional measures are taken.

The scales for nondimensionalization lead to Pe and Ec/Re in energy equation. Ec/Re appears as a parameter for viscous dissipation and Ec is for turbulent dissipation. Normally, Ec number is used as a parameter for viscous heating and Mach number (Ma) is also stated as a limit to evaluation of viscous heating versus Ec number. The nondimensionalization process intrinsically yields Ec/Re but physically this combination induces effects of solid boundaries and viscosity. Therefore, it is planned to conduct a CFD analysis in future to see viscous heating for various values of Ec/Re .

4. Conclusion and Remarks

In this work, governing equations for CFD are written in cylindrical coordinates explicitly by using vector forms as starting point and vector operations

for extracting them into final forms. Important points in vector operations special to cylindrical coordinates are emphasized. Means of reorganization are explained. Equations are then simplified for 2D axisymmetric incompressible turbulent flow. Some parameters are proposed for making equations non-dimensional. Following remarks can be given:

- Writing governing equations explicitly for a specific coordinate system seems to be applied best by using vector forms of the equations as a starting point.
- Special care should be given to vector operators and operations since they change according to coordinate system.
- Continuity equation in the chosen coordinate system is devised several times in order to reorganize equations. Some terms in the reorganized equations constitute continuity equation and hence they are equal to "0". The terms that emerge during reorganization of Reynolds Decomposition equations in order to have double correlation of fluctuating velocity components are cancelled by this way. Some of the additional terms that emerge with the application of turbulent viscosity approach in order to replace fluctuating terms are also cancelled by this way.
- Making governing equations non-dimensional needs careful decisions in order to have dimensionless numbers of interest in the governing equations. Also, it is recommended to use primitive constants such as inlet velocity.
- Using normalized temperature instead of non-dimensional temperature is necessary to stay in the interval of assumptions such as constant viscosity.
- Although turbulence modeling and Reynolds stresses lead to the same velocity profiles, their mechanism are different, and they effect on different phenomena.

Acknowledgement

Present content is partly taken and partly derived from Ph.D. thesis of Canli (2020).

5. References

- Anderson, D.A., Tannehill, J.C., Pletcher, R.H., 1984. Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer. USA, Hemisphere publishing corporation, 181-235.
- Anonymous, 2009. ANSYS FLUENT 12.0. Theory Guide. ANSYS, Inc., 4:1-4:58.
- Canli, E., 2020. Numerical solution of transient conjugated heat transfer in thick walled pipes with turbulent flow. Ph.D. Thesis, Selcuk University Institute of Sciences, Konya, Turkey, 153.
- Happel, J., Brenner, H., 2012. Low Reynolds number hydrodynamics: with special applications to particulate media. 1, Springer Science & Business Media, 474-524.
- Jayatileke, C.L.V., 1966. The influence of Prandtl number and surface roughness on the resistance of the laminar sub-layer to momentum and heat transfer. PhD Thesis, Imperial College of Science and Technology, London, UK, 271.
- Launder, B.E., Spalding, D.B, 1974. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **3(2)**, 269-289.
- Moukalled, F., Mangani, L., Darwish, M., 2016. The finite volume method in computational fluid Dynamics. 113, Berlin, Germany, Springer, 9-82.
- Patankar, S., 1980. Numerical heat transfer and fluid flow. London, CRC Press, 25-139.
- Tennekes, H., Lumley, J., 1972. A first course in turbulence. The MIT Press, 149-248.
- Versteeg, H.K., Malalasekera, W., 2007. An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method. Pearson education, 40-281.

Nomenclature

A_w	Wall surface area (m ²)
α	Thermal diffusivity coefficient (m ² /s)
α_T	Turbulent thermal diffusivity coefficient (m ² /s)

α_{wf}	Wall to fluid thermal diffusivity coefficient ratio	v	Radial velocity (m/s)
C_μ	Turbulence model coefficient	V	Velocity (m/s)
$C_{\varepsilon,1}$	Turbulence model coefficient	w	Azimuthal velocity (m/s)
$C_{\varepsilon,2}$	Turbulence model coefficient	x	Cartesian coordinate direction / Cylindrical coordinate axial direction
c_p	Specific heat (J/kgK)	y	Cartesian coordinate direction
d_{wf}	Wall to fluid thickness ratio	y^+	Dimensionless wall coordinate
e	Energy (J)	y^*	Dimensionless wall coordinate by turbulence model
\hat{e}_x	Unit vector in axial direction	z	Cartesian coordinate direction
\hat{e}_r	Unit vector in radial direction		
\hat{e}_θ	Unit vector in azimuthal direction		
ε	Turbulence kinetic energy dissipation (m^2/s^3)		
E	Wall function coefficient		
Ec	Eckert number		
f	Force vector (N)		
Φ	Viscous dissipation (W/m^3)		
Fo	Fourier number		
I	Identity tensor		
k	Turbulence kinetic energy (m^2/s^2) / Thermal conduction coefficient (W/mK)		
k_{wf}	Wal to fluid thermal conduction coefficient ratio		
\mathcal{K}	von Karman constant		
L	Length (m)		
λ	Bulk viscosity (kg/ms)		
μ	Dynamic viscosity (kg/ms)		
μ_T	Turbulent dynamic viscosity (kg/ms)		
ν	Kinematic viscosity (m^2/s)		
ν_T	Turbulent kinematic viscosity (m^2/s)		
p	Pressure (Pa)		
P	Pee function		
P_k	Turbulence kinetic energy production (m^2/s^3)		
Pe	Peclet number		
Pr	Prandtl number		
\dot{q}_s	Surface heat generation (W)		
\dot{q}_v	Volume heat generation (W)		
q_w	Wall heat flux (W)		
r	Cylindrical coordinate radial direction		
r_w	Radius (m)		
ρ	Density (kg/m^3)		
ρ_f	Fluid density (kg/m^3)		
Re	Reynolds number		
σ_ε	Turbulence model coefficient		
σ_k	Turbulence model coefficient		
σ_T	Turbulent Prandtl number		
T	Temperature (K)		
T_w	Wall temperature (K)		
T_0	Initial temperature (K)		
T_1	Boundary condition temperature (K)		
t	Time (s)		
$()^T$	Transpose		
τ	Shear stress (Pa)		
τ_w	Wall shear stress (Pa)		
θ	Cylindrical coordinate azimuthal direction		
u	Axial velocity (m/s)		
u_0	Inlet velocity (m/s)		
u_L	Laminar axial velocity (m/s)		
u_T	Turbulent axial velocity (m/s)		
v	Velocity vector (m/s)		

AKÜ FEMÜBİD 20 (2020) 065902 (1112-1123)

AKU J. Sci. Eng. 20 (2020) 065902 (1112-1123)

DOI: 10.35414/akufemubid.637356

Araştırma Makalesi / Research Article

Göller Bölgesi İklim Verilerinin Matematiksel Modellenmesi

Tansel KOYUN¹, Burakhan DOĞAN²¹⁻²SÜLEYMAN DEMİREL Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, IspartaSorumlu yazar ¹e-posta: tanselkoyun@sdu.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5625-2413>²e-posta: hburak.0513@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6364-8822>

Geliş Tarihi: 24.10.2019

Kabul Tarihi: 20.11.2020

Öz

Bu çalışmada, Türkiye'de yer alan Göller Bölgesi kentleri (Afyon, Antalya, Burdur, Isparta, Konya) 2009-2018 dönemi ait sıcaklık, maksimum-minimum sıcaklık, nispi nem, aktüel basınç, parametreleri ele alınarak matematiksel bir model oluşturmak hedeflenmiştir. Bu amaçla eğri uydurmada tercih edilen Gauss, Sinüslerin toplamı ve Fourier modelleri kullanılarak matematiksel bir model oluşturulmuştur. Modeli oluşturmada iki farklı yöntem izlenmiştir. İlk kullanılan yöntem tahmin ve ölçüm metodu, ikinci kullanılan yöntem ise aritmetik ortalama metodudur. Kullanılan iki metodu göz önünde bulundurarak karekök ortalama hatası ve belirlilik katsayısı değerleri dikkate alınarak uygun metod belirlenmiştir. En iyi sonucu veren ampirik model Göller Bölgesi için istenilen parametrenin matematiksel modeli olarak kabul edilmiştir. Matematiksel model olarak sırasıyla; ortalama, maksimum ve minimum sıcaklık için Sinüslerin toplamı modeli, nispi nem için Gauss modeli ve aktüel basınç için ise Fourier modeli kullanılmıştır. Modellerin terim sayısı artırıldığında belirlilik katsayısının da iyileşme olurken karekök ortalama hata da ise yüksek bir artışın görülmüştür. Bu nedenle, 3 terimli modeller seçilerek yüksek doğrulukta tahminler yapılmıştır. Çalışmada, güneş pilleri, güneş kolektörleri, ısıtma soğutma ve havalandırma tesisatları, seralar gibi değişken iklim parametrelerine bağlı sistemlerin tasarım ve hesaplama aşamasında kabul seviyede veri sunmayı hedeflenmiştir. Aynı zamanda yüksek hassasiyetli tahminler için, daha lokal, beşeri ve çevresel etmenlerin dahil olduğu modellerin geliştirilmesi gerektiği sonucuna da varılmıştır.

Anahtar kelimeler

Göller bölgesi;
Matematiksel model;
İklim verileri;
Eğri uydurma

Mathematical Modelling of Lake Region Climate Data

Abstract

This study aims to create a mathematical model for the cities of the Lakes region (Afyon, Antalya, Burdur, Isparta, Konya) of Turkey, for 2009-2018 period, by considering maximum temperature, minimum temperature, relative humidity, pressure. For this purpose, a mathematical model was created using Gauss, sum of sines and Fourier models, which are preferred in curve fitting. Two different methods were used to form the model. The first method is the estimation and measurement method and the second one is the arithmetic mean method. Considering the two methods used, square root mean error and determination coefficient values were taken into consideration and the appropriate method was determined. The empirical model which gives the best results is accepted as the mathematical model of the desired parameters for the Lakes Region. As a mathematical model, respectively; The sum of sines model for average, maximum and minimum temperature, Gauss model for relative humidity and Fourier model for actual pressure. When the number of terms of the models was increased, the coefficient of determination improved, while a high increase in the square root mean error was observed. Therefore, high accuracy estimates were made by choosing 3-term models. Climate parameters and data are needed during the design and calculation phase of systems with respect to variable climate parameters such as solar cells, solar collectors, greenhouses, heating, cooling and ventilation systems. It was also concluded that models having more local, human and environmental factors should be developed in order to make accurate long term forecasts.

Keywords

Lake region;
Mathematical model;
Climate data;
Curve fitting

1. Giriş

Göller bölgesi coğrafi olarak Türkiye'nin güneyinde, Akdeniz, Ege ve İç Anadolu bölgesi sınırları içinde yer almakta olup farklı iklim şartlarını bir arada bulundurmaktadır. Göller Bölgesi sınırlarında yer alan Afyon, Antalya, Burdur, Isparta ve Konya kentleri için ortak bir model elde etmek amacıyla bu çalışma yapılmıştır. Bu konu ile ilgili yapılan çalışmalar aşağıda görülmektedir.

Ankara için 2007 ve 2016 yıllarına arasındaki aylık toplam global güneş ışınım şiddeti, aylık toplam güneşlenme süresi ve aylık ortalama hava sıcaklığı verilerinin ortalamalarını polinom, gauss, ve fourier eğri metotları ile modellemişlerdir. Sonuç olarak fotovoltaik enerji sistemlerinin kurulumları için etkili çıkarımlar elde etmişlerdir (Yeşilbudak vd. 2018). Çalışmalarında, Doğu Anadolu bölgesindeki on üç kentin 1994-2003 yılları arasındaki iklim verilerini ele alarak en sıcak, en soğuk, en nemli, rüzgarlı, yağmurlu, solar radyasyon alan şehirleri tespit etmişlerdir. Ayrıca regresyon modeli ile hesaplanan ve ölçüm sonuçları grafikler halinde kıyaslanmıştır (Akpınar ve Akpınar 2010). Çalışmalarında, Oman kentine ait dokuz iklim verisi regresyon metotları kullanılarak polinom ve trigonometrik fonksiyonlar yardımı ile modelleme yapmışlardır (Dorvlo ve Ampratwum 1999). Çalışmalarında, yatay yüzeylerde global güneş radyasyonu tahmin etmek için ampirik modelleri karşılaştırarak en uygun olan doğrusal regresyon modelini Tunus'a uyarlamıştır (Chelbi vd. 2015). Çalışmasında, Türkiye'nin farklı bölgelerinde yer alan İstanbul, İzmir, Ankara, Samsun, Şanlıurfa, Antalya ve Iğdır kentlerinin aylık ortalama günlük güneş radyasyonu ekserjisini tahmin etmek için farklı regresyon modelleri geliştirmiş ve elde edilen regresyon modelleri yüksek belirlilik katsayısına sahip olup benzer ilkime sahip bölgelere uyarılana bileceği sonucuna varmıştır (Arslan, 2015). Fırat havzasında bulunan Elazığ, Diyarbakır, Şanlıurfa ve Mardin illerine ait yıllık ortalama sıcaklık, kış ayları için en düşük sıcaklık, yaz ayları için en yüksek sıcaklık ve bağıl nem verilerini; polinom, Üstel denklem ve doğrusal denklem modellerini kullanılarak modelleme yapmıştır.

Çalışmanın ülke genelinde dış sıcaklık parametresinin güncellenmesine yardımcı olacağı sonucuna varılmıştır (Biçer 2019). Çalışmalarında, Muğla kentinin aylık ortalama global güneş ışınım şiddeti için farklı modeller kullanılarak karşılaştırma yapılmışlardır. Muğla kenti için Ocak-Haziran, Temmuz-Aralık dönemleri için sırasıyla kübik ve kuadrit modelin en uygun model olduğu çıkarımını yapmışlardır (Bayrakçı vd. 2018). Çalışmasında Van'ın 1993-2007 dönemine ait yüzey sıcaklığı, güneşlenme süresi ve global güneş radyasyonu verilerini incelemiş ve bölgenin güneş potansiyeli ile ilgili yapılacak çalışmalar için gerekli çıkarımlar yapmıştır (Uçkan 2018). Orta çözünürlük görüntüleme spektrometre ürünlerine dayanan, tüm hava koşullarında sıcaklığın tahmin edilmesine yönelik bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada tahmin sonucu ile elde edilen değerler ile ölçüm değerleri arasındaki uyum grafikler halinde belirtilmiştir (Zhu vd. 2017). İstanbul'un Büyükçekmece ilçesinde yer alan Eskice bölgesinin 2016 yılına ait güneş radyasyonu, rüzgâr şiddeti, UV radyasyon indis, toprak üstü 5-2 m sıcaklık ve rüzgâr yönü verileri kullanılarak; yapay sinir ağları ve çoklu lineer regresyon modelleri ile ileriye dönük orta ve uzun vadeli güneş radyasyonu için tahminler yapmışlardır. Çalışmada iklimsel ve meteorolojik olayların yapılan tahminler de etkili olduğu, yüksek performanslı tahminler yapabilmeleri için mevsimsel ve aylık modellemeler yapılması gerektiği sonucuna varmışlardır (Gabrالی ve Aslan 2020). Çalışmasında, global güneş radyasyonu tahmin etmek için bir model geliştirmiştir. Model logaritmik bir fonksiyon olup değişkenler için bulut katsayısı ve saat açısını kullanılmıştır. Elde edilen model ile literatürde yer alan 8 farklı model Çankırı ili özelinde test edilmiştir. Elde edilen modelin karşılaştırılan modellerden daha iyi sonuç verdiği görülmüştür (Külcü, 2019). Çalışmalarında, incelemeler yapılacak noktanın sıcaklık tahmini yapmak için rakım, basınç ve nem parametreleri kullanılarak coğrafi ve rakım ağırlıklı regresyon modelini (GAWR) oluşturmuşlardır. Model yardımı ile yapılan tahmin incelediğinde, karmaşık arazi koşulları ve de yükseltinin fazla olduğu noktalarda coğrafi ve rakım ağırlıklı

regresyon modeli (GAWR) kullanılabileceği sonucuna varılmıştır (Taşyürek ve Çelik 2020). Çalışmalarında, Antalya da bulunan 17932 numaralı istasyondan 1976-2017 dönemine ait aylık ortalama sıcaklık ve yıllık ortalama sıcaklık verileri sırası ile Mann-Kendall Sıra Korelasyon testi ve grafiksel yöntem ile incelemişlerdir. İncelemeler sonucunda 1976-2017 döneminde ortalama sıcaklığın artma trendin de olduğu görülmüş olup, küresel ısınma, iklim değişikliği ve tarım politikalarının birbirleri ile birlikte değerlendirilmeleri gerektiği sonucuna varılmıştır (Özfidaner vd. 2018). Isparta kenti için aylık ortalama günlük global güneş radyasyonunu tahmin etmek adına literatürde yer alan modellerin istatistiksel verileri karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. İncelenen dört farklı model içinden en uygun modelin 18c olduğu sonucuna varılmıştır. Sonuç olarak, Isparta kenti için yeni, özgün modeller geliştirilmesi gerektiğine vurgu yapılmıştır (Öztürk vd. 2011). Şanlıurfa ilinin global güneş radyasyonun tahmin edilmesi için literatürde yer alan 5 farklı model incelenmiştir. Modeller istatistiksel olarak belirlilik katsayısı (R^2), ortalama yüzde hata (MPE), sapma hatası (MBE), ortalama mutlak hata yüzdesi (MAPE), bağıl hata karesi (SSRE), bağıl standart hata (RSE), ortalama karekök hatası (RMSE), bağıl hata yüzdesi (e) ve t-istatistik (t-sat) parametreleri ile karşılaştırılmıştır. Toplam global güneş radyasyonu için en iyi tahmini 5 model için polinomun verdiği sonucuna varılmıştır (Karakaya vd. 2018). Elektrik İşleri Etüt İdaresi'nin alınan değerlerle bölgeye özgün beş farklı (lineer, polinom, logaritmik, üssel ve üstel) model geliştirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda geliştirilen modellerin hesaplanan sonuçlarının ölçüm değerleriyle farkı yok denecek kadar az olsa da polinom model diğer modellere göre daha başarılı çıkmıştır. Çalışma sonucuna göre Adıyaman ili toplam güneş ışınım tahmini yıllık güneş enerjisi potansiyeli yıllık 4350 W/m^2 olarak belirlenmiştir (Kallioğlu vd. 2017). Çalışmalarında, Tayvan da 0° - 90° eğime sahip güney yöne bakan düzlemler de aylık global güneş radyasyonunun tahmin etmek için ampirik bir yaklaşımda bulunmuşlardır (Cheng *et al.* 2006). Türkiye'deki 78 kentin günlük maksimum-minimum kuru termometre sıcaklıkları ve saatlik kuru termometre

sıcaklıklarını tahmin etmek için trigonometrik modeller oluşturmuşlar ve kentler için elde edilen katsayılar ve istatistiksel hataları tablolar halinde belirtmişlerdir (Bulut vd. 2003). Diyarbakırın güneş ışınımı değerlerini tahmin etmek için PoLin, ANFIS, HarLin ve Angsröm-Prescott modellerini kullanmış ve en uyumlu modeli PoLin modeli olarak belirlemiştir. PoLin modelinin güneş ışınımı hesaplamaları için Harlin modeli gibi basit yaklaşım olduğunu da belirtilmiştir (Güçlü 2019). Mısır da yer alan beş kentin güneşlenme süresi ve global güneş radyasyonu tahmin edilmesine yönelik bir çalışma yapmıştır ve çalışmada kullanıcı için doğrusal olmayan denklemi önermiştir (Metwally 2005).

Bu çalışmada; Meteoroloji Genel Müdürlüğünden alınan günlük verilerin aylık ortalamaları hesaplanmış ve hesaplanan ortalamalar Matlab paket programında detaylı olarak analiz edilmiştir. İncelenen veriler ışığında eğri uydurmada kullanılmak üzere, aritmetik ortalama ve ölçüm- tahmin metotları oluşturulmuştur. Oluşturulan metotlar yardımı ile ulaşılan modellerin, belirlilik katsayısı ve karekök ortalama hata değerlerine bakılarak tercih edilen model, Afyon, Antalya, Burdur, Isparta ve Konya kentlerine uyarlanmıştır. Elde edilen belirlilik katsayısı, karekök ortalama hata ve model katsayıları çizelgeler halinde sunulmuştur. Çalışmadaki asıl amaç, iklim verilerini kullanarak bir bölgenin gelecekteki enerji potansiyelini belirlemek ve öngörülen enerji potansiyelinin artırımı gibi yapılacak olan çalışmalarda kullanıcı için kolaylık sağlamaktır.

2. Materyal ve Metot

2.1 İklim Verileri

Göller Bölgesi Türkiye de tarım ve yenilenebilir enerji kaynakları açısından verimli bir bölgedir. Afyon, Burdur, Isparta ve Konya kentlerinde tipik yayla iklimi görülmektedir. Kışlar soğuk ve karlı yazlar ise sıcak ve kurak olup gece ve gündüz arasında belirgin bir sıcaklık farkına sahiptir. Antalya da ise yazlar sıcak ve kurak kışlar ise ılık ve yağmurlu olup tipik Akdeniz iklimi görülmektedir. Çalışmada ele alınan iller için 2009-2018 dönemine ait günlük

veriler Meteoroloji Genel Müdürlüğünden temin edilmiştir (Int Kyn. 1). Modelleme yapılır iken 2009-2018 yılları baz alınarak her ayın aylık ortalamaları çıkarılmıştır. Ortalaması alınan veriler incelendiği zaman bölgenin en soğuk kentin Afyon iken en sıcak kent ise Antalya'dır. Bölgede nispi nemin en fazla olduğu kenti Afyon ve Isparta'dır. Ayrıca Antalya için aktüel basınç parametresinin aylık ortalama değerinin bölgedeki diğer kentlerden yüksek olduğu Şekil (1-5) görülmektedir.

2.2 Modelleme

Bu çalışmada Afyon, Antalya, Burdur, Isparta ve Konya kentlerinin 2009-2018 döneme ait iklim verileri incelenmiş ve bu veriler kullanılarak Matlab ortamında eğri uydurmada kullanılan Gauss, Sinüslerin toplamı ve Fourier modelleri ile Göller Bölgesi için matematiksel ifadeler oluşturulmuştur (Int Kyn. 2). Modellemeler yapılırken iken istatistiksel açıdan yüksek belirlilik ve düşük karekök ortalama hata değerine dikkat edilmiştir (Int Kyn. 3). Çalışma da kullanılacak olan modele iki farklı metot yardımı ile ulaşılmıştır. Ölçüm ve tahmin metodu olan ilk metotta öncelikli olarak, incelenecek iklim parametresinin her bir kent için tahmini değerleri elde edilmiştir. Ölçüm değerleri x eksenine tahmini değerler ise y eksenine yerleştirilerek belirlilik katsayısı ve karekök ortalama hata değerleri dikkate alınarak en iyi performansı veren model seçilmiştir. İkinci metot olan aritmetik ortalama metodunda ise incelemesi yapılacak parametrenin aylık ortalama değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak hedef veriler oluşturulmuştur. Belirlilik katsayısı ve karekök ortalama hata bakılarak en iyi performansı veren model seçilmiştir.

Paket programda yer alan tüm modeller ve terim sayıları dikkate alınarak, bir deneme-yanılma yapılmış ve her bir parametre için 2 adet model

seçilmiştir. Oluşturulan metotlar yardımı ile ulaşılan modeller, Göller Bölgesinde yer alan 5 kente uyarlandığında elde edilen belirlilik katsayısı (R^2) ve karekök ortalama hata (KOH) değerleri çizelge 1,3,5,7 ve 9 da gösterilmiştir. Çizelgelerde yer alan belirlilik katsayısı (R^2) parametresi için temel hedef 1 iken, Karekök ortalama hata (KOH) için temel hedef ise 0 dır. Bu değerler dikkate alınarak Göller bölgesi için modeller belirlenmiştir.

Aşağıda Sinüslerin toplamı, Gauss ve Fourier modellerinin matematiksel ifadeleri sırası ile verilmektedir.

$$y = \sum_{i=1}^n a_i \sin(b_i x + c_i) \quad 1 \leq n \leq 8 \quad (1)$$

$$y = \sum_{i=1}^n a_i e \left[- \left(\frac{x-b_i}{c_i} \right)^2 \right] \quad 1 \leq n \leq 8 \quad (2)$$

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cos(iwx) + b_i \sin(iwx) \quad 1 \leq n \leq 8 \quad (3)$$

Denklem 4-5 da sırasıyla belirlilik katsayısı ve karekök ortalama hatasının matematiksel ifadeleri verilmiştir.

$$R^2 = 1 - \sum_{i=1}^n \frac{Y_i - \hat{Y}}{Y_i - \bar{Y}} \quad (4)$$

$$KOH = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Y} - Y_i)^2} \quad (5)$$

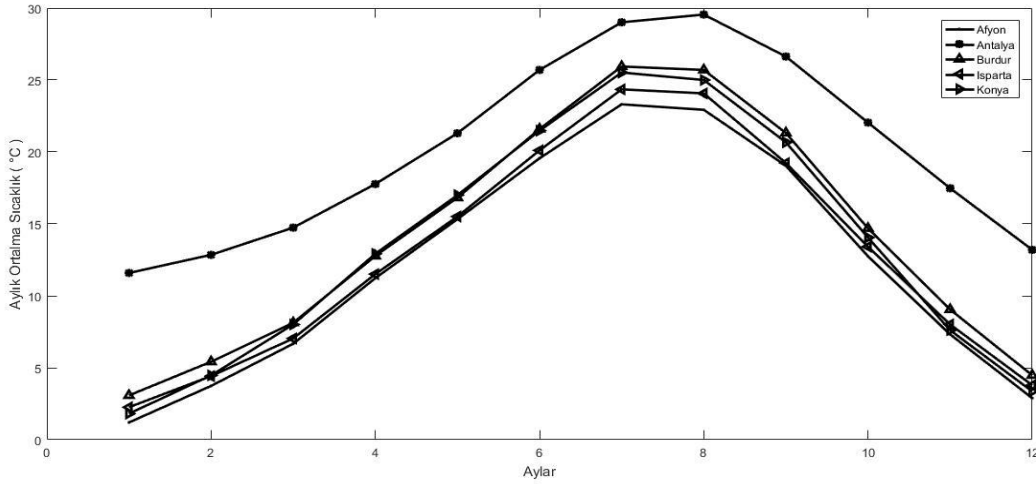
Y_i : Deneysel olarak saptanan değer.

\hat{Y} : Regresyon eşitliğinden hesaplanmış değer.

\bar{Y} : Deneysel verilerin ortalaması.

3.Bulgular

Göller bölgesi için son on yıllık aylık ortalama sıcaklık (minimum ve maksimum sıcaklık), nispi nem ve aktüel basınç verileri, kullanılan metotlar ve modellerle incelenerek sonuçlar çizelge ve grafikler halinde verilmiştir.



Şekil 1. Ortalama sıcaklık

Şekil 1' de göller bölgesinde yer alan kentlerin aylık ortalama sıcaklığının değişim görülmektedir. Şekil 1 de görüldüğü üzere aylara göre sıcaklık dağılımı incelendiğinde Göller Bölgesinin en soğuk kenti Afyon iken en sıcak kentinin ise Antalya olduğu gözlenmiştir. Ayrıca kentler için en soğuk ay ocak ayı iken en sıcak ay ise temmuz ayı olarak görülmektedir. Ocak ayında Afyon aylık ortalama sıcaklık 1.20°C Antalya için 11.59°C Burdur için 3.08 °C Isparta için 2.26 °C Konya için ise 1.89 °C'dir. Temmuz ayında Afyon için aylık ortalama sıcaklık 23.31°C Antalya için 29.01 °C Burdur için 25.94 °C Isparta için 24.35 °C Konya için 25.52 °C'dir. Ölçüm ve tahmin metodu ile elde edilen eğri 6. dereceden Polinom olup belirlilik katsayısı $R^2=0.9998$, karekök ortalama hatanın ise $KOH=0.1206$ olduğu görülmektedir. Aritmetik ortalama metodu ile elde edilen eğri 3 terimli sinüslerin toplamı olup belirlilik katsayısı $R^2=0.9996$, karekök ortalama hatanın ise $KOH=0.3019$ olduğu görülmektedir. Çizelge 1. de Metotların kentlerin aylık ortalama sıcaklık verilerine uyarlanması sonucunda elde edilen belirlilik katsayısı ve karekök ortalama hata değerleri verilmiştir.

Çizelge 1. İllere göre farklı iki metodun kıyaslanması

	Ölçüm ve tahmin metodu		Aritmetik ortalama metodu	
	R^2	KOH	R^2	KOH
Afyon	0.9977	0.5636	0.997	0.2593
Antalya	0.9982	0.4122	0.991	0.3705
Burdur	0.9965	0.717	0.997	0.285
Isparta	0.9959	0.7514	0.9997	0.2449
Konya	0.7272	0.2518	0.9952	0.2382

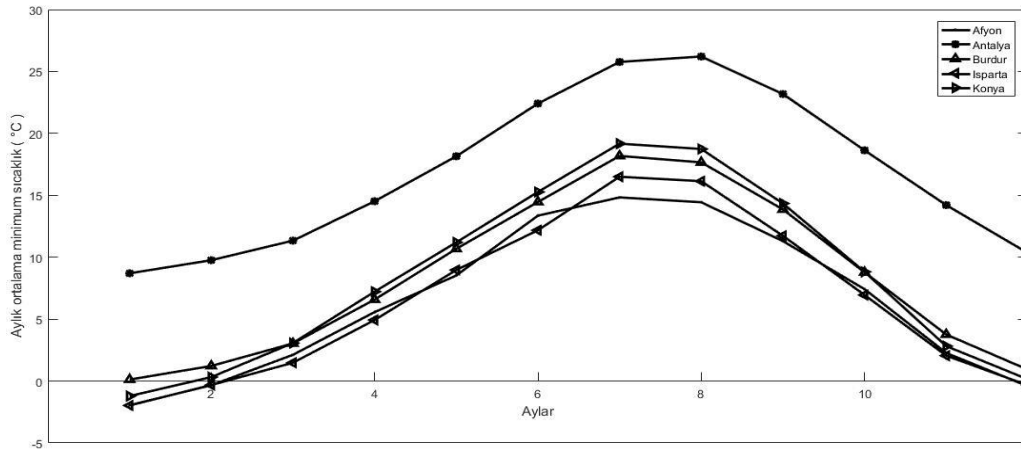
Çizelge 1.'deki değerler dikkate alınarak, Göller Bölgesinin aylık ortalama sıcaklığı için tercih edilen model, 3 terimli Sinüslerin toplamı modeli olup programda elde edilen katsayıların %95 güven sınırına sahip olduğu görülmüştür. Sonuçlar çizelge 2' de verilmiştir. 3 terimli Sinüslerin toplamı modeli (6) numaralı denklemde görülmektedir.

$$f(A)=a_1 \cdot \sin(b_1 \cdot A+c_1)+a_2 \cdot \sin(b_2 \cdot A+c_2)+a_3 \cdot \sin(b_3 \cdot A+c_3) \quad (6)$$

Çizelge 2. Aylık ortalama sıcaklık için elde edilen katsayılar

	Afyon	Antalya	Burdur	Isparta	Konya
a_1	20.29	94.33	22.43	20.96	6.031
b_1	0.9639	0.7257	0.921	0.946	0.8337
c_1	1.412	2.743	1.41	1.4	1.591

a_2	3.163	87.76	3.69	3.465	-0.566
b_2	3.005	0.7776	3.033	3.12	2.998
c_2	0.6385	-0.1217	0.6161	0.651	-2.037
a_3	-0.4607	2.739	-0.565	0.5809	0.2865
b_3	5.89	3.06	5.986	6.26	5.3
c_3	2.421	0.6713	-3.727	-6.73	-0.3438

**Şekil 2.** Ortalama minimum sıcaklık

Şekil 2' de göller bölgesinde yer alan kentlerin aylık ortalama minimum sıcaklığının değişimi görülmektedir. Ocak ayı için on yıllık ortalama minimum sıcaklık, Afyon için -1.95°C , Antalya için 8.7°C , Burdur için 0.2°C , Isparta için -1.97°C Konya için -1.21°C de görülmüştür. Ocak ayında kentler için aylık ortalama minimum sıcaklık değeri en düşük iken ağustos ayında en yüksek değerdedir. Ölçüm ve tahmin metodu ile elde edilen eğri 2 terimli Fourier modeli olup belirlilik katsayısı $R^2=0.9987$ karekök ortalama hata değeri ise $\text{KOH}=0.2829$ olarak bulunmuştur. Aritmetik ortalama metodu ile elde edilen eğri 3 terimli Sinüslerin toplamı olup belirlilik katsayısı $R^2=0.9995$, karekök ortalama hata değeri ise $\text{KOH}=0.2925$ olarak bulunmuştur. Çizelge 3' de Metotların kentlerin aylık ortalama minimum sıcaklık verilerine uyarlanması sonucunda elde

edilen belirlilik katsayısı ve karekök ortalama hata değerleri verilmiştir.

Çizelge 3. İllere göre farklı iki metodun kıyaslanması

	Ölçüm ve tahmin metodu		Aritmetik ortalama metodu	
	R^2	KOH	R^2	KOH
Afyon	0.9971	0.4437	0.9973	0.6084
Antalya	0.9993	0.2306	0.9975	0.6105
Burdur	0.9989	0.2954	0.9992	0.3499
Isparta	0.9953	0.6083	0.998	0.5651
Konya	0.9596	1.901	0.999	0.4578

Çizelge 3.' deki değerler dikkate alınarak Göller Bölgesinin aylık ortalama minimum sıcaklık için tercih edilen model, 3 terimli Sinüslerin toplamı modeli olup programda elde edilen katsayıların %95 güven sınırına sahip olduğu görülmüştür.

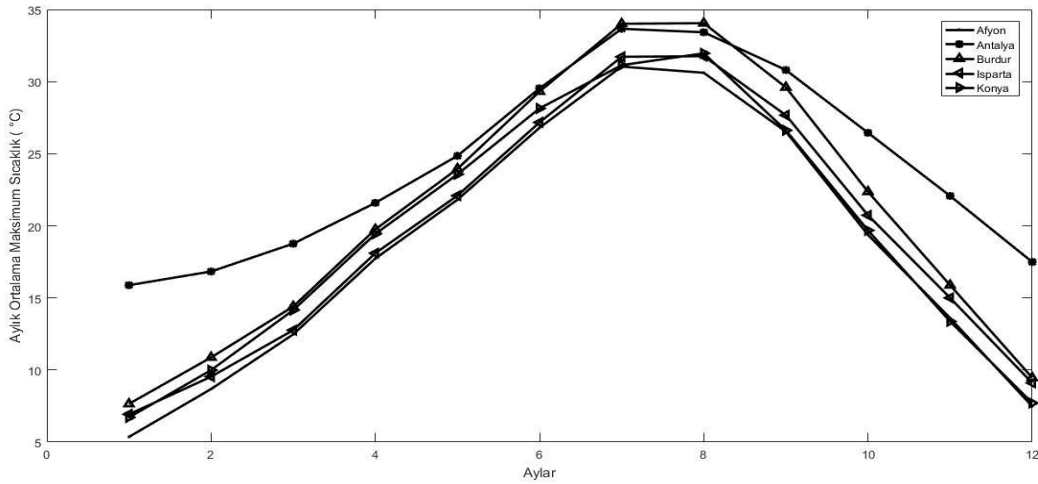
Sonuçlar Çizelge 4’ de verilmiştir. 3 terimli Sinüslerin toplamı modeli (7) numaralı denklemde gösterilmektedir.

$$f(A)=a_1*\sin(b_1*A+c_1)+a_2*\sin(b_2*A+c_2)+a_3*\sin(b_3*A+c_3) \quad (7)$$

Çizelge 4. Aylık ortalama minimum sıcaklık için elde edilen katsayılar

	Afyon	Antalya	Burdur	Isparta	Konya
a_1	8.198	334.9	14.7	13.58	13.37

b_1	0.1724	0.2224	0.2755	1.131	0.236
c_1	-0.1361	0.3673	1.397	-0.08241	1.464
a_2	3.521	286.5	4.416	3.886	3.25
b_2	0.8152	0.7453	3.337	0.8053	2.951
c_2	1.568	-2.841	0.4403	1.617	0.6511
a_3	0.6004	6.129	1.072	0.6723	0.5566
b_3	1.656	2.659	6.334	1.684	5.774
c_3	-4.897	0.5991	1.677	-5.185	-0.4485



Şekil 3. Ortalama maksimum sıcaklık

Şekil 3’ de göller bölgesinde yer alan kentlerin aylık ortalama maksimum sıcaklığının değişim görülmektedir. Şekil de görüldüğü üzere ocak ayı için aylık ortalama maksimum sıcaklık Afyon ili için 5.36°C Antalya ili için 15.88°C Burdur ili için 7.65 °C Isparta ili için 6.93°C Konya ili için 6.71°C olduğu ve temmuzun en sıcak ay olduğu görülmektedir. Ölçüm ve tahmin metodu ile elde edilen eğri modeli 1 terimli Fourier modeli olup belirlilik katsayısı $R^2= 0.9997$ karekök ortalama hata değeri ise $KOH = 0.1495$ olarak bulunmuştur. Aritmetik ortalama metodu ile elde edilen eğri modeli 3 terimli Sinüslerin toplamı modeli olup $R^2=0.9995$ $KOH= 0.2924$ olarak bulunmuştur. Çizelge 5.’de Metotların kentlerin aylık ortalama maksimum

sıcaklık verilerine uyarlanması sonucunda elde edilen belirlilik katsayısı ve karekök ortalama hata değerleri görülmektedir.

Çizelge 5. İllere göre farklı iki metodun kıyaslanması

	Ölçüm ve tahmin metodu		Aritmetik ortalama metodu	
	R^2	KOH	R^2	KOH
Afyon	0.9862	1.246	0.9973	0.6084
Antalya	0.9652	1.35	0.9975	0.6105
Burdur	0.9188	3.152	0.9992	0.3499
Isparta	0.9865	1.207	0.9988	0.5651
Konya	0.984	1.335	0.999	0.4578

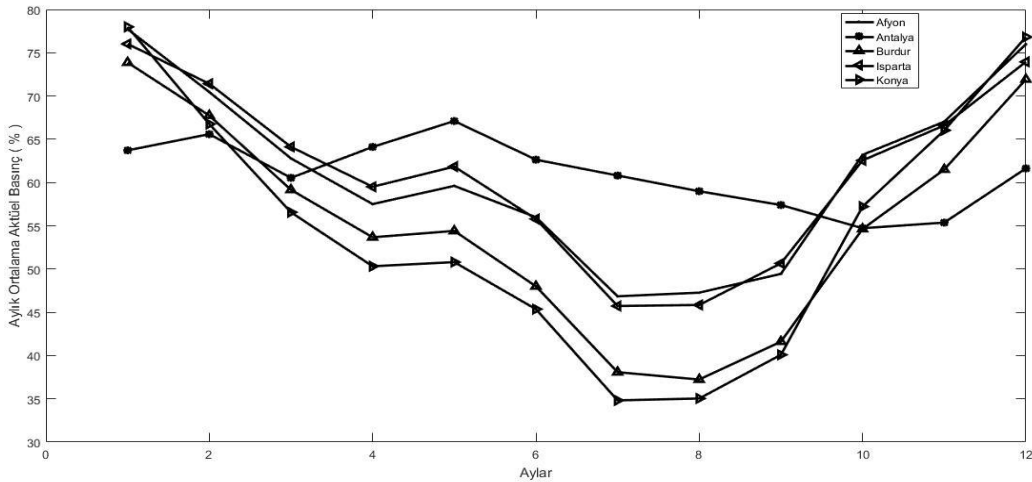
Çizelge 5.'deki değerler dikkate alınarak Göller Bölgesinin aylık ortalama maksimum sıcaklığı için tercih edilen model 3 terimli sinüslerin toplamı modelidir. Programda elde edilen katsayılar %95 güven sınırı sahiptir ve sonuçlar Çizelge 6.'da verilmiştir. 3 terimli sinüslerin toplamı modeli fonksiyonu (8) numaralı denklemde görülmektedir.

$$(A)=a_1 \cdot \sin(b_1 \cdot A+c_1)+a_2 \cdot \sin(b_2 \cdot A+c_2)+a_3 \cdot \sin(b_3 \cdot A+c_3) \quad (8)$$

Çizelge 6. Aylık ortalama maksimum sıcaklık için elde edilen katsayılar

	Afyon	Antalya	Burdur	Isparta	Konya
--	-------	---------	--------	---------	-------

a_1	27.65	315.6	30.5	28.16	28.7
b_1	0.241	0.6875	0.837	0.2306	0.8633
c_1	-0.1361	0.3673	1.397	0.08241	-1.464
a_2	3.521	286.5	4.416	3.886	3.25
b_2	0.8152	0.7453	3.337	0.8053	2.951
c_2	1.568	-2.841	0.4403	1.617	0.6511
a_3	0.6004	6.129	1.072	0.6723	0.5566
b_3	1.656	2.659	6.344	1.684	5.774
c_3	-4.897	0.5991	1.675	-5.185	-0.4485



Şekil 4. Ortalama nispi nem

Şekil 4' de göller bölgesinde yer alan kentlerin aylık ortalama nispi nem değişimi görülmektedir. Şekil de görüldüğü üzere ocak ayı için aylık ortalama nispi nem Afyon için %77.73 Antalya için %63.72 Burdur için %73.87 Isparta için %76.02 Konya için %77.99 olduğu görülmektedir. Nispi nem sonbahar ve kış aylarında yüksek değerlerde olur iken yaz aylarında daha düşük olduğu görülmektedir. Ölçüm ve tahmin metodu ile elde edilen eğri modeli 3 terimli Guass modeli olup belirlilik katsayısı $R^2 = 0.9961$ karekök ortalama hata değeri ise $KOH = 0.7171$ olarak bulunmuştur.

Aritmetik ortalama metodu ile elde edilen eğri modeli 3 terimli fourier modeli olup $R^2 = 0.876$ ve $KOH = 10.59$ olarak bulunmuştur. Her iki metot ile aynı modele ulaşılmıştır. Çizelge 7 'de, Metotların kentlerin aylık ortalama nispi nem verilerine uyarlanması sonucunda elde edilen belirlilik katsayısı ve karekök ortalama hata değerleri görülmektedir.

Çizelge 7. İllere göre farklı iki metodun kıyaslanması

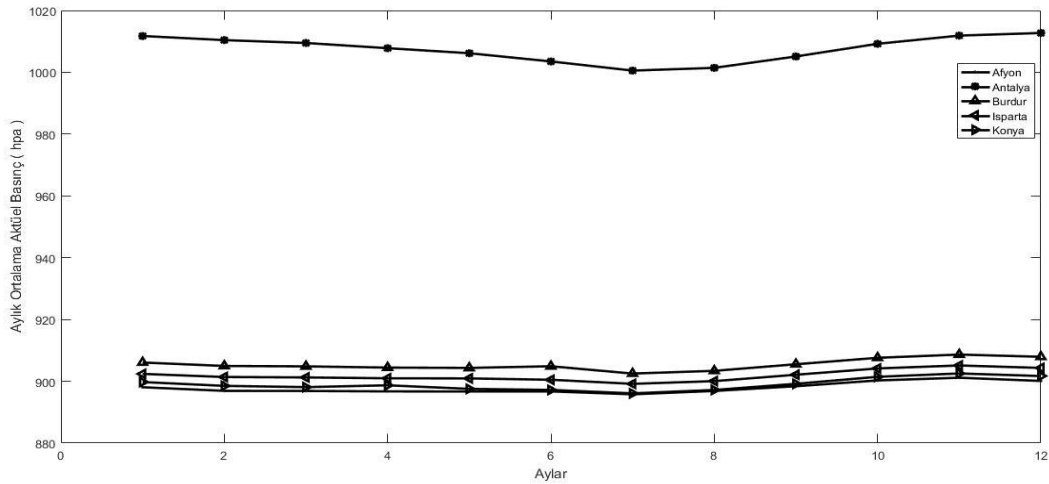
	Ölçüm ve tahmin metodu		Aritmetik ortalama metodu	
	R ²	KOH	R ²	KOH
Afyon	0.936	5.052	0.9838	2.269
Antalya	0.9192	2.121	0.9565	1.289
Burdur	0.9951	1.661	0.9947	1.532
Isparta	0.9919	1.763	0.9913	1.574
Konya	0.9655	5.286	0.994	1.903

Çizelge 7.’deki değerler dikkate alınarak Göller Bölgesinin aylık ortalama nispi nem değeri için tercih edilen model 3. terimli Gauss modelidir. Programda elde edilen katsayılar %95 güven sınırı sahip olup sonuçlar Çizelge 8.’de verilmiştir. 3 Terimli Gauss modeline ait fonksiyon (9) numaralı denklemde görülmektedir.

$$f(A)=a_1*\exp\left(\left(\frac{(A-b_1)}{c_1}\right)^2\right)+a_2*\exp\left(\left(\frac{(A-b_2)}{c_2}\right)^2\right)+a_3*\exp\left(-\left(\frac{(A-b_3)}{c_3}\right)^2\right) \quad (9)$$

Çizelge 8. Aylık ortalama nispi nem için elde edilen katsayılar

	Afyon	Antalya	Burdur	Isparta	Konya
a₁	1.516e+16	5.218	73.31	74.35	4.079e+16
b₁	-240.7	-0.4015	-1.649	-1.622	-154.9
c₁	41.68	0.2475	1.186	1.248	26.34
a₂	0	63.81	82.13	75.91	0
b₂	31.33	-1.618	2.204	1.848	-7.623
c₂	2.968	6.951	1.829	1.774	0.2915
a₃	43.03	1.069e+15	20.14	19.08	56.72
b₃	1.608	10.77	-0.2965	-0.3019	1.569
c₃	0.7571	1.625	0.4411	0.3969	0.7207



Şekil 5. Ortalama aktüel basınç

Şekil 5’ de göller bölgesinde yer alan kentlerin aylık ortalama aktüel basınç değışim görülmektedir. Şekil 5. de ocak ayı için aylık ortalama aktüel basınç

Afyon için 898.07 (hpa), Antalya için 1011.74(hpa), Burdur için 906.08 (hpa), Isparta için 902.39(hpa), Konya için 899.75(hpa), olduğu görülmektedir.

Aylık ortalama aktüel basınç en fazla olduğu kent Antalya iken, düşük olan kent ise Afyondur. Ölçüm-tahmin metodu ile elde edilen eğri modeli 3 terimli Fourier modeli olup belirlilik katsayısı $R^2 = 0.9703$, karekök ortalama hata değeri ise KOH=7.905 olarak bulunmuştur. Aritmetik ortalama metodu ile elde edilen eğri modeli 3 terimli Fourier modeli olup belirlilik katsayısı $R^2 = 0.8315$, karekök ortalama hata KOH=1.82 olarak bulunmuştur. Çizelge 9.' da Metotların kentlerin aylık ortalama aktüel basınç verilerine uyarlanması sonucunda elde edilen belirlilik katsayısı ve karekök ortalama hata değerleri görülmektedir.

Çizelge 9. İllere göre farklı iki metodun kıyaslanması

	Ölçüm ve tahmin, aritmetik ortalama metodu	
	R^2	KOH
Afyon	0.991	0.2732
Antalya	0.9983	0.2813
Burdur	0.9675	0.5532
Isparta	0.9939	0.2383
Konya	0.9906	0.324

Çizelge 9' da bulunan değerler dikkate alınarak Göller Bölgesinin aylık ortalama aktüel basıncı için tercih edilen model 3 Terimli Fourier modelidir. Programda elde edilen katsayılar %95 güven sınırı sahip olup sonuçlar Çizelge 10. da verilmiştir. 3. Terimli Fourier modeli (10) numaralı denklemde görülmektedir.

$$f(A) = a_0 + a_1 \cdot \cos(A \cdot w) + b_1 \cdot \sin(A \cdot w) + a_2 \cdot \cos(2 \cdot A \cdot w) + b_2 \cdot \sin(2 \cdot A \cdot w) + a_3 \cdot \cos(3 \cdot A \cdot w) + b_3 \cdot \sin(3 \cdot A \cdot w) \quad (10)$$

Çizelge 10. Aylık ortalama aktüel basınç için elde edilen katsayılar

	Afyon	Antalya	Burdur	Isparta	Konya
a_0	897.7	1008	905.5	901.9	900.3
a_1	-0.1894	-5.334	-1.868	1.964	-2.779
b_1	0.5167	-0.8199	0.9704	-0.8839	0.06978

a_2	-1.413	-0.646	-0.2448	-0.1962	-0.3472
b_2	1.275	-1.55	-1.154	-1.127	1.696
a_3	0.06308	0.01818	0.2117	-0.1536	-0.6764
b_3	-1.352	-0.4045	-0.3313	0.1957	-1.768
w	1.173	1.789	1.789	0.4976	1.134

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışma için Göller Bölgesinde yer alan Afyon, Antalya, Burdur, Isparta ve Konya kentlerin 2009-2018 dönemine ait beş iklim parametresi detaylı olarak incelenip analiz edilmiştir. Modelleme Matlab programında yapıp Sinüslerin toplamı, Fourier ve Gauss modelleri oluşturulmuştur. Çalışmada modellere iki farklı metod yardımı ile ulaşılmıştır. Metotlar ile elde edilen modeller kentlere uyarlandığında elde edilen belirlilik katsayısı ve karekök ortalama hata değerleri çizelgeler şeklinde verilmiştir. Çalışma, amaç, göller yöresinde daha sonra yapılacak olan iklimlendirme teknolojilerinde ihtiyaç duyulan iklim parametrelerinin tasarımcıya kabul edilebilir tahminler yapmayı amaçlamaktadır. Çalışmada modeller oluşturulurken doğru tahmin etmeyi sağlayacak iklimsel, çevresel vb. parametreler çalışmada ihmal edilmiştir. Buna benzer parametrelerden kaynaklı tahminlerde oluşabilecek sapmaları engellemek adına; Kapsayıcılığı daha kısıtlı (yerel, mevsim ve ay bazında) modeller oluşturulması gerekmektedir.

Teşekkür

Afyon, Antalya, Burdur, Isparta ve Konya kentlerine ait 2009-2018 dönemine ait veriler için METEOROLOJİ GENEL MÜDÜRLÜĞÜNE teşekkür ederiz.

5. Kaynaklar

Akpınar, S. and Akpınar E.K, 2010. Modeling of Weather Data For The East Anatolia Region of Turkey, *Journal of Urban and Environmental Engineering*, **4**, 9-22.

- Avcı A., Durmuş A., Ercan U., Kallioğlu M., Ve Karakaya H., 2017. Adıyaman İlinde Yatay Düzleme Gelen Global Güneş Işınım Değerlerinin Ampirik Modeller ile Geliştirilmesi, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **29(1)**, 151-159.
- Avcı A., Ercan U. Ve Kallioğlu M., 2018. Şanlıurfa İlinde Yatay Yüzeğe Gelen Anlık Global Güneş Işınımının Modellenmesi, *DÜMF Mühendislik Dergisi*, **10**, 147-155.
- Berkama B., Özek N. ve Öztürk M., 2011. Isparta İçin Aylık Ortalama Günlük Global Güneş Radyasyonu Tahmininde Mevcut Olan Bazı Modellerin Karşılaştırılması, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, **18**, 13-27.
- Biçer, A., 2019. Fırat Havzasında Bulunan Bazı İllerin Sıcaklık ve Nem Modelleri, *Bartın University International Journal of Natural and Applied Sciences*, **JONAS**, **2 (1)**, 50-58.
- Bulut, H., Büyükkada, O. ve Yılmaz, T., 2003. New Models for Simulating Daily Minimum, Daily Maximum and Hourly Outdoor Temperatures, *Proceedings of the First International Exergy: Energy and Environment Symposium*, Izmir, Turkey , 499-504.
- Chelbi, M., Gagnon, Y. and Waewsak, j., 2015. Solar Radiation Mapping Using Sunshine Duration-based Models and Interpolation Techniques: Application to Tunisia, *Energy Conversion and Management*, **101**, 203-215.
- Cheng, C.L., Chan, C.L. and Chen, C.L., 2006. An Empirical Approach to Estimating Monthly Radiation on South-facing Tilted Planes for Building Application, *Energy*, **31**, 2940-2957.
- Çelik M. ve Taşyürek M., 2020. Hava Sıcaklık Değerlerinin Coğrafi ve Rakım Ağırlıklı Regresyon Yöntemi ile Tahmin Edilmesi, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, **5**, 81-86.
- Dorvlo, A.S.S and Ampratwum D.B., 1999. Technical Note Modelling of Weather Data for Oman: *Renewable Energy*, **17**, 421-428
- EL-Metwally, M., 2005. Sunshine and Global Solar Radiation Estimation at Different Sites in Egypt, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **67**, 331-342.
- Gabralı D., 2020. Güneş Enerjisi Potansiyelinin Çoklu Lineer Regresyon ve Yapay Sinir Ağları İle Modellenmesi, *Aurum Mühendislik Sistemleri ve Mimarlık Dergisi*, **4**, 23-36.
- Güçlü, Y.S, 2019. Angström-Prescott Modelinin Polinom İle Geliştirilmesi ve Diyarbakır Güneş Işınımı Verilerine Uygulanması, *Selçuk Üniversitesi Mühendislik Bilim ve Teknoloji Dergisi*, **7(1)**, 75-88
- Kecebas, A., Demircan, C. and Bayrakci, C.H, 2018. The Development of Empirical Models for Estimating Global Solar Radiation on Horizontal Surface: A case study, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **81**, 2771-2782.
- Külcü R., 2019. Global Güneş Radyasyonunun Ampirik Modellenmesinde Kullanılabilecek Yeni Bir Modelin Geliştirilmesi ve Çankırı İlinde Uygulanması, *Süleyman Demirel Üniversitesi YEKARUM e-DERGİ*, **4(2)**.
- Lü, A., Jia, S., Mahmood, R., JYhan and Zhu, W., 2017. Retrievals of All-weather Daytime Air Temperature from MODIS Products: Remote Sensing of Environment, **189**, 152-163.
- Osmanoğlu, N., 2016 Empirical Modeling of Solar Radiation Exergy for Turkey: Applied Thermal Engineering, **108**, 1033-1040.
- Özfidaner, M., Şapolyo D. Ve Topaloğlu F., 2018. Antalya Ortalama Sıcaklık Verisinde Gidişlerin Yeni Bir Gidiş Analiz Yöntemi İle Belirlenmesi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, **5**, 223-228.
- Uçkan, İ., 2018. Analysis of Solar Radiation Data in Van, Turkey, *Celal Bayar University Journal of Science*, **14**, 421-427.
- Yeşilbudak, M., Çolak M. ve Bayındır R., 2018. Ankara İlinin Uzun Dönem Global Güneş Işınım Şiddeti: Güneşlenme Süresi ve Hava Sıcaklığı Verilerinin Analizi ve Eğri Uydurma Metotlarıyla Modellenmesi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, **6(1)**, 189-203.

İnternet kaynakları

1-<https://www.mgm.gov.tr>,(23.10.2019)

2-https://www.mathworks.com/help/curvefit/linear-and-nonlinear-regression.html?s_tid=CRUX_lftnav,
(23.10.2019)

3-<https://www.mathworks.com/help/curvefit/evaluating-goodness-of-fit.html>, (23.10. 2019)

AKÜ FEMÜBİD 20 (2020) 065903 (1124-1137)

AKU J. Sci. Eng. 20 (2020) 065903 (1124-1137)

DOI: 10.35414/akufemubid.714964

Araştırma Makalesi / Research Article

Gaz ve Düşük Basıncılı Sementasyon Yapılmış Helisel Dişli Çarkların Yorulma Analizi

Serhan GENÇOĞLU¹, Aysel YAZICI²¹ Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine ve İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Turgutlu-MANİSA² Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Turgutlu Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Turgutlu-MANİSA

e-posta: serhangencoglu@hotmail.com

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-5213-536X>

Sorumlu yazar e-posta: aysel.yazici@cbu.edu.tr

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-1290-7104>

Geliş Tarihi: 05.04.2020

Kabul Tarihi: 14.12.2020

Öz

Bu çalışmada AISI 8620 ve AISI 5115 çeliklerinden yapılan, modülü 1.5 ve 2 olan helisel dişli çarklara uygulanan gaz sementasyon ve düşük basınçlı sementasyon yüzey sertleştirme ısıl işlemlerinin dişli çarkların yorulma ömrü üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yorulma analizi Solidworks Premium 2015 SP 2.0 CAD programı kullanılarak yapılmıştır. Helisel dişli çarkların ömür değerleri, yüzey sertleştirme işlemleri sonrasında oluşan sertlik dağılımına bağlı olarak belirlenmiştir. Düşük basınçlı sementasyon işleminin gaz sementasyon işlemine kıyasla, istenen yüzey sertlik ve efektif sert tabaka kalınlığını çok daha kısa işlem sürelerinde sağladığı belirlenmiştir. Dişlilerin ömür değerleri ve hasar yüzdeleri, malzemenin kimyasal içeriği, efektif sert tabaka kalınlığı ve yüzey sertlik değerlerinden etkilenmiştir. AISI 5115 helisel dişli çarklarda 36 Nm tork ve 1400 rpm çalışma değerleri için ömür tur sayıları; ısıl işlem görmemiş dişlide 366,240,718, düşük basınçlı sementasyon yapılmış dişlide 790,471,887, gaz sementasyon yapılmış dişlide ise 720,619,942 tur olarak saptanmıştır. Bu değerler 132 Nm tork ve 212 rpm çalışma değerleri için, AISI 8620 helisel dişli çarklarda sırasıyla 167,327,793 ve 614,293,058 ve 629,203,913 tur olarak saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler

Helisel Dişli Çark; Gaz Sementasyon; Düşük Basıncılı Sementasyon; Çift Sertleştirme; Yorulma Analizi

Fatigue Analysis of Gas and Low-Pressure Carburized Helical Gears

Abstract

In this study, the effect of case hardening treatments such as gas carburizing and low-pressure carburizing on the fatigue life was investigated for helical toothed gears made of AISI 8620 and AISI 5115 steels with modules 1.5 and 2. Solidworks Premium 2015 SP 2.0 CAD program was used for the fatigue analysis of the gear wheels. The total life values of the helical gears were determined depending on the hardness distribution that occurs as the result of case hardening treatments. Compared to the gas carburizing, it was found that the low-pressure carburizing process provided the desired surface hardness and effective case depth values within shorter processing times. The total life values and damage percentages of gears were influenced by the chemical content of the material, effective case layer thickness, and surface hardness values. For 36 Nm torque and 1400 rpm operating values in AISI 5115 helical gear wheels, fatigue life cycle was determined as 366,240,718 turns in non-heat-treated gear, 790,471,887 turns in low-pressure carburizing, and 720,619,942 turns in gas carburizing. These values were determined as 167,327,793 and 614,293,058, and 629,203,913 turns for 132 Nm torque and 212 rpm operating values in AISI 8620 helical gears wheels, respectively.

Keywords

Helical Gears; Gas Carburizing; Low Pressure Carburizing; Double Quenching; Fatigue Analysis

1. Giriş

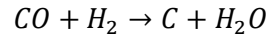
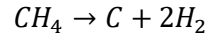
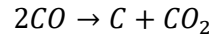
Dişli çarklar makine sistemlerinde hareket ve güç ileten en önemli elemanlardır. Hareket ve güç aktarımında dişli çarklar, yüksek iletim verimliliği, kompakt yapı, dengeli iletim oranı, yüksek güvenilirlik, yüksek dayanıklılık ve bunun gibi birçok avantaja sahiptir (Fernandes *et al.* 2015a, Fernandes *et al.* 2015b). Dişli çarklar hareket-güç aktarımı nedeniyle zor şartlar altında çalışırlar. Dişli çarklar çevrim sürecinde eğilme gerilmesi, temas gerilmesi ve darbe kuvveti gibi çeşitli kuvvetlere maruz kalırlar. Bu yüzden dişli çarklar özellikle çoklu hata formlarına; diş yanı aşınmasına, dökülmeye, aşınmaya, eğilme yorulmasına eğilimlidirler (Dengo *et al.* 2015, Savaria *et al.* 2015).

Dişli çarklarda yorulma davranışı; sertlik, mikro yapı, yapıdaki artık gerilmeler, ve sert tabaka ile çekirdek arasındaki gerilmeler ve gerilmelerin dağılımına bağlı olarak değişir. Bu nedenle dişli çarklarda yorulma davranışı oldukça karmaşık bir konudur. Dişlilerin yüzey sertliğinin artması ve yüzey pürüzlülüğünün azalması, transmisyon verimliliğinin artmasına ve dişli çarkların ömrünün uzamasına imkan sağlamaktadır. Dişli çarkların tasarımında, doğru geometrinin oluşturulmasının yanı sıra uygun malzeme seçimi ve ısıl işlemlerin doğru yapılması dişlilerin sorunsuz çalışabilmesi bakımından önemlidir.

Dişli çarklarda yapılan yüzey sertleştirme ısıl işlemleri sert ve aşınmaya dayanıklı bir yüzey ve tok bir çekirdek sağlar. Sementasyon (karbürleme) yüzey sertleştirme işleminde, düşük karbonlu çelik parçaların yüzeylerine kontrollü ortamlarda ve yüksek sıcaklıkta difüzyon yoluyla karbon emdirilir. Karbonun kolayca nüfuz edebilmesi için çelik östenitik faz sıcaklığı (A_3) üzerinde bir sıcaklıkta (850 °C - 1000 °C) ısıtılır. Sementasyon işlemi sonunda, iş parçası yüzeyinde karbon içeriğinin % 0.80 ila % 0.90 arasında bir değere ulaşması hedeflenir. Yüzeydeki karbon oranı ve difüzyon tabakasının derinliği; ortam sıcaklığı, ortamın karbon oranı ve ürünün ortamda tutulma sürelerine bağlı olarak değişir (Davis 2002). Karbon emilimini takiben parçalar hızla soğutularak, parça yüzeyinde martenzit fazı içeren

bir katman oluşturulur. Sementasyon işlemi malzemenin eğilme, aşınma, burulma ve yorulma dayanımını yükseltir (Krauss 1991). Sementasyon katı, gaz ve sıvı-tuz banyosu ortamlarında yapılabilir.

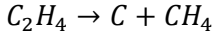
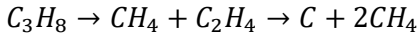
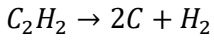
Gaz ortamında sementasyon; atmosferden çelik yüzeyine karbon taşınması, yüzey kimyasal reaksiyonları, metal yüzey tarafından karbonun atmosferden absorbe edilmesi ve absorbe edilen karbon atomlarının çeliğin kütlesine doğru difüzyonu aşamalarını içerir. Karbürizasyon atmosferinde eş zamanlı olarak yaklaşık 180 kimyasal reaksiyonun meydana geldiği tahmin edilmekle birlikte, karbürizasyon atmosferinden çelik yüzeye olan karbon transfer oranını belirleyen üç reaksiyon önemlidir ve bu reaksiyonlar (Collin *et al.* 1972) aşağıda verilmiştir;



Karbürizasyon en hızlı şekilde CO molekülünün ayrışmasıyla devam ederken, reaksiyonların CO_2 gibi yan ürünleri dekarbürizasyon görevi görür. CO_2 çeliğin içindeki karbonu alarak, yüzeyde karbon azalmasına (dekarbürizasyon) sebep olur. Çeliğin genel mukavemetini ve yorulma direncini azaltan dekarbürizasyonu önlemenin bir yolu, CO ve H_2 gibi indirgeyici gazların varlığını korumaktır. O_2 ve CO_2 gibi oksitleyici gazlar dekarbürizasyonu kolaylaştırır (Collin *et al.* 1972).

Sementasyon proseslerinde oluşan karbür tabakasının üniformitesi oldukça zayıftır ve yüzey oksidasyonu ciddi bir sorundur (Ryzhov *et al.*, 2010). Endüstriyel uygulamalarda, gaz sementasyon sonrası oluşan yüzey oksitlenmesinden kurtulmak için taşlama işlemi yapılır. Ancak taşlama işlemi ek bir maliyetin yanı sıra işlenen ürünlere ek gerilmeler yükler. Düşük basınçlı sementasyon; karbür morfolojisi, boyutu, dağılımı, yüzey karbon içeriği ve katman derinliği üzerinde doğru kontrol sağlayan yeni bir teknolojidir ve dişli üretiminde kullanılan

çeşitli çeliklere uygulanır (Gawroński *et al.* 2010, Wang, *et al.* 2019). Düşük basınçlı sementasyon işlemi; vakumlu fırınlarda çok düşük basınç ve yüksek sıcaklıklar altında, hidrokarbon gazlardan yararlanılarak gerçekleştirilir. Düşük basınçlı sementasyon (Low Pressure Carburizing - LPC) için kullanılan hidrokarbon gazları; asetilen (C_2H_2), propan (C_3H_8), ve nadiren bir etilen (C_2H_4) 'dir. LPC de karbon çelik yüzeyine aşağıdaki reaksiyonlar yoluyla iletilir (Davis 2002);



LPC işleminde oksijen bulunmayan bir hidrokarbon gazı kullanıldığından ve fırın haznesi mevcut olabilecek herhangi bir oksijenin giderilmesi için düşük bir basınca (2-20 mbar) pompalandığı için metal oksitlerin oluşumu önlenir (Poor *et al.* 2007). Bu işlemin avantajı; çelik yüzeyinin çok temiz kalması, vakum ortamının karbonu çelik yüzeyine daha hızlı transfer etmesi, ve gaz sementasyon proseslerinde görülen taneler arası ve yüzey oksidasyonun oluşmamasıdır. LPC işleminde oksidasyon tabakasının oluşmaması yüzeyde homojen sertlik dağılımına imkân sağlar. Bu yöntemde proses gazı ortama fasıllı olarak verilir ve gaz verilisinin ardından gazın difüze olması için beklenir. Böylelikle karbonun yüzeyde yoğunlaşması önlenir. Bunun bir sonucu olarak sementasyon derinliği sağlanır ve karbonun iç yapıya difüzyonuna imkan sağlanmış olur. İlave olarak, LPC geleneksel sementasyonla karşılaştırıldığında boyutsal kontrol, düşük çarpılma, öngörülebilir ve yinelenebilir boyutsal kontrol sağlar.

Makine elemanları dinamik yük ve gerilmelere maruz kalırlar. Makine elemanına tesir eden yükler statik olsa bile kesitinde meydana gelen gerilmeler değişken olabilmektedir. Değişken gerilmelerin etkisi altındaki makine elemanlarında, yüklerin maksimum değerleri değil tekrar sayısı önemlidir. Çevrimsel olarak değişen gerilmelerin malzeme iç

yapısında yıpranmalara neden olduğu bilinmektedir. Bunun bir sonucu olarak, kopma olayının statik sınırların çok altında meydana gelebileceği bilinmektedir (Chaush 2008). Teorik olarak malzemenin sonsuz devir sayısında taşıyabileceği yük yorulma dayanımı olarak tanımlanır (Akkurt 2005). Gerilme hali, geometri, malzeme türü, iç kusurların dağılımı ve boyutları, artık gerilmeler, yükleme doğrultusu, tane büyüklüğü ve çevre koşulları yorulmayı etkiler.

Mahakul *et al.* (2020), paslanmaz çelik, Ti-3Al-8 V-6Cr-4Mo-4Zr (SS) kompozit malzeme ve ZnAl41A alaşımından üretilen alın dişlilerde SolidWorks simülasyon yazılımını kullanarak; gerinim, gerilme dağılımı ve yük altında deformasyonun sayısal analizini yapmıştır. Zarzoor *et al.* (2018), alın dişlilerde Solidwork kullanarak yaptıkları eğilme direnci analizleri sonucunda elde ettikleri sonuçların, AGMA metodunu kullanarak yaptıkları teorik hesaplamalarla uyum içerisinde olduğunu bildirmektedir. Solidworks programı; arayüz, iki boyutlu çizimden üç boyutlu geometrik yapı oluşturma, parça modelleme, montajlama ve sonlu elemanlar yöntemine göre yapılan statik analiz gibi modülleri ile kullanışlı, kolay, hızlı ve hatasız uygulama olanakları sağlamaktadır.

Bu çalışmanın amacı, AISI 8620 ve AISI 5115 helisel dişli çarklara uygulanan gaz sementasyon ve düşük basınçlı sementasyon yüzey sertleştirme işlemlerinin dişli çarkların yorulma ömrü üzerindeki etkisini ortaya koymaktır. Bu amaçla Solidworks Premium 2015 SP 2.0 CAD programı kullanılmıştır.

2. Materyal ve Metot

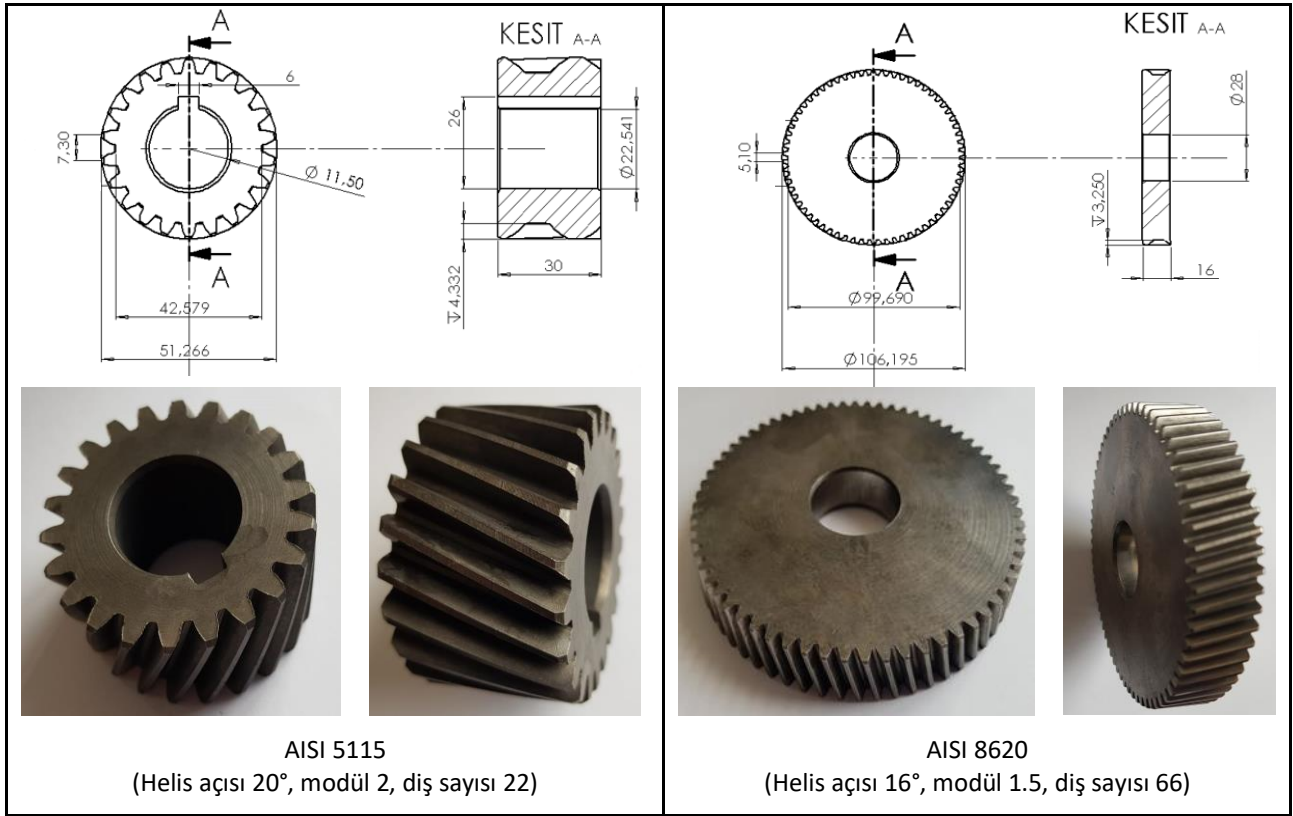
AISI 8620 ve AISI 5115 çelikleri dişli üretiminde yaygın olarak kullanılan sementasyon çelikleridir. Denemeye alınan helisel dişli çark numunelerin kimyasal içerik analizleri Bruker Q4 Tasman metal spektrometre ile yapılmış ve analiz sonuçları Çizelge 1'de verilmiştir. Helisel dişli çarklar malzemenin testere ile kesimi, tornada istenen çapa getirilmesi ve azdırma tezgahında dişlerin açılması adımları izlenerek üretilmiştir. Üretilen helisel dişli çarkların boyutları Şekil 1' de verilmiştir.

Denemelerde helisel dişli çarklara uygulanan yüzey sertleştirme ısı işlem koşulları Çizelge 2’ de verilmiştir. Mikroyapı fotoğraf çekimi ve sertlik dağılım profilinin belirlenmesinde, numuneler sırasıyla 80-120-240-400-800-1200-2000 kum SiC kağıtlar ve 6 µm elmas süspansiyon kullanılarak parlatılmıştır. Mikroyapı fotoğraf çekimi için parlatılan numuneler nital 2 (% 98 etil alkol, % 2

HNO₃) ile 10 saniye dağlanmışır. Mikroyapı fotoğraflarının çekilmesinde Nikon ECLIPSE MA100 optik mikroskop ve Clemex Vision Lite bilgisayar programı kullanılmıştır. Sertlik değerleri Emcotest Duroscan 20 mikro-sertlik cihazı ile (Şekil 2) 10 N yükün 10 saniye etki ettirilmesiyle Vickers sertlik ölçme yöntemine göre (ASTM 2017) saptanmıştır.

Çizelge 1. Denemeye alınan AISI 8620 ve AISI 5115 çeliklerin kimyasal kompozisyonu (% Fe kalan)

Malzeme	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al	Ti
AISI 8620	0.224	0.242	0.613	0.006	<0.150	0.402	0.223	0.406	0.187	0.034	0.0013
AISI 5115	0.193	0.298	1.106	0.006	<0.150	0.896	0.017	0.081	0.194	0.019	0.0017



Şekil 1. Helisel dişli çarkların boyutları.



Şekil 2. Sertlik ölçme cihazı ve örnek numuneler.

Çizelge 2. Helisel dişli çarklara uygulanan yüzey sertleştirme ısıl işlem koşulları

Isıl İşlem	Sıcaklık, Atmosfer Potansiyeli ve Süre	Sertleştirme Ortamı	Temperleme (Sıcaklık/ Süre)
Düşük Basıncılı Sementasyon (LPC)	Nötral ortamda numune sıcaklıkları 700°C den 900 °C ye 45 dakikada çıkarıldı. Ortam basıncı:700mbar 1.adım: 350ml C ₂ H ₂ , 970 °C, 15 dakika+ 2. adım: 100ml C ₂ H ₂ , 970 °C, 10 dakika + 3.adım (3 kez): 80ml C ₂ H ₂ , 970 °C, 10 dakika + Sertleştirme için numune sıcaklığı 860°C ye indirilmiştir.	Yağ / 70°C	200 °C / 120 dakika
Sementasyon	960°C, 1.35% C, 2 h + 960°C, 0.75 % C, 1 h + 820°C, 0.75%C, 1 h	Yağ /100 °C	170 °C / 120 dakika
Sementasyon (çift sertleştirme-double quenching-DQ)	1. Sertleştirme 960°C, 1.35% C, 2 h + 960°C, 0.75 % C, 1 h + 820°C, 0.75%C, 1 h 2. Sertleştirme 925 °C, 1.20%C, 1 h 40 dakika+ 925 °C, 0.75%, 30 dakika+ 860 °C, 0.75% C, 30 dakika	Yağ /100°C	170 °C / 120 dakika
		Yağ/ 60 °C	160 °C / 70 dakika

Yorulma analizlerinin yapılmasında, Solidworks Premium 2015 SP 2.0 CAD programında öncelikle katı model oluşturulmuş, Toolbox'da ANSI Metrik formunda bulunan dişli çarklar bölümünden helisel dişli seçilmiş, analizi yapılacak numunelerin diş sayıları, modülleri, diş açıları ve dişli boyutları girilerek katı modeller oluşturulmuştur. Farklı yüzey sertleştirme işlemleri sonucunda meydana gelen sert tabaka derinlik değerlerinden yararlanılarak katı modellere kabuklar oluşturulmuş ve katı model ile birleştirmeleri yapılmıştır (Şekil 3). Sementasyon işlemleri sonrası malzeme yüzeyinde oluşan efektif

sert tabaka kalınlığının belirlenmesinde $\frac{1}{2}$ diş yüksekliğinde sertliğin 50 HRC \approx 513 HV değerine düştüğü mesafe esas alınmıştır (ANSI/AGMA 2004). Efektif sert tabaka kalınlığı boyunca elde edilen sertlik değerlerinin ortalamaları alınarak elde edilen ortalama Vickers sertlik (HV) değerleri Pavlina ve Tyne' nin (2008) geliştirdiği denklem (1)'de yerine konularak, kabuklar için tanımlanması gereken akma gerilmesi değerleri MPa cinsinden bulunmuştur.

$$Akma Gerilmesi = - 90.7 + 2.876 \cdot HV \quad (1)$$

Oluşturulan kabuklar için ortalama akma gerilme değerleri esas alınmıştır ve malzeme kabuk özellikleri Solidworks malzemeler bölümünde güncellenmiştir. Aynı yaklaşım kabuk altındaki kısımların ortalama sertlik ve akma gerilme değerlerinin belirlenmesinde gösterilmiştir. Numunelerin analizini gerçekleştirmek için çalışacakları eş dişlileri oluşturularak montajla birleştirilmiştir. Eş dişli kabuk malzemelerinin gerilme değerleri de numunelerde olduğu gibi güncellenerek dişli grubu montajı tamamlanmıştır. Yapılan dişli grup montajlarında eş dişlilerin göbeklerine sabitleme ve döner mafsal özelliği atanmıştır. Redüktör içerisinde çalışan bu dişliler için tork değeri ve devir sayısı olarak, redüktör üreticisi firmanın verdiği devamlı çalışma değerleri kullanılmıştır (Çizelge 3). Dişlilerin devamlı çalışma tork değerleri statik analizde saat yönünde etki ettirilerek yükleme işlemi yapılmıştır. Katı modelleme kalitesini değerlendirmek için en temel ve en doğru yöntem, kaba mesh ile başlayıp yüksek hata oranlarını görerek sınır koşulları hakkında bilgi sahibi olmak, sonra mesh boyutunun belirli oranlarda küçültülerek ince mesh ile önceki gerilme değerinin karşılaştırılmasıdır. Gerilme değerinin bir önceki ile bir sonraki oran arasındaki değişimin çok az olduğu eleman boyutu yeterli mesh boyutunu verecektir. Katı modellemeler üzerinde yapılan mesh yakınsamaları sonucu elde edilen grafik incelendiğinde (Şekil 4) mesh aralığının maksimum 5 mesh boyutunda olmasının uygun olduğu saptanmıştır. Oluşturulan dişli montaj gruplarının yüklemeleri yapıldıktan sonra mesh oluşturma bölümünden; maksimum mesh aralığı 5 mm, minimum mesh aralığı 1 mm ve mesh ölçüm oranı 1.6 olacak şekilde mesh parametreleri girilerek mesh işlemi tamamlanmıştır (Şekil 3). Statik analiz yapılarak bulunan sonuçlar ile yorulma analizine geçilmiştir. Solidworks programında yorulma analizi modülü, belirtilen sınır koşullarda (yükleme, malzemenin akma gerilmesi, deformasyon miktarı vb.) çalışan elemanın analizini gerçekleştirir. Belirlenmiş bir katı modellemede yorulma analizi sonucu hasarın görülebilmesi için; yükleme türü, döngü sayısı, malzeme türü ve gerilim

dalgalanmaları bilgileri gereklidir. Belirli bir malzeme türüne yönelik gerekli bilgi, S-N eğrisi tarafından sağlanır. Yapılan çalışmada AISI 8620 ve AISI 5115 dişlileri için ayrı ayrı yorulma analizi etütleri açılarak ısıl işlem görmemiş dişlilere ait katı modellemelerin statik analizleri etüde eklenmiştir. Isıl işlem görmemiş dişlilere ait yorulma analizi S-N eğrisi seçimi veri tabanındaki "Karbonlu Çelik" modülünde yapılmıştır. Isıl işlem gören AISI 8620 ve AISI 5115 dişlilerinde her bir ısıl işlem metodu için ayrı ayrı yorulma analizi etütleri açılarak ısıl işlem görmemiş dişlilere ait statik analizler etüde eklenmiştir. Isıl işlem gören numunelerin ölçüm derinliğine (sert tabaka kalınlığı) göre hesaplanan gerilme değerleri S-N eğrisi veri tablosunda kullanılarak her bir ısıl işlem türü için S-N eğrisi tanımlanmıştır. Böylece program, girilen veriler ile doğrusal bir interpolasyon yaparak hesaplama gerçekleştirecektir. Diğer bir sınır koşulu yüklemeyi ve program bu yüklemeyi devir sayısı olarak almaktadır. Analiz sonucunda her bir ısıl işlem görmüş dişli için hata yüzdesi %100 olana kadar yükleme devir sayısı değiştirilerek analizler tekrarlanmıştır. Elastisite modülü ve poisson oranı çelik olarak Solidworks kütüphanesinden kullanılmıştır.

Çizelge 3. Dişli çarkların çalışma değerleri

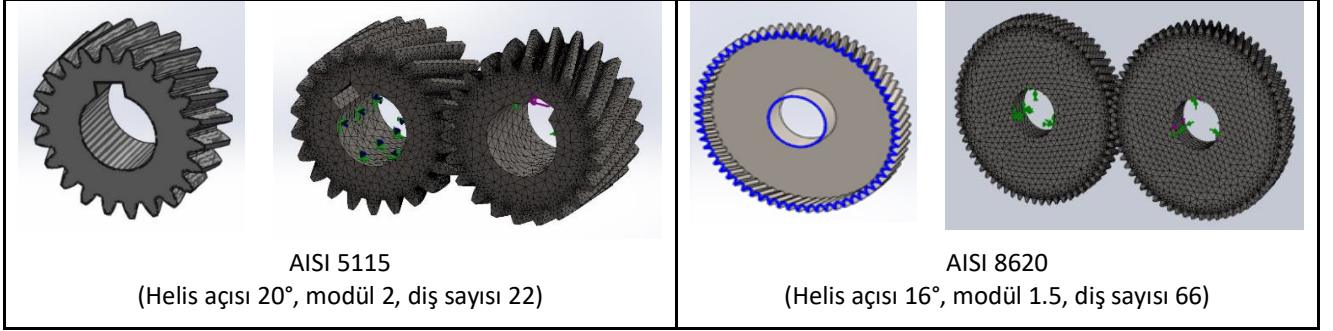
Dişli Çark	Tork (Nm)	Devir Sayısı (rpm)
AISI 5115	36	1400
AISI 8620	132	212

3. Bulgular

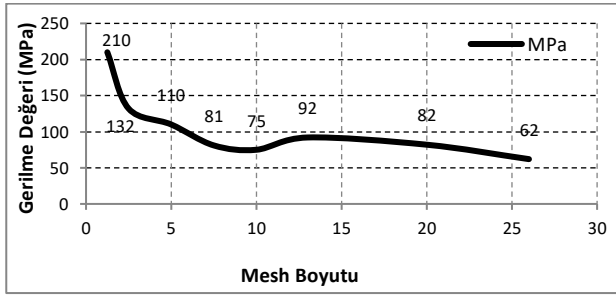
Numunelerin mikroyapı fotoğrafları Şekil 5' de verilmiştir. Sertleştirilmiş ve temperlenmiş numunelerde mikroyapı temperlenmiş martenzittir; yüzey karbonca zengin martenzit ve bir miktar artık östenitden oluşmaktadır. Isıl işlem görmemiş numunelerde yapı perlit ve ferritten oluşmaktadır. Sementasyon yapılmış dişlilerde istenen yüzey sertlik değeri, kalite 2 ve kalite 3 dişliler için 58-64 HRC' dir (ANSI/AGMA 2004). Yüzey sertleştirme işlemleri sonrası, incelenen dişli çark numunelerin ½ diş yüksekliğinde yüzeyden merkeze doğru sertlik dağılım değerleri Çizelge 4' de, bu sertlik değerlerine karşılık gelen akma gerilme değerleri Çizelge 5' de verilmiştir.

Statik analizler sonucunda elde edilen von Mises akma gerilme değerleri Çizelge 6' da, ısıtılmış helisel dişlilerin von Mises gerilme dağılımı ve von Mises maksimum gerilme bölgesi Şekil 6' te verilmiştir. Kabuk ve kabuk altı bölgeler için ortalama sertlik değerlerine karşılık gelen akma gerilme değerleri girilerek yapılan yorulma analizleri

sonucunda elde edilen ömür-tur sayıları Çizelge 7' de, redüktör üreticisi firmanın verdiği devamlı çalışma koşulları dikkate alınarak hesaplanan ömür-saat değerleri Çizelge 8' de, hasar yüzdeleri ise Çizelge 9 ve Çizelge 10' da verilmiştir. Ömür ve % hasar değerlerinin belirlenmesinde akma sınırı esas alınmıştır.



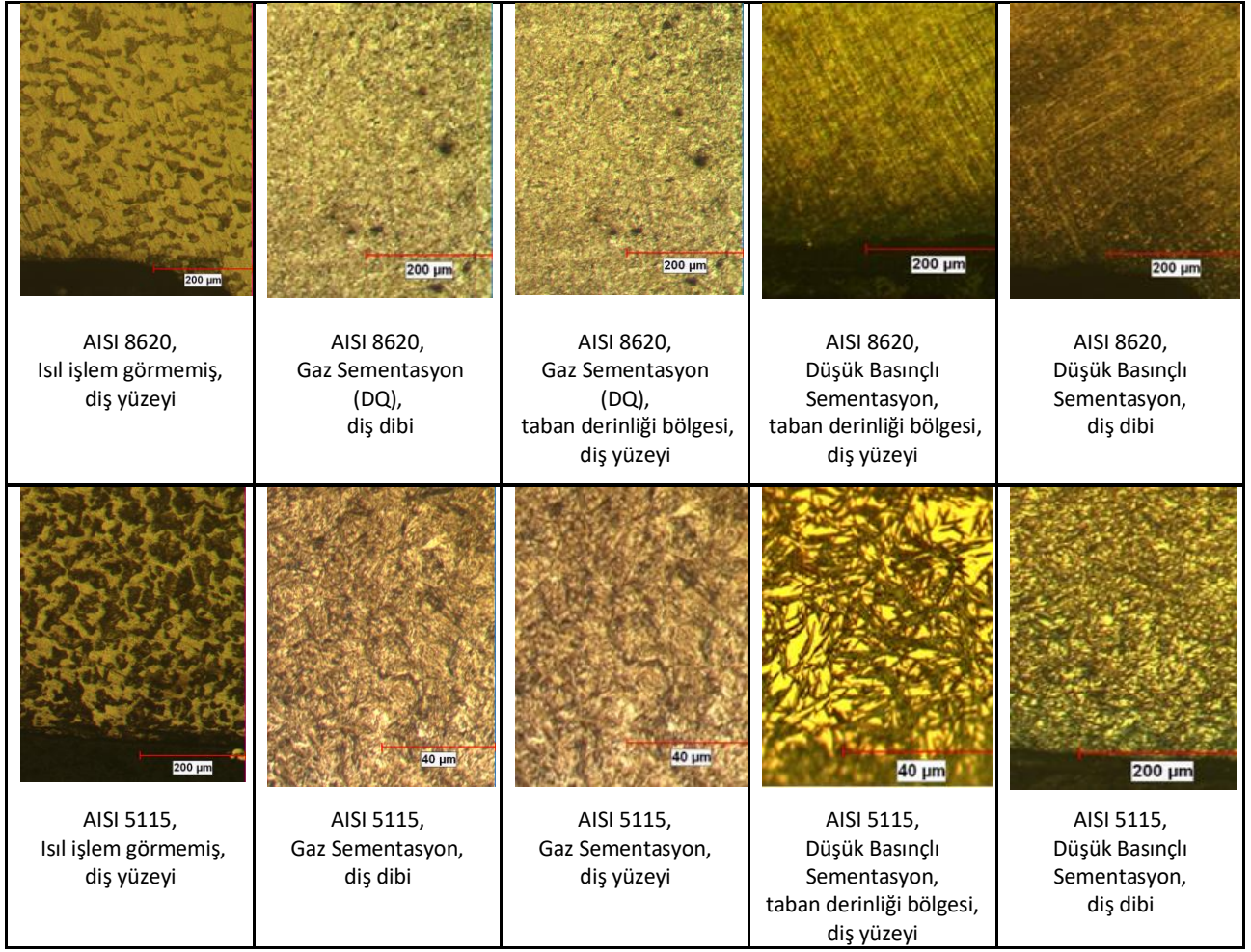
Şekil 3. Helisel dişli çarklar için oluşturulan kabuğun katı model montajı ve mesh görüntüleri.



Şekil 4. Katı modellemelerin yakınsama eğrisi.

Çizelge 4. Isıl işlem sonrası elde edilen sertlik değerleri (HV₁)

½ diş Yüksekliğinde Yüzeyden Uzaklık (mm)	AISI 5115 Helisel Dişli			AISI 8620 Helisel Dişli		
	Isıl İşlem Görmemiş	Düşük Basıncılı Sementasyon	Gaz Sementasyon	Isıl İşlem Görmemiş	Düşük Basıncılı Sementasyon	Gaz Sementasyon (DQ)
0.10	196	761	697	197	769	747
0.30	195	750	628	207	739	734
0.60	202	690	574	192	694	702
0.80	202	610	512	185	589	680
1.00	197	534	464	173	439	612
1.20	189	475	416	178	366	569
1.40	198	436	378	185	324	519



Şekil 5. Numunelerin mikroyapı fotoğrafları.

Çizelge 5. Sertlik değerlerine bağlı olarak hesaplanan akma gerilme değerleri (MPa)

½ diş Yükseğinde Yüzeyden Uzaklık (mm)	AISI 5115 Helisel Dişli			AISI 8620 Helisel Dişli		
	Isıl İşlem Görmemiş	Düşük Basıncılı Sementasyon	Gaz Sementasyon	Isıl İşlem Görmemiş	Düşük Basıncılı Sementasyon	Gaz Sementasyon (DQ)
0.10	472.9	2097.9	1913.8	475.8	2120.9	2057.6
0.30	470.1	2066.3	1715.4	504.6	2034.6	2020.2
0.60	490.2	1893.7	1560.1	461.4	1905.2	1928.2
0.80	490.2	1663.6	1381.8	441.3	1603.2	1864.9
1.00	475.8	1445.1	1243.7	406.8	1171.8	1669.4
1.20	452.8	1275.4	1105.7	421.2	961.9	1545.7
1.40	478.7	1163.2	996.4	441.3	841.1	1430.7

Çizelge 6. von Mises akma gerilme değerleri (MPa)

AISI 5115 Helisel Dişli			AISI 8620 Helisel Dişli		
Isıl İşlem Görmemiş	Düşük Basıncılı Sementasyon	Gaz Sementasyon	Isıl İşlem Görmemiş	Düşük Basıncılı Sementasyon	Gaz Sementasyon (DQ)
475.87	1833.34	1642	450.39	1810.33	1788.14

Çizelge 7. Dişlilerin ömür-tur sayısı

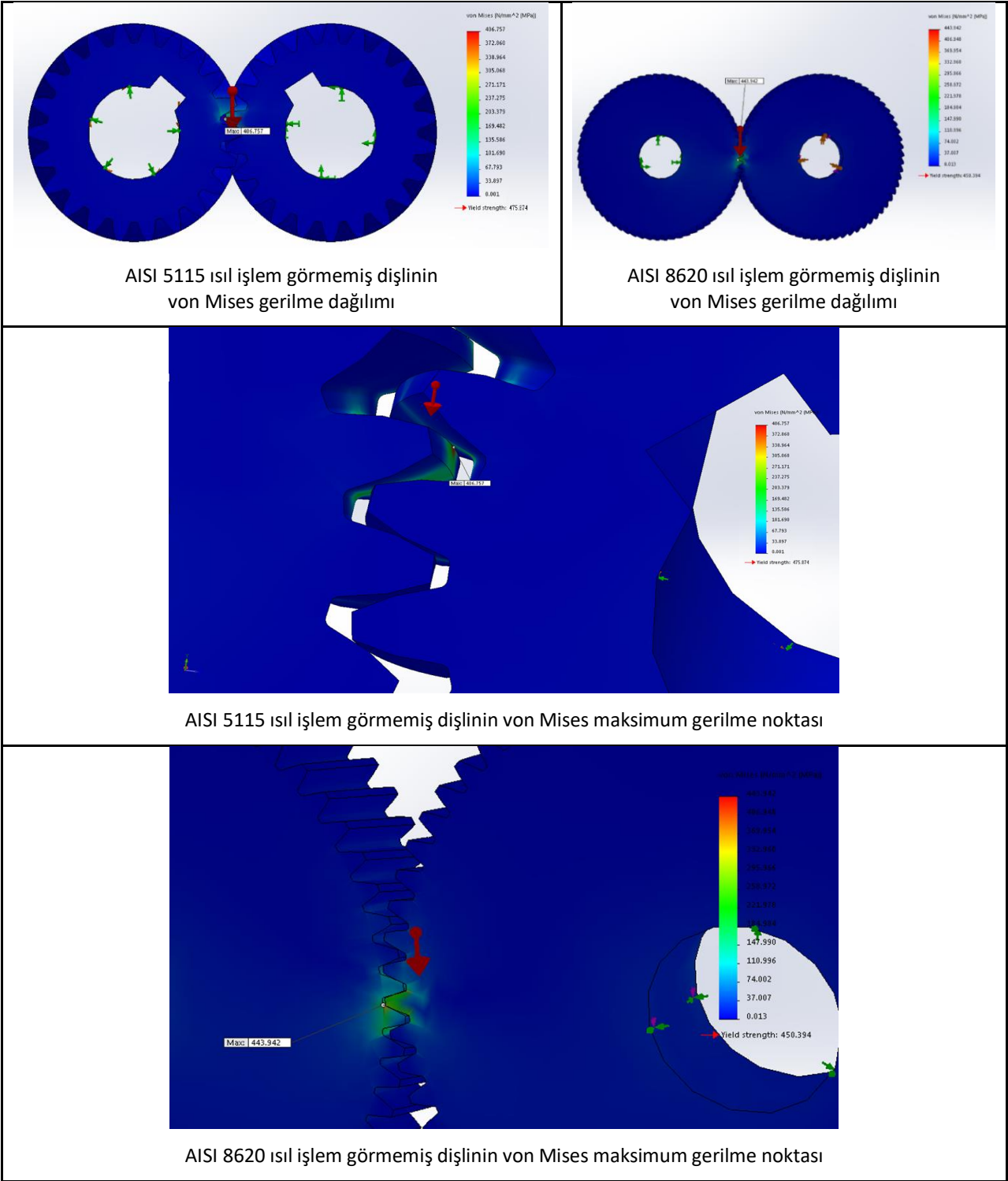
AISI 5115 Helisel Dişli (Tork: 36 Nm, 1400 rpm)			AISI 8620 Helisel Dişli (Tork: 132 Nm, 212 rpm)		
Isıl İşlem Görmemiş	Düşük Basıncılı Sementasyon	Gaz Sementasyon	Isıl İşlem Görmemiş	Düşük Basıncılı Sementasyon	Gaz Sementasyon (DQ)
366,240,718	790,471,887	720,619,942	167,327,793	614,293,058	629,203,913

Çizelge 8. Dişlilerin ömür-saat değerleri

AISI 5115 Helisel Dişli (Tork: 36 Nm, 1400 rpm)			AISI 8620 Helisel Dişli (Tork: 132 Nm, 212 rpm)		
Isıl İşlem Görmemiş	Düşük Basıncılı Sementasyon	Gaz Sementasyon	Isıl İşlem Görmemiş	Düşük Basıncılı Sementasyon	Gaz Sementasyon (DQ)
4360	9410.4	8578.8	13154.7	48293.4	49465.7

Çizelge 9. AISI 5115 helisel dişliler için yorulma analizi sonucunda elde edilen % hasar değerleri

Tur Sayıları	AISI 5115 Helisel Dişli (Tork: 36 Nm, 1400 rpm)		
	Isıl İşlem Görmemiş	Düşük Basıncılı Sementasyon	Gaz Sementasyon
1,000,000	0.273	0.126	0.138
5,000,000	1.365	0.632	0.693
10,000,000	2.730	1.265	1.387
20,000,000	5.460	2.530	2.775
50,000,000	13.652	6.325	6.938
100,000,000	27.304	12.650	13.876
250,000,000	68.261	31.626	34.692
366,240,718	100.0	46.331	50.823
500,000,000	-	63.253	69.384
642,473,148	-	81.277	89.155
720,619,942	-	91.163	100.0
790,471,887	-	100.0	-



Şekil 6. Isıt işlem görmemiş helisel dişlilerin von Mises gerilme dağılımı ve von Mises maksimum gerilme bölgesi.

Çizelge 10. AISI 8620 helisel dişliler için yorulma analizi sonucunda elde edilen % hasar değerleri

Tur Sayıları	AISI 8620 Helisel Dişli (Tork: 132 Nm, 212 rpm)		
	Isıl İşlem Görmemiş	Düşük Basıncılı Sementasyon	Gaz Sementasyon (DQ)
1,000,000	0.597	0.162	0.158
5,000,000	2.988	0.813	0.794
10,000,000	5.976	1.627	1.589
20,000,000	11.952	3.255	3.178
50,000,000	29.881	8.139	7.946
100,000,000	59.762	16.278	15.893
167,327,793	100.0	27.239	26.593
250,000,000	-	40.697	39.732
353,070,263	-	57.475	56.113
500,000,000	-	81.394	79.465
614,293,058	-	100.0	97.630
629,203,913	-	-	100.0

4. Tartışma ve Sonuç

Dişliler için istenen yüzey sertlik değerleri yapılan LPC ve gaz sementasyon işlemleri ile sağlanmıştır (Çizelge 4). Efektif sert tabaka kalınlığı (sertliğin 50 HRC \approx 513 HV değerine düştüğü mesafe), AISI 5115 çeliğinden yapılan helisel dişli çarklar için gaz sementasyonda 0.8 mm, LPC işleminde ise 1.05 mm olmuştur. Bu değer-AISI 8620 helisel dişlileri için, gaz sementasyon işleminde (iki kez sertleştirme-DQ) 1.4 mm, LPC işleminde ise 0.9 mm olmuştur. Sert tabaka kalınlığı dişlinin temas ve kırılma direncini etkileyen önemli bir parametredir. Yeterli kalınlıkta sert tabaka kalınlığının elde edilmesi, dişlinin temas direncinin geliştirilmesi bakımından önemlidir (Gençoğlu and Yazıcı, 2020). Ancak diğer yandan gereğinden yüksek sert tabaka kalınlığının diş çatlaması / kırılması problemlerine neden olabileceği unutulmamalıdır.

ANSI/AGMA (2004)' e göre, sementasyon yapılan dişlilerde ve normal kabuk kalınlığı durumunda, bitirme işlemleri sonrası önerilen minimum efektif

sert tabaka kalınlığı (he_{min}) değeri aşağıda verilen (2) numaralı ampririk denkleme göre hesaplanabilir. Sert tabaka kalınlığı, diş temas yükleri ve diş dibi gerilme bantlarının neden olduğu kesme gerilmeleri karşılayabilmek için yeteri kalınlıkta olmalı, ancak çekirdekte yüksek kalıntı çekme gerilmeler ve kırılğan diş uçlarına neden olacak yüksek kalınlıkta da olmamalıdır. Optimum efektif sert tabaka kalınlığı, daha düşük sert tabaka kalınlığında çukurlaşma eğilimi ile daha yüksek sert tabaka kalınlığında diş çatlaması / kırılması arasında hassas bir denge sağlar (ANSI/AGMA 2004). Ancak ANSI/AGMA (2004)' e göre standartta önerilen değerler sadece bir kılavuz olarak kullanılabilir ve bu değerler dişli müşterisi ile üretici firma arasında bir anlaşma konusu olabilir. Dişlilerde maksimum performans sağlayabilmek için; uygulama, yükleme ve üretim proseslerinde detaylı çalışmalar yapılmalı ve efektif sert tabaka kalınlığı dikkatle seçilmelidir.

$$he_{min} = 0.119935 \times Pnd^{*-0.86105} \quad (2)$$

* Pnd: Bölüm dairesi çapının her bir inch' lik bölümüne düşen diş sayısını gösterir ve birimi (1 / inch) dir.

Sementasyonla elde edilen sert tabaka kalınlığı işlem sıcaklığına ve süreye bağlı olarak artmaktadır. Yapılan yüzey sertleştirme işlemlerinde elde edilen efektif sert tabaka kalınlık değerleri önerilen h_{min} değerini sağlamıştır. LPC işlemi gaz sementasyona kıyasla, dişlilerde istenen yüzey sertlik ve minimum efektif sert tabaka kalınlığı değerlerini çok daha kısa işlem sürelerinde sağlamıştır. Düşük basınçlı sementasyon (LPC) işleminde, proses gazının ortama fasıllı olarak verilmesi ve difüzyon süreci C konsantrasyonunun yüzeyde yoğunlaşmasını önleyerek sementasyon derinliğinin oluşumuna ve C' nun iç yapıya difüzyonuna olanak sağlar. Gaz sementasyonda yüzeyde aşırı karbon konsantrasyonu kalıntı östenit oranını artırır ve bu da sertliği bir miktar düşürür. Ramasamy et al. (2019), SAE 8620 ve 20CrMo malzemelerinden üretilen dişli çarklara yapılan sementasyon işlemlerinde, yapıda artık östenite oranının azalmasının yorulma direncini iyileştirdiğini bildirmektedir. Yüksek sıcaklıklarda uzun işlem sürelerinin; bir yandan sert tabaka derinliğini arttırırken, diğer yandan tane büyüklüğünü ve taneler arası oksitlenmeyi arttırması (özellikle Mn, Cr ve Si içeren alaşımlarda), ve yine kalıntı gerilmelerin profilinin değişimine neden olmasının bir sonucu olarak, dişlinin temas ve eğilme yorulma direncini olumsuz olarak etkilediği bildirilmektedir (ANSI/AGMA 2004, Errichello and Milburn, 2020). Tanelerin kabalaşması yük taşıma kapasitesini olumsuz etkiler (ANSI/AGMA 2004, Tobie et al. 2017).

Yorulma analizleri sonucu hesaplanan dişlilerin ömür değerleri ve hasar yüzdeleri; malzemenin kimyasal içeriği, dişlilerin çalışma tork ve devri, yüzey sertleştirme ısıl işlemi sonucunda elde edilen efektif sert tabaka kalınlığı ve yüzey sertlik değerlerine bağlı olarak değişmiştir (Çizelge 7 - 10). Çizelge 7 - 10' dan görüleceği üzere, her bir dişli malzeme grubu kendi içerisinde değerlendirildiğinde, sertlik ve efektif sert tabaka kalınlığının artmasıyla ömür- tur sayılarının arttığı ve % hasar oranlarının düştüğü görülmektedir. AISI 5115 çeliğinden yapılan dişlilerde, ömür değerlerinin LPC işleminde gaz sementasyona kıyasla arttığı, hasar yüzdelerinin azaldığı

belirlenmiştir. AISI 8620 helisel dişli çarklarda çift sertleştirme yapılan gaz sementasyon işleminde elde edilen efektif sert tabaka derinliğindeki artış (Çizelge 4) ömür-tur sayısını arttırıcı etki sağlamıştır. Ancak bu ısıl işlem prosesinde, işlem süresinin LPC işlem süresinin yaklaşık yedi katı bir değerde olduğu (Çizelge 2) göz ardı edilmemelidir. Yüksek sıcaklıklarda işlem sürelerinin uzaması bir yandan enerji tüketim maliyetlerini arttırırken, diğer yandan dişlinin ömrü üzerinde olumsuz etki yapabilmektedir. Yüksek sıcaklıklarda uzun işlem sürelerinin neden olacağı tane büyüklüğündeki artış, taneler arası oksitlenme, artık gerilmelerin değişiminin temas ve eğilme yorulma direnci üzerindeki etkileri ve gereğinden yüksek sert tabaka kalınlığının neden olabileceği sorunlar ancak mekanik yorulma testleri ile ortaya konulabilir. Bu tür simülasyon çalışmalarının bu bağlamda kısıtlamalar içerdiği unutulmamalıdır.

Gaz ve düşük basınçlı sementasyon yüzey sertleştirme ısıl işlemlerinin AISI 8620 ve AISI 5115 helisel dişli çarkların yorulma ömrüne etkilerinin incelendiği bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir;

-Yapılan gaz ve düşük basınçlı sementasyon yüzey sertleştirme işlemlerinin sonucunda elde edilen efektif sert tabaka kalınlık değerleri, dişliler için yeterli temas ve kırılma direncini sağlayacak asgari değerlerin üzerindedir.

-Düşük basınçlı sementasyon işleminin gaz sementasyon işlemine kıyasla istenen yüzey sertlik ve efektif sert tabaka kalınlığını çok daha kısa işlem sürelerinde sağladığı belirlenmiştir. Isıl işlem süresinin kısılması enerji tasarrufuna ve dişlinin ömrünün uzamasına imkan sağlar.

-Dişlilerin ömür-tur sayıları, yüzey sertleştirme işlemleri sonucunda elde edilen yüzey sertliği ve sert tabaka kalınlığının artmasıyla artmıştır. Yüzey sertliği ve sert tabaka kalınlığındaki artış % hasar oranlarının azalmasına neden olmuştur.

Teşekkür

Yazarlar deney numunelerinin temini konusunda her türlü imkan ve desteği sağlayan Ege Redüktör Firmasına, numunelerin yüzey sertleştirme işlemlerinin yapılmasında destek veren Batı Isıl İşlem Firmasından Sayın Elif Kınalı Numanoğlu' na ve Akademi Metalurji Firmasından Sayın Levent Altuntaş' a teşekkür eder.

5. Kaynaklar

Akkurt, M., 2005. Makine Elemanları. Cilt I, Birsen Yayınevi, 21.

ANSI/AGMA 2001-D04, 2004. American National Standard, Fundamental Rating Factors and Calculation Methods for Involute Spur and Helical Gear Teeth. American Gear Manufacturers Association, USA.

ASTM E92-17, 2017. Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials. ASTM International, USA.

Collin, R., Gunnarson, S. and Thulin, D., 1972. Mathematical model for predicting carbon concentration profiles of gas-carburized steel. *Journal of the Iron and Steel Institute*, **210** (10), 785-789.

Davis, J. R., 2002. Surface Hardening of Steels: Understanding the Basics, ASM International, Materials Park, 91.

Dengo, C., Meneghetti G., Dabalà M., 2015. Experimental analysis of bending fatigue strength of plain and notched case-hardened gear steels. *International Journal of Fatigue*, **80**, 145-161.

Errichello, R., Milburn, A., 2020. Optimum Carburized and Hardened Case Depth. *Gear Technology*, 58-65.

Fernandes, C.M.C.G., Marques P.M.T., Martins, R.C. and Seabra J. H.O., 2015a. Gearbox power loss. part II: friction losses in gears. *Tribology International*, **88**, 309-316.

Fernandes, C.M.C.G., Battez A.H., González R., Monge R., Viesca J.L., García A., Martins R.C. and Seabra J.H.O., 2015b. Torque loss and wear of fzg gears lubricated with wind turbine gear oils using an ionic liquid as additive. *Tribology International*, **90**, 309-316.

Gawroński, Z., Malasiński, A. and Sawicki, J., 2010. Elimination of galvanic copper plating process used in

hardening of conventionally carburized gear wheels. *International Journal of Automotive Technology*, **11**, 127-131.

Gençoğlu, S., Yazıcı, A., 2020. Surface Characteristics and Distortion Analysis of the Case-Hardened Helical Gears: A Comparison of Different Case-Hardening Treatments. *Transactions of The Indian Institute of Metals*, **73** (1): 119-126.

Krauss, G., 1991. Metals Handbook. ASM International, Metals Park, OH, 363-375.

Mahakul, R., Thatoi, D. N., Choudhury, S., Patnaik, P., 2020. Design and numerical analysis of spur gear using SolidWorks simulation technique. *Materials Today: Proceedings* (Article in press, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.554>)

Pavlina, E.J. and Van Tyne C.J., 2008. Correlation of Yield Strength and Tensile Strength with Hardness for Steels. *Journal of Materials Engineering and Performance*, **17** (6), 888-893.

Poor, R.P., Barbee, W. and Brug, J.E., 2007. Furnace for vacuum carburizing with unsaturated aromatic hydrocarbons. US Patent No. 7,267,793 B2, United States Patent Application Publication, 1-14.

Ramasamy, R., Sivathanu, S., Neelakandan, V., Ganesan, T., Rao, P.C., 2019. Influence of Retained Austenite on Fatigue Performance of Carburized Gears. SAE Technical Paper 2019-28-0102.

Ryzhov, N.M., Fakhurtdinov, R.S. and Smirnov, A.E., 2010. Cyclic strength of steel 16Kh3NVFBM-Sh (VKS-5) after vacuum carburizing. *Metal Science and Heat Treatment*, **52**, 61-66.

Savaria, V., Monajati H., Bridier F. and Bocher P., 2015. Measurement and correction of residual stress gradients in aeronautical gears after various induction surface hardening treatments. *Journal of Materials Processing Technology*, **220**, 113-123.

Wang, H., Wang, B., Wang, Z., Tian, Y., Misra, R. D. K., 2019. Optimizing the low-pressure car-burizing process of 16Cr3NiWMoVnBe gear steel. *Journal of Materials Science and Technology*, **35**(7):1218-1227.

Tobie, T., Hippenstiel F. and Mohrbacher H., 2017.

Optimizing gear performance by alloy modification of carburizing steels. *Metals*, **7** (10),415-475.

Zaroor, A.K., Almuramady, N. and Hussein E. S., 2018. Stress Analysis for Spur Gears Using Solid Works Simulation, *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*, **9** (11), 927-936.

İnternet kaynakları

- 1- Chaush, Y., 2008. ANSYS Workbench ile Yorulma Analizi, Bitirme Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü.
http://ansys.deu.edu.tr/wp-content/uploads/cmdm/348/1450272307_Yorulma-WB.pdf, (13.12.2020)

Elektronik Diferansiyel İçin Farklı Viraj Çaplarındaki Sürtünme Katsayısının Tekerlek Hızlarına Etkisi

İbrahim YAVUZ^{1*}, Ali ÖZEK²

¹ Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar.

² Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı, Afyonkarahisar.

*Sorumlu yazar: e-posta: ¹ iyavuz@aku.edu.tr

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4480-2342>

² aliozek96@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3752-3222>

Geliş Tarihi: 05.02.2020

Kabul Tarihi: 02.12.2020

Öz

Anahtar kelimeler

Elektrikli Araç;
Elektronik Diferansiyel;
Matlab Simulink;
Taşıt Dinamiği

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte gün geçtikçe elektrikli araçlar trafikte yaygınlaşmaktadır. Bu çalışmada elektrikli araçlarda kullanılan elektronik diferansiyelin avantajlarından bahsedilerek, simülasyon üzerinden kullanım parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışmanın başında elektronik diferansiyel kontrol sistemini anlamak, gerekli çalışma şartları ve kısıtlarını belirlemek için, mekanik bir diferansiyel sisteminin çalışma sistemi incelenmiştir. Simülasyon için bir taşıt mimarisi belirlenmiş ve bu mimariye uygun olarak elektronik diferansiyel MATLAB/SIMULINK ortamında modellenmesi yapılmıştır. Modelleme ile farklı viraj çaplarında ve sürtünme katsayısındaki değişimine göre maksimum taşıt hızı belirlenmiştir. Simülasyon sonuçlarında sürtünme kuvveti arttıkça tahrik tekerlekleri arasındaki hız farkı arttığı tespit edilmiştir.

Effect Of Friction Coefficient Of Different Curve Diameters On Wheel Speeds For Electronic Differential

Abstract

Keywords
Electric Vehicle;
Electronic Differential;
Matlab Simulink;
Vehicle Dynamics

With the development of technology, electric vehicles are becoming widespread in traffic day by day. In this study, the advantages of the electronic differential used in electric vehicles are discussed and the usage parameters are determined by simulation. At the beginning of the study, the working system of a mechanical differential system was examined in order to understand the electronic differential control system and determine the necessary working conditions and constraints. A vehicle structure was determined for simulation and modeled in electronic differential MATLAB / SIMULINK environment in accordance with this structure. By modeling, the maximum vehicle speed was determined according to the change in different bend diameters and friction coefficient. In the simulation results, it was determined that the speed difference between the drive wheels increases as the friction force increases.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

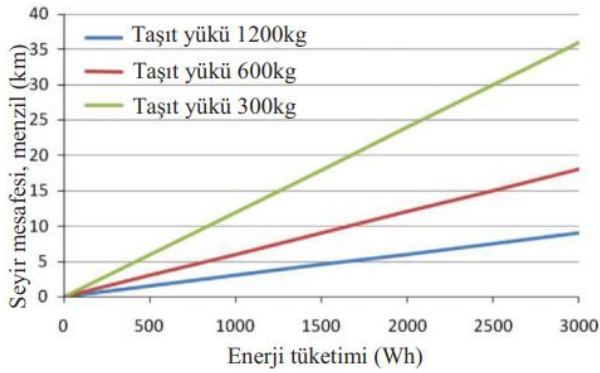
1. Giriş

Ulaşım, günlük yaşamımızda önemli bir yer kaplamaktadır. Günümüzde vazgeçilmez bir sektör olan ulaşımda kişisel otomobillerin oranı hızla artmaktadır. Bununla beraber çevre kirliliğinin artması, petrol rezervlerinin azalması ve enerji problemlerinin yaşanmasından dolayı enerjide verimlilik ve tasarruf ön plana çıkmaktadır. Bu sebeplerden dolayı alternatif kaynaklı, temiz ve yenilenebilir enerjilerin otomotiv sektöründe

kullanımı son yıllarda ivme kazanmıştır. Tüm bunlar düşünüldüğünde elektrikli araçlar teknolojinin getirdiği yeniliklerle birlikte geleceğin teknolojisi olarak görülmektedir (Akbiyık 2018, Önder 2018).

Elektrikli araçlar çevre dostu ve sessiz araçlardır. Ayrıca içten yanmalı araçlarda verim %40 civarında iken elektrikli araçlarda %90 verim sağlanabilir. Yüksek verimle çalışan bu araçlar basit yapıya sahiptirler. Dişli kutusu, egzoz sistemi, soğutma

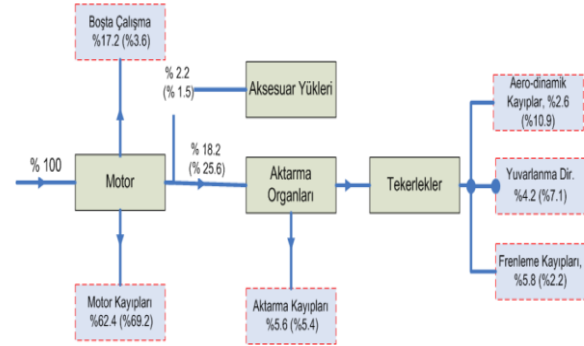
sistemi gibi konvansiyonel araçlarda kullanılması gereken yapılara ihtiyaç duymazlar. Tüm bunların yanında konvansiyonel araçlarda frenleme ile elde edilen elektrik enerjisi bataryalar üzerinde depolanıp tekrar kullanılabilir. Elektrikli araçların sağladığı bu avantajların yanında menzil ve batarya ömrünün kısa olması ve ayrıca şarj sürelerinin uzun olması problem oluşturmaktadır. Yaşanılan bu soruna Hibrit araçlar daha stabil çözümler sunsa da birincil seviyede fosil yakıtta olan ihtiyacından dolayı tam bir çözüm oluşturmaz. Fosil yakıtlara ihtiyaç duymayan tümü elektrikli araç sistemlerinde ise bu sorunun çözümü için enerji tüketiminin azaltılması gerekmektedir. Taşıtın enerji tüketiminin azaltılması için, taşıtın ağırlığının azaltılması, güç aktarımı sırasında kaybın önlenmesi ve aerodinamik direncin azaltılması gerekmektedir. Konvansiyonel araçlarda bu kaybın en büyük sebeplerinden bir tanesi güç aktarma organlarıdır. Örneğin bir taşıtta diferansiyel ve vites kutusunun ağırlığı yaklaşık olarak taşıt ağırlığının 1/10'na denk gelmektedir. Şekil 1'deki grafikten de anlaşılacağı üzere ağırlık ve menzil arasında ters orantılı bir ilişki vardır (Ayçiçek 2008, Gökçe 2015, Kartal 2018).



Şekil 1. Değişik taşıt ağırlıklarında, enerji tüketimi ve seyir mesafesi arasındaki ilişki (Soydan, 2016)

Günümüz taşıtlarında motorun krank milinden alınan hareket önce vites kutusuna aktarılır. Daha sonra da bu hareketi tekerleklere aktarmak için diferansiyel mekanizması mevcut olup, bu mekanizma yıllardır sorunsuz çalışabilmektedir. Fakat bu diferansiyel mekanizması hem fazla yer kaplamakta, hem de ağırdır. Orta boyutlardaki bir aracın aktarma organlarındaki güç kaybı Şekil 2'de görülmektedir.

İçten yanmalı motor kullanılan günümüz taşıtlarında bugüne kadar diferansiyel sistemine bir alternatif geliştirilmemiştir. Ancak elektrikli araçlarda içten yanmalı motor yerine birçok çeşitte ve boyutlarda elektrik motorları kullanılmaktadır.



Şekil 2. Orta ölçekli bir taşıtın şehir içi ve şehir dışı çevriminde harcadığı enerji miktarları (Boyalı 2008)

Bundan dolayı da içten yanmalı motorlara kıyasla daha iyi kontrol edilebilirler. Elektrikli taşıtlarda krank biyel mekanizması olmadığı için hareket kontrolünde daha esneklerdir. Bu esneklik de güç aktarımında diferansiyel mekanizmasına ihtiyaç duymadan elektrik motorlarını direkt aracın tekerlek sistemine bağlayabilme imkânı (HUB motor) sağlar. Böylece araç, üzerindeki ağırlıklardan büyük bir oranda kurtulmuş olunur ve taşıtın hafifletilmesi sağlanır. Bu gibi avantajlardan dolayı elektrikli taşıtların mekanik verimleri daha da arttırılabilir. Kazanılan bu enerji sayesinde elektrikli araçların menzil artışı sağlanmış olur (Int Kyn. 1).

Taşıtın hareket sistemine doğrudan yerleştirilen elektrik motorları, kontrol sistemleri ile geleneksel taşıtlardaki diferansiyel sisteminin yaptığı işi yapabilmektedir.

Mekanik diferansiyelde, vites kutusundan gelen hareket bir pinyon dişli (mahruti dişlisi) aracılığı ile, kovan üzerine monte edilen ayna dişlisine aktarılır. Ayna dişlisi diferansiyel içerisinde bulunan bir dişli kutusuna civatalarla bağlanmış olup dişli ile birlikte bu kutu da hareket etmektedir. Bu dişli kutusu içerisinde iki adet aks dişlisi ve iki adet de istavroz dişlisi adı verilen dişliler mevcuttur. Aks dişlileri iç kısmı frezeli olup aks milleri bu frezeli kısımlara yerleştirilir. Taşıt doğrusal hareketi esnasında, dönme hareketi mahruti dişlisinden ayna dişlisine,

ayna dişlisinden ise dişli kutusu aracılığı ile aks dişlilerine ve buradan da akslar milleri ile tekerleklere kadar iletilmektedir. Bu durumda istavroz dişlileri sabittir.

Taşıtın viraja girmesi ile iç taraftaki tekerleğe binen yük ve dış tarafta kalan tekerin daha büyük bir mesafeyi kat etmeye zorlanması sebepleri ile, iç teker aks dişlisinin yavaşlamasına neden olur. Bu çalışma şartlarında diferansiyel dişli kutusu içinde bulunan iç teker aks dişlisi yavaşlamaya çalışacak, dış taraf aks dişlisi de hızlanmaya çalışacaktır. Aks dişlilerinin bu hareket değişimlerini sağlayabilmek için istavroz dişlileri kendi eksenleri etrafında hareket ederek bu hız farkı oranında içteki aks dişlisinden aldığı hareketi dıştaki aks dişlisine iletecektir. Böylece dış teker aks dişlisi hem diferansiyel dişli kutusundan gelen hareket, hem de istavrozların verdiği hareketle kendi eksen etrafında dönmeye başlar. İç ve dış aks mili dişlileri bu iki tahrik sebebi ile tekerlerin ihtiyaçları ölçüsünde farklı hızlarda dönmeleri sağlanmış olur.

Belirli tekerlek devri sınırının üzerinde moment yüklemesinde ise kaygan zemin üzerindeki tekerlek, yola tutunamaz. Bundan dolayı tekerin devir sayısında kontrolsüz bir artış meydana gelir. Günümüz taşıtları için diferansiyeller, tahrik tekerlerinin kontrolsüz dönüşlerini sınırlandıran yani dönüşleri birbirine kısmen veya tamamen kilitleyen hidrolik, elektronik veya mekanik yardımcı sistemlerden biri kullanılmaktadır (Topaç 2010). Arslan 2011'de yapmış olduğu tez çalışmasında 8 m yarıçaplı bir daire, aks aralığı 1,5 m olan taşıtın 90°'li bir yay üzerinde dönüş yapan taşıt için, taşıtın tekerleklerindeki devir değişimleri üzerinde çalışma yapmış olup yapmış çalışmanın verileri ise Çizelge 1'de görülmektedir.

Çizelge 1. Araç hareket halindeyken mekanik bir diferansiyel sistemindeki devir değişimleri (Arslan 2011)

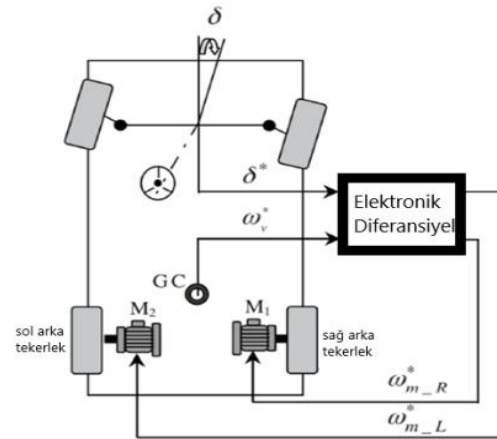
Ayna dişli	Sol Aks Dişlisi	Sağ Aks dişlisi	Durum
500 d/dk	480 d/dk	520 d/dk	Sol Viraj
500 d/dk	Hareketsiz	485 d/dk	Patinaj
500 d/dk	500 d/dk	500 d/dk	Düz Sürüş

Dolayısıyla elektrikli diferansiyelden de mekanik diferansiyel işlevlerini yerine getirmesi beklenmektedir. Elektronik diferansiyel dört temel unsuru yerine getirebilmesi gerekmektedir. Bunlardan birincisi viraj esnasında dönüş tekerlerinin devir farkını uygun olarak ayarlamalı, iki teker arasındaki devir farklarını tolere edebilmesi, taşıtın düz gideceği zaman yoldan sapma yapmasını engelleyerek her iki tekerin farklı zemin şartlarında düz ilerlerken doğrultuyu korumasını sağlamalı, bozuk yolda hareket ilerlerken taşıtın doğrultusunda sapma olmadan ilerleyebilmesinin sağlanmasıdır (Int Kyn. 1).

Bu çalışmada elektronik diferansiyel MATLAB/SIMULINK de modellenmiş ve farklı viraj çaplarındaki sürtünme katsayısının tekerlek hızlarına olan etkisi incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

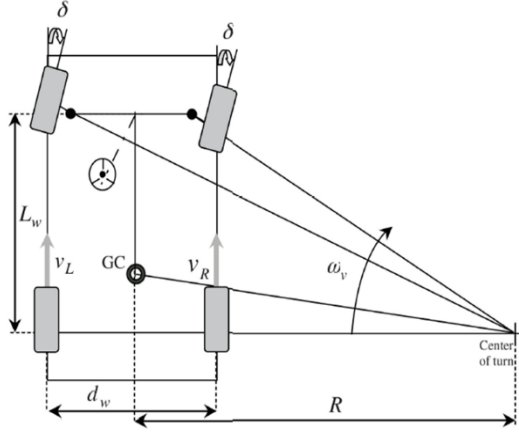
Elektronik diferansiyelin çalışma şartlarının ve kıyaslarının belirlenmesi için mekanik bir diferansiyel mantığının anlaşılması ve modellenmesi için de matematiksel olarak karakteristiklerinin belirlenmesi gerekmektedir.



Şekil 3. Modelleme için belirlenen tahrik sistemi mimarisi

Elektronik diferansiyelin modellenmesi için iki tekerlekten iki motorla tahrik edilen bir taşıt mimarisi belirlenmiştir (Şekil 3). Ayrıca viraj yörüngesinde taşıtın stabil olarak hareket edebilmesi için tahrik edilen tekerleklerde bulunan motorların kontrol edilmesi gerekmektedir. İki ayrı tekerlek iki ayrı motordan tahrik edildiği için, virajın

dışında kalan tekerleğin hızının virajın içinde kalan tekerleğin hızından büyük olması gerekmektedir. Mekanik diferansiyel bu hız farkını dişliler yardımıyla gerçekleştirmektedir ve bu hız farkı genel olarak Ackerman geometrisi yardımıyla matematiksel olarak modellenir (Şekil 4).



Şekil 4. Ackerman Geometrisi

Her bir tekerleğin doğrusal hızı, araç hızının ve viraj çapının bir fonksiyonu olarak ifade edilir;

$$V_L = W_v \times \left(R + \frac{d_w}{2}\right) \quad (1)$$

$$V_R = W_v \times \left(R - \frac{d_w}{2}\right) \quad (2)$$

Viraj çapı ise, iz genişliği ve direksiyon açısı ile ilgilidir.

Çizelge 2. Lastiklerin yol yüzeyindeki tutunma katsayısı (μ_{r0}), (Bosch 1999)

Taşıt hızı km/h	Lastiğin durumu	Yolun durumu				
		Kuru	Islak, su derinliği ~0.2 mm	Şiddetli yağmur su ~ 1 mm	Su derinliği ~ 2 mm	Buzlu
50	Yeni	0.85	0.65	0.55	0.5	0.1
	Aşınmış	1.0	0.5	0.4	0.25	Daha az
90	Yeni	0.8	0.6	0.3	0.05	Daha az
	Aşınmış	0.95	0.2	0.1	0.05	Daha az
130	Yeni	0.75	0.55	0.2	0	Daha az
	Aşınmış	0.9	0.2	0.1	0	Daha az

Sürtünme, lastikleri yolda tutan kuvettir. Gerçekten sıfır sürtünme olduğu varsayılırsa tekerlekler hareket olmadan döneceği için taşıt

$$R = \frac{L_w}{\tan \delta} \quad (3)$$

3. denklemde elde ettiğimiz R değerini 1. ve 2. Denklemde yerlerine yazarsak, tahrik edilen her bir tekerleğin çizgisel hızları bulunmuş olur.

$$W_{rL} = \frac{L_w + \left(\frac{1}{2} \times d_w \times \tan \delta\right)}{L_w} \times W_v \quad (4)$$

$$W_{rR} = \frac{L_w - \left(\frac{1}{2} \times d_w \times \tan \delta\right)}{L_w} \times W_v \quad (5)$$

iki tekerlek arasındaki açısal hız farkını bulursak;

$$\Delta W = W_{rL} - W_{rR} = \frac{d_w \times \tan \delta}{L_w} \times W_v \quad (6)$$

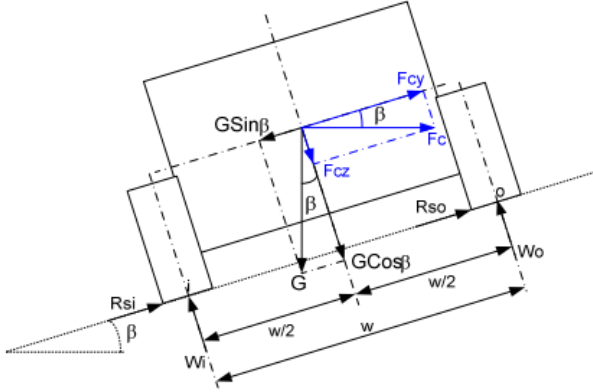
Örneğin elektronik bir diferansiyelde direksiyon açısının sayısal değerine göre viraj yönü belirlenebilir;

- $\delta > 0$ ise sağa dönüş
- $\delta = 0$ ise düz sürüş
- $\delta < 0$ ise sola dönüştür.

Taşıt bir viraja girdiğinde direksiyon açısı değiştiği andan itibaren elektronik diferansiyel kartı anlık olarak aldığı referans hız ile iki tekerleğe de anında etki eder (Hartanı 2009).

hareket edemez. Frenleme kuvvetinin dinamik aks yüküne oranı "tutunma katsayısı" olarak tanımlanır.

Tutunma katsayısı değeri, tekerlekle yol arasındaki sürtünmeye bağlıdır ve hem frenleme kuvveti hem de dinamik yüke göre değişir. Tutunma katsayısı, frenleme anında tekerleğin tam kilitlenmeden önceki değeridir. Tutunma katsayısı, ancak tekerlek kilitlendiği andaki sürtünme katsayısına eşit değerdedir (Bayrakçeken ve Düzgün 2005). Bu sebeple Çizelge 2’de tekerlek ile farklı yol şartları arasındaki tutunma katsayıları verilmiştir.



Şekil 5. Viraja giren bir taşıta etkileyen kuvvetler (Çetinkaya 2004)

Taşıt bir virajda düşük hızla girerse dışarıya, yine çok yavaş girerse içe doğru kayar. Dışarıya doğru kayma halinde tekerleklerle yol yüzeyi arasındaki sürtünme kuvveti $[(F)_s]$ içeriye doğru aksi durumda ise dışarıya doğru oluşur. Taşıtla yol arasındaki sürtünme kuvveti belirli deneyler sonucunda belirlenmiştir.

Sürtünme kuvveti içeriye doğru olup taşıt üzerindeki vektörel toplamı ise;

$$(F_N \times \sin \beta)i + (F_N \times \cos \beta)j + (F_s \times \cos \beta)i - (F_s \times \sin \beta)j - (mg)j \quad (8)$$

olur.

Bu toplam kuvvetin taşıtın kütlesiyle x yönündeki $a = \frac{v^2}{r}$ ivmesinin çarpımına eşit olması gerekir.

$$(F_N \times \sin \beta)i + (F_N \times \cos \beta)j + (F_s \times \cos \beta)i - (F_s \times \sin \beta)j - (mg)j = \frac{m \times v^2}{r_i} \quad (9)$$

Bu eşitlikten x ve y bileşenleri eşitliğinde, sırasıyla;

$$(F_N \times \sin \beta) + (F_s \times \cos \beta) = \frac{m \times v^2}{r} \quad \text{ve} \quad (F_N \times \cos \beta) - (F_s \times \sin \beta) - (m \times g) = 0 \quad (10)$$

ifadeleri bulunur.

$$F_s = \mu \times F_N \quad (11)$$

olduğuna göre, bu ifadeler;

$$\frac{m \times v^2}{r} = \frac{(m \times g) \times (\sin \beta + \mu \times \cos \beta)}{\cos \beta - \mu \times \sin \beta} \quad (12)$$

kütleleri sadeleştirip, sağ taraftaki parantezlerin içinden $\cos \beta$ parantez dışına çekildiğinde

$$\frac{v^2}{r} = \frac{g \times (\tan \beta + \mu)}{1 - (\mu \times \tan \beta)} \quad (13)$$

elde edilir.

Bu da nihayet hızın üst sınırını elde edilir.

$$V_{max} = \frac{g \times r (\tan \beta + \mu)^2}{1 - (\mu \times \tan \beta)} \quad (14)$$

Eşitliği elde edilir.

Bu eşitlikte g (yerçekimi ivmesi), r (viraj çapı) ve μ (sürtünme katsayısı) ifade edilir. Yine bu eşitlikten yola çıkılarak yol eğiminin 0 olduğu durumlarda, yola verilmesi gereken eğim açısının ve sürtünme kuvvetinin viraj esnasında araç üzerinde oluşturduğu kuvvetler doğrultusunda V_{max} hızı elde edilir.

3. Bulgular

Matlab modelinde bahsedilen matematiksel formülasyonların kombinasyonu ile elde edilen ve MATLAB/SIMULINK üzerinde modellenen elektronik diferansiyel diyagramı ve SIMULINK modeli Şekil 6 da görülmektedir.

Simülasyon için belirlenen taşıt özellikleri ise;

Taşıtın dingil mesafesi = 2,49 m;

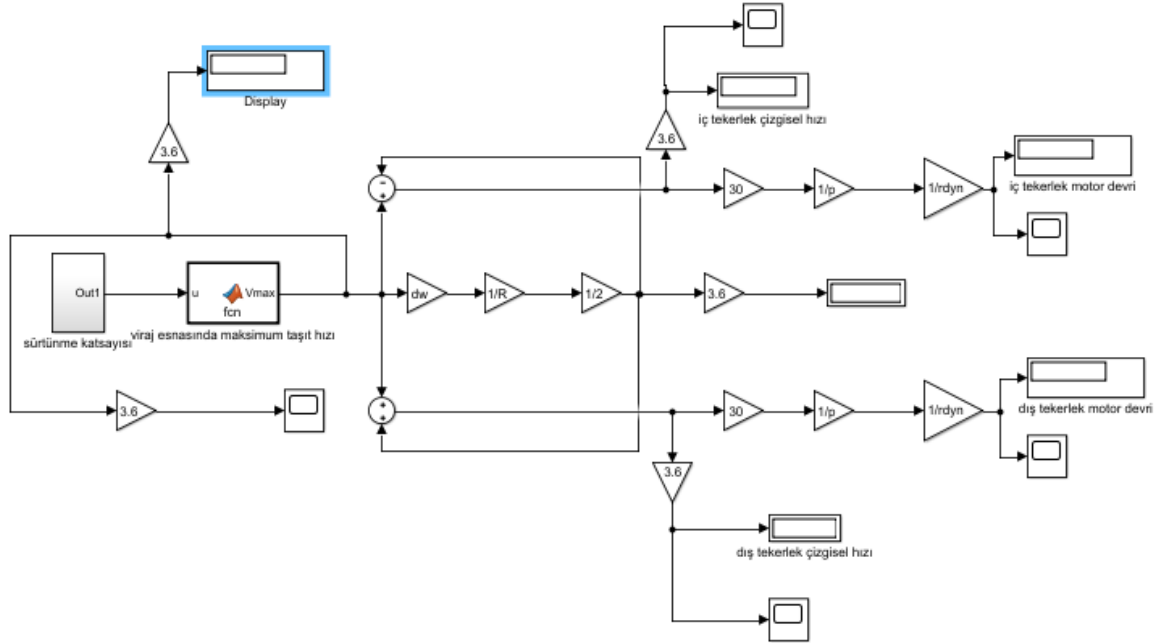
Tekerlekler arası mesafe = 1,327 m;

Ayrıca simülasyonda farklı viraj çapları ise kara yolları genel müdürlüğü tarafından belirlenen dönel kavşaklarda minimum viraj çapı olan 30m alınmıştır.

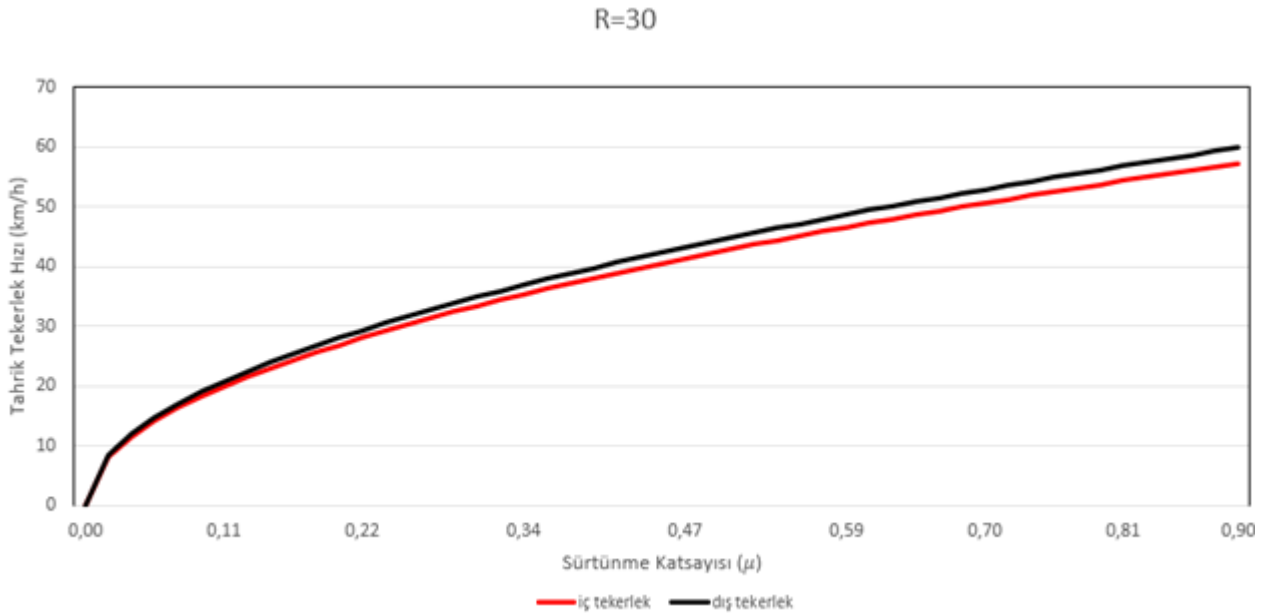
Ayrıca yine dönel kavşak çıkışlarında genellikle 100m ve 200m çapında viraj çapı olduğu kabul edilerek alınmıştır.

sürtünme katsayıları olan, $\mu= 0,1-0,9$ arasındaki değerler kullanılarak simülasyon yapılmıştır (Kumaş 2011).

Belirlenen tüm viraj çaplarında Çizelge 2’de belirlenen taşıtın tüm yol şartlarında karşılaştığı



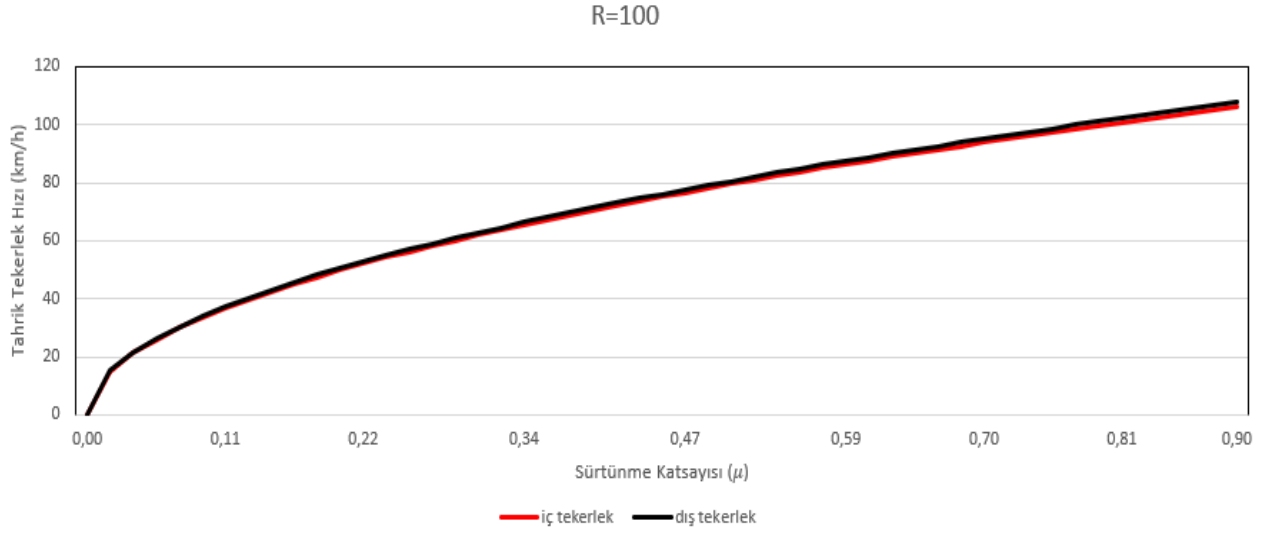
Şekil 6. Elektronik diferansiyel SIMULINK bloğu



Şekil 7. R=30 m çapındaki bir virajda tahrik tekerleklerinin maksimum hızları

Şekil 7’de 30 m çapındaki bir virajda farklı sürtünme katsayılarındaki tahrik tekerleklerinin hızları görülmektedir. Sürtünme katsayısı arttıkça, taşıt tekerlekleri arasındaki hız farkı artmaktadır. Bunun

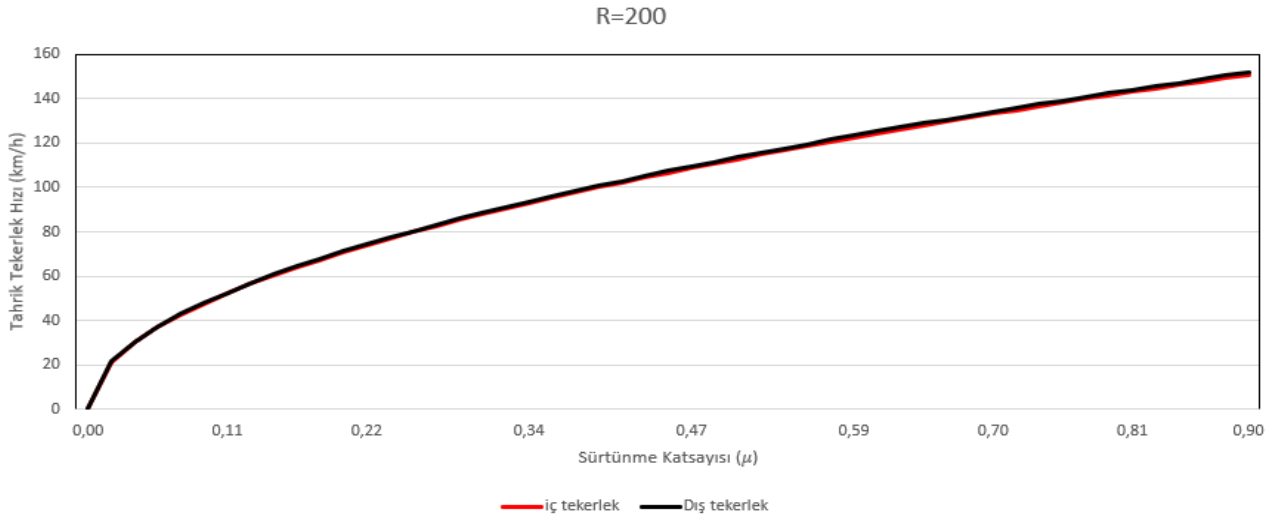
sebebi tekerlek ile yol arasındaki sürtünme katsayısına bağlı olarak taşıt viraja kayma yapmadan daha hızlı bir şekilde girebilmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 8. R=100m çapındaki bir virajda tahrik tekerleklerinin maksimum hızları

Viraj çapı arttırıldığında ise taşıt hızı artmakta ve sürtünme kuvvetinin etkisi daha iyi anlaşılmaktadır. Örneğin Şekil 8’de viraj çapı 100m olarak belirlenmiş ve sürtünme katsayısı 0,1 iken taşıt hızı 30 km/h civarında iken, sürtünme kuvveti 0,9 olduğunda 100

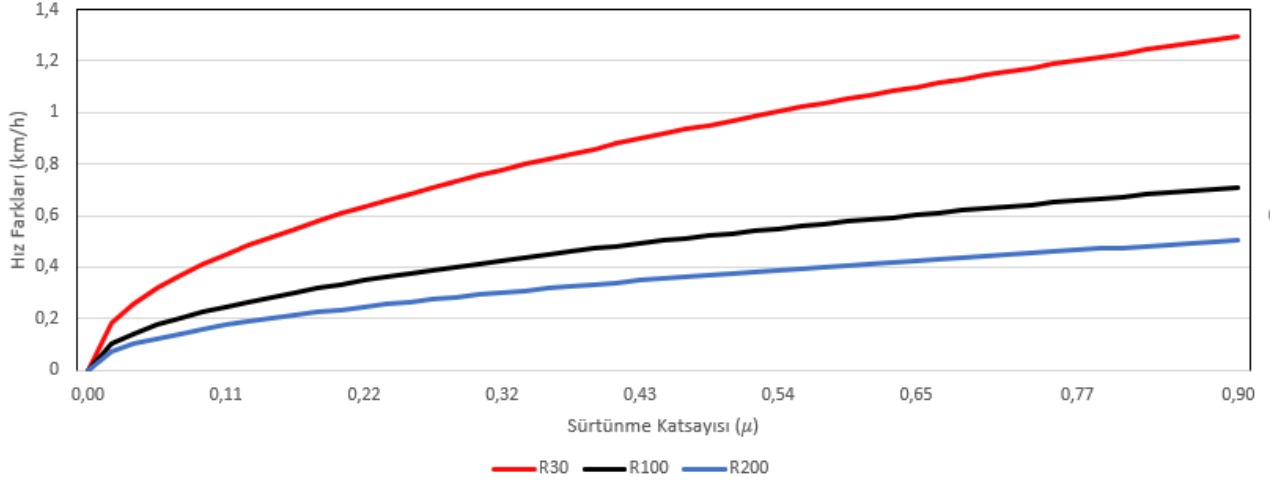
km/h’ civarında olduğu analizler sonunda tespit edilmiştir. Sürtünme kuvvetinin etkisi ile yaklaşık olarak bir taşıt viraja üç kat daha fazla hızla girebilmektedir.



Şekil 9. R=200m çapındaki bir virajda tahrik tekerleklerinin maksimum hızlar

Viraj esnasında iç ve dış tekerlekler arasındaki hız farkının belirlenmesi gerekmektedir. Şekil 9’da ise viraj çapı 200m olarak belirlenmiştir. Viraj çapı arttığı için tekerlekler arasındaki hız farkı azalmıştır.

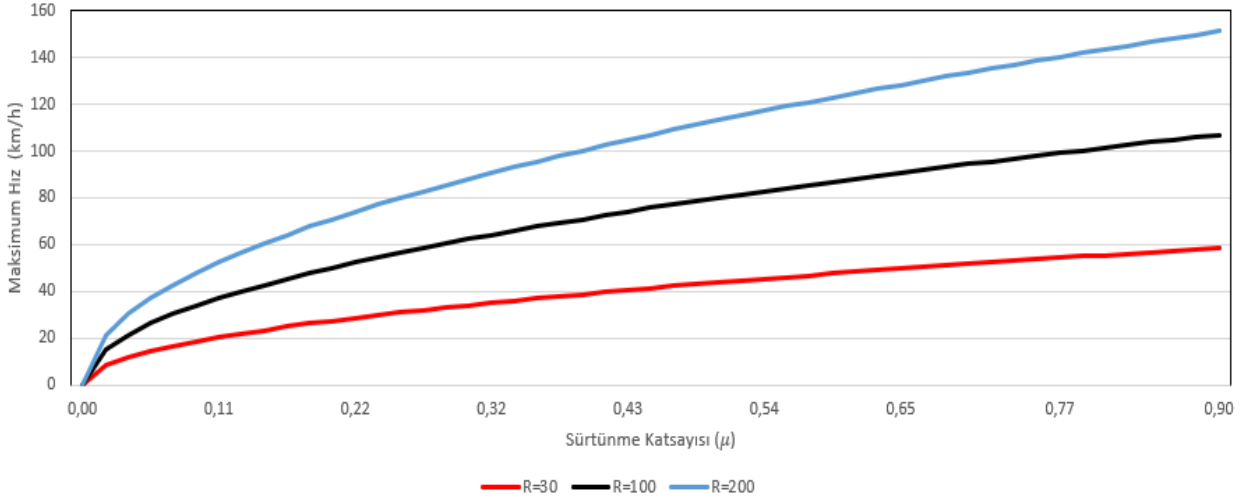
Tahrik tekerleklerindeki hız farkı, sürtünme katsayısı ve viraj çapı gibi parametrelere bağlı olarak değişmektedir. Şekil 10’da ise bu iki parametrelerin tahrik tekerleklerine olan etkisi görülmektedir.



Şekil 10. Sürtünme katsayısının değişimine göre farklı viraj çapında tahrik tekerleklerin hız farkı

Bir taşıtın virajı emniyetli bir şekilde alabilmesi için maksimum hızın belirlenmesi gerekmektedir. Sürtünme kuvvetinin artmasına bağlı olarak farklı viraj çaplarındaki taşıtın maksimum hızları Şekil 11'de

görülmektedir. Yapılan analiz grafiğinden de anlaşılacağı gibi viraj çapı ve sürtünme katsayısı arttıkça araç viraja daha hızlı girebilmektedir.



Şekil 11. Sürtünme katsayısının değişimine göre farklı viraj çapındaki taşıtın maksimum hızı

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada iki adet tekerlek içi elektrik motoru kullanılarak iki tekerlek den tahrik edilen bir taşıt mimarisi tasarlanmıştır. Belirlenen taşıt ve Ackerman geometrisi formülasyonu kullanılarak farklı viraj çaplarında sürtünme katsayısının, taşıtın virajı güvenli bir şekilde alabilmesi için maksimum hızı incelenmiştir. Analizler sonucunda;

- Taşıta viraj esnasına birçok kuvvet etki etmektedir. Bu çalışmada sürtünme kuvveti ve

viraj çapındaki değişimin taşıtın hızına olan etkisi incelenmiştir.

- Viraj çapı küçüldükçe taşıtın maksimum hız azalmakta ve tahrik tekerleklerindeki hız farkı artmaktadır.
- Maksimum taşıt hızı 200 m çapındaki ve 0,9 sürtünme katsayısındaki yolda tespit edilmiş olup yaklaşık 150 km/h olarak bulunmuştur.
- Sürtünme katsayısının artmasına paralel olarak taşıt hızı artmakta ve dolayısıyla aynı viraj çapındaki tahrik tekerleklerinin hız farkı da artmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışmada 19.Fen.Bil.026 nolu proje ile desteklerinden dolayı Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine teşekkür ederiz.

5. Kaynaklar

Akbıyık E., 2018. Şehir içi günlük kullanım için bir taşıtın enerji ihtiyacının tespiti ve elektrik motorlu tahrikli haline dönüştürülmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 161.

Arslan M., 2011, Bilgisayar destekli diferansiyel dişli kutusu tasarımı, modelleme ve animasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 112.

Ayçiçek M., 2008. İki Kademeli düz dişli hız kutusu tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 91.

Bayrakçeken H., Düzgün M., 2005, Taşıtlarda fren verimi ve frenleme mesafesi analizi, *Politeknik Dergisi*, **8**, 2, 153-160.

Bosch R., 1999, Driving – Safety Systems, 2'nd updated and Expanded Edition, Warrendale, PA SAE International, Germany.

Boyalı A., 2008. Hibrit elektirikli yol taşıtlarının modellenmesi ve kontrolü. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul , 174.

Çetinkaya S., 2004, Taşıt Mekaniği 3. Baskı., Nobel Yayıncılık, 83-138.

Gökçe C., 2015. Elektrikli yol taşıtlarında bulanık mantık tabanlı tam elektrikli frenlemenin geliştirilmesi ve uygulanması, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Tezi, İstanbul, 136.

Hartanı K., 2009. Electronic Differential With Direct Torque Fuzzy Control for Vehicle Propulsion System. *Turk J Elec &Comp Sci*, **17**, 21-38.

Kara yolları tasarım raporu, 2000. Modern dönel kavşaklar için önerilen tasarım esasları.

Kartal M. R., 2018. Elektrikli araçlarda kullanılan farklı batarya ve elektrik motorların sürüş çevrimlerine göre performans analizi. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 150.

Kumaş H., 2011. Ağır araçlar için yol eğimi ve viraj yarıçapı dikkate alınarak en hızlı güzergahın belirlenmesi. *Gazi Üniv. Müh. Min. Fak. Der.* **27**, 385-395.

Önder H., 2018. Elektrikli araçların satışı üzerinde sosyo-ekonomik faktörlerin etkisi: bir panel veri analizi. *Anemon Muş Alparslan Üniversitesi Sosyal Bilgiler Dergisi*, **7**, 17-21.

Soydan Y., 2016. Elektrikli ve Konvansiyonel Otomobil Tibolojisi: *Yeni eğilimler ve uygulamaları*, **7**, 527-538.

Topaç M. M., 2010. Torsen diferansiyelin taşıt seyir dinamiğine etkisinin bir matematiksel taşıt modeli yardımıyla sayısal incelenmesi, Doktora Tezi Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 198.

İnternet kaynakları

1-https://challenge.tubitak.gov.tr/assets/efficiency-challenge_tr.pdf, (20.10.2019)

AKÜ FEMÜBİD 20 (2020) 067101 (1147-1155)

AKU J. Sci. Eng. 20 (2020) 067101 (1147-1155)

DOI: 10.35414/akufemubid.803547

Araştırma Makalesi / Research Article

Yalıtık Sözcüklü bir Türkçe Konuşma Tanıma Sisteminin Yapay Veri Artırımı ile Tasarımı ve Gerçekleştirimi

İbrahim Baran USLU^{1*}, Hakan TORA², Emre SÜMER³, Mustafa TÜRKER⁴¹ Atılım Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara.² Atılım Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu, Uçak Elektrik-Elektronik Bölümü, Ankara.³ Başkent Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Ankara.⁴ Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, Ankara.*Sorumlu yazar e-posta: baran.uslu@atilim.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-5116-779X>hakan.tora@atilim.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-0427-483X>esumer@baskent.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-8502-9184>mturker@hacettepe.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-5604-0472>

Geliş Tarihi: 01.10.2020

Kabul Tarihi: 14.12.2020

Öz

Anahtar kelimeler
Konuşma tanıma; Veri artırımı; Ses aktivitesi tespiti; MFCC katsayıları; Destek vektör makinesi

Bu çalışmada toplamda doksan iki adet sesli komuttan oluşan bir yalıtık sözcüklü Türkçe konuşma tanıma sistemi tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Sistem, destek vektör makinesi (SVM) tabanlı olup, eğitimde kullanılan veri kümesi kaydedilen konuşmaların yapay olarak çeşitlendirilip artırılmasıyla elde edilmiştir. Farklı yapay veri oranlarının tanıma başarımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Akustik öznelik olarak, mel frekansı kepsral katsayıları (MFCC) kullanılmıştır. Ayrıca, ses aktivitesi tespitinin ve MFCC katsayılarının tanıma başarımına etkileri de irdelenmiştir. Sonuçta doksan iki yalıtık komut için ortalama %92.6'lık doğrulukla çalışan bir konuşma tanıma sistemi geliştirilmiştir.

Design and Implementation of an Isolated-word Turkish Speech Recognition System with Data Augmentation

Keywords

Speech recognition;
Data augmentation;
Voice activity
detection; MFCC;
Support vector
machine

Abstract

In this study, an isolated-word Turkish speech recognition system comprising of ninety-two voiced commands has been designed and implemented. The system is support vector machine (SVM) based and the data set used in training has been obtained by augmenting the original recordings artificially. The effect of different augmented data amounts on recognition performance has been examined. As acoustic features, mel frequency cepstral coefficients (MFCC) were used. Moreover, the effects of voice activity detection and MFCCs on recognition performance have also been investigated. In the end, 92.6% recognition accuracy on average has been obtained for ninety-two isolated commands.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Konuşma tanıma teknolojileri, sesli komutlarla iş yapmayı sağlamakta; bu da özellikle engelli kişilerin yaşamını kolaylaştırmaktadır. En doğal iletişim yöntemi olan konuşma ile bir sistemi kumanda etmenin; sürekli ve yalıtık konuşmayla olmak üzere iki türü bulunmaktadır. Sürekli konuşma tanıma sistemleri, kullanıcının normal konuşma ritminde söylediği komutları algılayıp tanıyabilen sistemlerdir.

Yalıtık sözcüklü konuşma tanıma sistemlerinde ise komutlar tek tek ve tane tane söylenir. Her iki konuşma tanıma sisteminde de komutların doğru şekilde tanınması için kullanılacak sınıflandırıcıların yeterli miktarda veri ile eğitilmesi zorunluluğu bulunmaktadır.

Konuşma tanıma sistemleri, konuşmacıdan bağımsız ve konuşmacı bağımlı olarak da ikiye ayrılır. Herkesin söylediği komutu doğru şekilde tanıyan bir sistem, konuşmacıdan bağımsız iken; belirli bir kişinin söylediği komutu tanıyan ve diğer kullanıcıların verdiği komutları tanımayan sistemler, konuşmacı bağımlı olarak adlandırılır.

Literatürde Türkçe konuşma tanıma ile ilgili son dönem yapılan bazı çalışmalar incelendiğinde; Coşkun ve Karadaş (2014), okul öncesi eğitime yönelik bir eğitici sistem geliştirmiştir. Ayrık sözcük tanıma tabanlı olan bu sistem; renkler, sayılar, şekiller, hayvanlar ve bazı kavramların sesli olarak tanınması ve kumanda edilmesi için tasarlanmıştır. Büyük (2018), yaptığı çalışmada mobil platformlar (cep telefonu ve tablet) için bir Türkçe konuşma tanıma sistemi geliştirmiştir. Hem sınırlı sayıda komut, hem de geniş dağarcıklı sürekli konuşma tanıma (LVCSR: Large Vocabulary Continuous Speech Recognition) amaçlı bu sistem, televizyonu sesle kumanda etmede (50 komut için) %98'lik bir sözcük tanıma başarımı göstermiştir. Diğer yandan genel metin yazdırma uygulamasında %61'lik bir sözcük tanıma oranı elde edilmiştir. Bu çalışmanın önemli bir özelliği Türkçe için mobil araçlarla bir konuşma veri tabanının (600 cümlelik) hazırlanmış olmasıdır. Gelegin ve Bolat (2011), yaptıkları çalışmada 20 adet sesli komut ile bilgisayarı kumanda etmeyi amaçlamışlardır. MFCC katsayılarını HMM (Hidden Markov Model) yapısı ile sınıflandırmışlardır. Sistem ortalama %98.2 doğruluk ile çalışmıştır.

Konuşma tanıma sistemlerinin yüksek başarımla çalışması için, mümkün olduğunca fazla veriyle

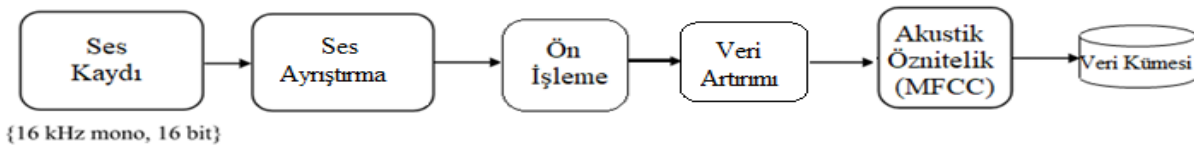
eğitilmesi gerekmektedir. Veri sayısının artması ile makine öğrenme yöntemleri daha başarılı şekilde genelleme ve ayımsama yapabilmektedir. Konuşma tanıma sistemlerinde veri artırımı için, ilgili kullanıcılardan, farklı zamanlarda ve koşullarda, mümkün olduğunca fazla sayıda ses kaydı almak gerekmektedir. Fakat bu zahmetli bir yöntemdir. Onun yerine, alınan doğal ses kayıtlarını kullanarak veri artırımı yapmak mümkündür.

Bu çalışma, doğal ses kayıtlarını veri artırma yöntemleri ile çoğaltarak 92 adet yalıtık (ayrık) komutu tanıyan bir sistemin gerçekleştirilmesini ele almaktadır. Doğal seslerden yapay yöntemlerle elde edilen ses kayıtları (veri artırma) ve gerçek doğal seslerden oluşan eğitim kümesi bir SVM sınıflandırıcısını eğitmek için kullanılmıştır. Yoğun şekilde yapılan denemeler sonucunda 92 komutun kabul edilebilir bir oranda başarıyla tanındığı görülmüştür.

Çalışmanın ikinci bölümünde Konuşma Tanıma Sistemi Tasarımı, üçüncü bölümünde Deneysel Bulgular, dördüncü ve son bölümünde de Sonuçlar verilmektedir.

2. Konuşma Tanıma Sistemi Tasarımı

Bu bölümde tasarlanan konuşma tanıma sisteminin özellikleri anlatılacaktır. Yalıtık sözcüklü Türkçe konuşma tanıma sistemimizin konuşmacı-bağımlı olmasına karar verilmiştir. Çünkü tasarlanan bu sistem ileride kullanıcıya özel bazı işlevleri sesli komutlarla yerine getirecek daha büyük bir sistemin parçası olacaktır. Şekil 1'de tasarlanan sistemin eğitim bölümünün blok şeması görülmektedir.



Şekil 1. Tasarlanan sistemin eğitim bölümünün blok şeması

Aşağıdaki alt bölümlerde yapılan çalışmaların detayları anlatılmaktadır.

2.1 Ses kayıtlarının alınması

Konuşma tanıma sisteminin eğitim ve test aşamalarında kullanılacak ses kayıtları; her bir konuşmacıdan kapalı ve ortam gürültüsü düşük bir mekânda, bir dizüstü bilgisayar mikrofonu aracılığıyla ve tüm komutların yer aldığı tek bir oturumda kaydedilmiştir. Kayıtlar WavePad ses editörü ve Praat programı yardımıyla toplanmıştır.

Örnekleme frekansı 16 kHz seçilmiştir. 5 konuşmacıdan 92 komutun her birini ikişer kez seslendirmeleri istenmiştir. Böylelikle toplam 920 ses kaydı elde edilmiştir.

2.2 Ses ayrıştırma

Her bir kullanıcıdan tek bir oturumda kaydedilen ses kayıtları operatörler tarafından manuel olarak WavePad ses editörü ile komutlarına ayrılarak “wav” uzantılı dosyalar şeklinde saklanmıştır. Bu çalışma kapsamında Ek-A’da verilen doksan iki adet komut incelenmektedir.

2.3 Ön işleme

Ön-işlemede konuşma kayıtları bir ön-vurgu (yüksek geçiren) süzgecinden geçirilmektedir. Bu süzgeç, konuşmanın yüksek frekanslı bileşenlerini de dikkate almayı amaçlar. Çerçevesi 30 ms uzunluğunda ve %75 örtüşmeli olarak alınmıştır. Pencere fonksiyonu olarak dikdörtgen pencere kullanılmıştır.

2.4 Veri artırımı

Bu bölümde, doğal ses kayıtlarından veri artırma yöntemleri (data augmentation) irdelenmektedir. Sırasıyla, konuşma oranı (speech rate), hız (speed), VTLP (Vocal Tract Length Perturbation), perde frekansı ve ses şiddeti değiştirme yöntemleri incelenecektir. Güneş ve Bıçakçı (2018)’de belirtildiği gibi, Türkçe için genel kullanıma açık bir veri seti bulunmamaktadır. Kanda vd. (2013)’e göre veri kümesi kaynakları az olan dillerde, var olan az sayıdaki verinin artırılması yoluna gidilmektedir. Ancak Ko vd. (2015)’te belirtildiğine göre veri artırımında kullanılan yöntemlerin doğal sesin frekans içeriğine yan etkileri söz konusudur. Dolayısıyla seçilecek yöntemin, konuşma tanıma başarımını eniyileyen yöntem olması hedeflenmektedir.

2.4.1 Tempo (konuşma oranı) ile veri artırımı

Konuşma oranı; tempo olarak da isimlendirilebilir. Burada WSOLA (Waveform Similarity Overlap Add) veya faz ses-kodlayıcı (phase vocoder) gibi yöntemlerle konuşmanın süresinin değiştirilmesinden bahsedilmektedir. Yani, sözlü komutun daha kısa veya daha uzun süreli türevleri üretilir. Konuşmacılar komutları o günkü ruhsal durumlarına göre daha önce kaydedilenden daha kısa veya daha uzun söyleyebilirler. Dolayısıyla tempo ile veri artırmak iyi bir seçenektir. Süresi değiştirilen ses kaydının frekans içeriği değişmez.

2.4.2 Hız değiştirme ile veri artırımı

Burada adı geçen hız parametresi, konuşmanın yeniden örneklenmesine karşılık gelmektedir. Yani, $x(t)$ sinyalden $x(kt)$ elde edilmekte; $k>1$ için komut sıkıştırılmakta, $k<1$ için ise komut uzatılmaktadır. Bu işlem, zaman ekseninin bükülmesine (time warping) karşılık gelmekte ve hem süreyi hem de frekans içeriğini değiştirmektedir. Bu yöntem, konuşmacının ses tonundaki ve söyleme hızındaki değişiklikleri bir arada ele almaya karşılık gelir.

2.4.3 VTLP ile veri artırımı

VTLP (Vocal Tract Length Perturbation) yöntemi, konuşmacılar arası değişimin sebebi olan ses yolu uzunluğu farkını kullanır. Konuşmacı normalizasyonu için kullanılan bu yöntem, mevcut çalışmamızda verilerin çeşitlendirilmesi amacıyla kullanılmıştır. Yöntem, frekans ekseninin bükülmesi (frequency warping) tabanlıdır. Jaitly ve Hinton (2013)’te, bu yöntemin konuşma tanıma sisteminin başarımını artırdığı belirtilmektedir.

2.4.4 Perde frekansı değiştirme ile veri artırımı

Bu yöntemde, konuşmanın ötümlü (voiced), yani periyodik özellik gösteren bölümlerinde perde frekansı olarak isimlendirilen temel frekans belirli oranlarda (\pm %10 gibi) artırılıp azaltılmaktadır. Frekansın artırılması sesin incelmeye, azaltılması ise sesin kalınlaşmasına sebep olmaktadır.

2.4.5 Ses şiddeti değiştirme ile veri artırımı

Bu da sesin şiddetinin değiştirilmesiyle çeşitliliğin sağlanmasıdır.

Bu çalışmada, yukarıdaki yöntemlerden tempo ve perde frekansı değiştirmeyle veri artırımı yapılmıştır. Konuşma oranı \pm %20, perde frekansı ise

± %10 oranlarında ve rastgele şekilde değiştirilmiştir. Bu işlemlerin gerçekleştirimi, Matlab programlama ortamı üzerinde geliştirilen bir uygulama aracılığıyla otomatik olarak yapılmıştır.

2.5 MFCC katsayılarının hesaplanması

Akustik öznitelik olarak MFCC (Mel Frequency Cepstral Coefficients – Mel Frekanslı Kepstral Katsayıları) kullanılmıştır. Logaritmik enerji parametresi olan ilk katsayı alınmamış, geri kalan 13 katsayı irdelenmiştir.

Duyum özelliklerimize paralel olarak mel ölçeği:

$$M(f) = 1127 \ln(1 + f/700) \quad (1)$$

$S_i(k)$, $s_i(n)$ konuşma çerçevesinin hızlı Fourier dönüşümü (FFT) olmak üzere:

$$S_i(k) = \sum_{n=1}^N s_i(n)h(n)e^{-j2\pi kn/N}, 1 \leq k \leq K,$$

$$(K: \text{FFT uzunluğu}) \quad (2)$$

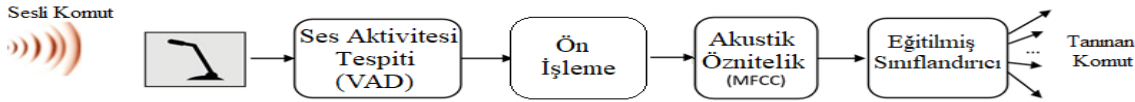
Burada $h(n)$ analiz penceresini (Hanning, Hamming gibi) temsil etmektedir. N ; pencere uzunluğudur.

$$P_i(k) = \frac{1}{N} |S_i(k)|^2 \quad (3)$$

$P_i(k)$; periodogram olarak adlandırılır ve güç spektral yoğunluğunu temsil eder.

Mel frekanslı filtre bankaları (%50 örtüşen üçgen filtreler) ile periodogram çarpılır ve filtre bankalarının altında kalan toplam enerji hesaplanır. Bu enerji değerlerinin logaritması alınır (insan kulağının duyumsal modeli gereği) ve DCT (Discrete Cosine Transform – Ayrık Kosinüs Dönüşümü) ile fazlalık bilgilerden kurtularak kepsral katsayılar elde edilir.

Tasarlanan sistemin test bölümünün blok şeması Şekil 2'dedir.



Şekil 2. Tasarlanan sistemin test bölümünün blok şeması

Eğitimde kullanılan kayıtların başı ve sonu elle kesilebilmektedir. Ancak gerçek zamanlı testlerde ses aktivitesi tespiti (SAT = VAD: Voice Activity Detection) önem kazanmaktadır. Eğer verilen sesli komutun başı ve sonu doğru tespit edilmezse tanıma başarımı düşmektedir. Ses aktivitesi tespitinin doğruluğunun konuşma tanıma başarımındaki önemi Oyucu vd. (2020)'lerinin çalışmasında da incelenmiştir.

3. Deneysel Bulgular

Bu bölümde, konuşma tanımada, doğal ve artırılmış verilerin akustik özelliklerinin sınıflandırılmasında kullanılan SVM (Support Vector Machine) yapısı anlatılacaktır. Sınıflandırmada ikinci dereceden (quadratic) SVM tercih edilmiştir.

Eğitim kümesinin doğal ve yapay ses oranları ve tanıma başarımları bu bölümde incelenmektedir. Yalnızca doğal seslerle eğitilen SVM yapay sesleri hiç tanımamıştır; yalnızca yapay seslerle eğitilen SVM de doğal sesleri hiç tanımamıştır. Çizelge 1.'de, her

bir konuşmacıdan alınan ikişer adet (92 komutluk – Komut listesi Ek-A'de verilmiştir) kayıttan, ilki eğitim kümesinde olduğu gibi 20'şer kez tekrarlanmıştır.

Bu kayıtlardan 20 adet perde frekansı ve 20 adet de tempo değiştirmeye yapay veri elde edilerek eğitim kümesinde kullanılmıştır. Eğitim kümesinde toplamda 40 adet yapay ve 20 adet doğal ses yer almaktadır. Testte ise eğitimde kullanılmayan diğer doğal kayıtlar kullanılmıştır. Bu şekilde 5 farklı konuşmacıyla yapılan testlerin sonucunda ortalama %92.6'lık tanıma oranı elde edilmiştir.

Aynı test bu defa yapay sesleri tanıma başarımını ölçmek için tekrarlanmıştır. Çizelge 2.'de elde edilen sonuçlar verilmiştir. Bu deneyde, eğitimde kullanılmayan 10 adet yapay veri testte kullanılmış ve tüm kullanıcılarda tam başarımla tanınmıştır. Çizelge 3.'te ise eğitim kümesinin ideal içeriğinin belirlenmesi için yapılan testlerin sonuçları

görülmemektedir. İki konuşmacı için yapay ve doğal verilerin farklı kombinasyonları için test başarımına bakılmıştır. En uygun eğitim kümesinin, hesaplama

karmaşıklığı ve başarımları sonucu dikkate alındığında, 5 adet yapay veriyle 20 kez tekrarlanan doğal verinin karışımından elde edildiği değerlendirilmektedir

Çizelge 1. Doğal seslerle yapılan test sonuçları (92 komut için).

Eğitim Kümesi	Test Kümesi	Kullanıcı	Eğitim Başarımı	Test Başarımı
40'ar adet Yapay + 20'şer adet (20 defa tekrarlanan) Doğal	1 adet Doğal (92 komut)	K1	%100	%100
		K2	%100	%92.4
		K3	%100	%100
		K4	%100	%88
		K5	%100	%82.6
		Ortalama:	%100	%92.6

Çizelge 2. Yapay seslerle yapılan test sonuçları (92 komut için).

Eğitim Kümesi	Test Kümesi	Kullanıcı	Eğitim Başarımı	Test Başarımı
40'ar adet Yapay + 20'şer adet (20 defa tekrarlanan) Doğal	10 adet Yapay	K1	%100	%100
		K2	%100	%100
		K3	%100	%100
		K4	%100	%100
		K5	%100	%100
		Ortalama:	%100	%100

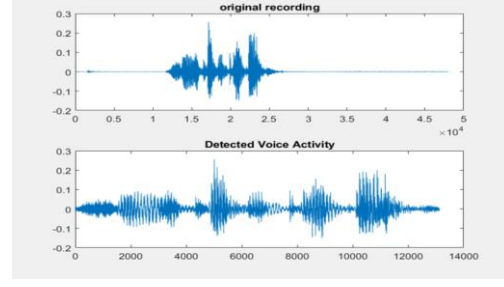
Çizelge 3. Yapay seslerin tanıma başarımına etkisi (92 komut için).

Eğitim Kümesi	Test Kümesi	Kullanıcı	Eğitim Başarımı	Test Başarımı
40'ar adet Yapay + 20'şer adet (20 defa tekrarlanan) Doğal	1 adet Doğal (92 komut)	K4	%100	%88
		K5	%100	%82.6
30'ar adet Yapay + 20'şer adet (20 defa tekrarlanan) Doğal	1 adet Doğal (92 komut)	K4	%100	%82.6
		K5	%100	%82.6
20'şer adet Yapay + 20'şer adet (20 defa tekrarlanan) Doğal	1 adet Doğal (92 komut)	K4	%100	%88
		K5	%100	%83.7
10'ar adet Yapay + 20'şer adet (20 defa tekrarlanan) Doğal	1 adet Doğal (92 komut)	K4	%100	%88
		K5	%100	%83.7
5'er adet Yapay + 20'şer adet (20 defa tekrarlanan) Doğal	1 adet Doğal (92 komut)	K4	%100	%88
		K5	%100	%83.7
1 adet Yapay + 20'şer adet (20 defa tekrarlanan) Doğal	1 adet Doğal (92 komut)	K4	%100	%85.9
		K5	%100	%80.4
20'şer adet Yapay + 10'ar adet (10 defa tekrarlanan) Doğal	1 adet Doğal (92 komut)	K4	%100	%88
		K5	%100	%82.6

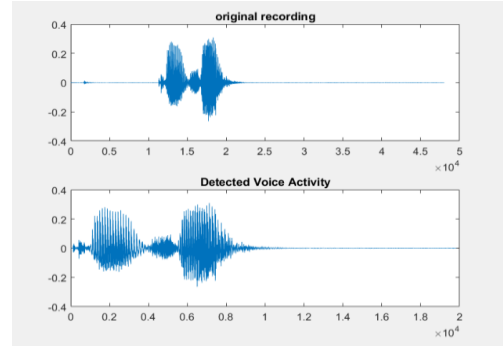
Şekil 3. ve Şekil 4.'te SAT (Ses Aktivitesi Tespiti) ile elde edilen başarılı ve hatalı tespitler gösterilmiştir.

Pratikte, filtre bankalarından sıfır çıkan MFCC katsayıları logaritma işleminde hata vermektedir. Bu da tanıma başarımını düşüren bir diğer faktördür. Bunun önlenmesi için konuşma kayıtlarına SNR = 50 dB olacak şekilde beyaz gürültü eklenmiştir. Böylece katsayıların sıfır olması önlenmekte ve bu da tanıma başarımındaki olumsuz etkiyi ortadan kaldırmaktadır (Tüfekci and Disken, 2019).

Hem SAT'ın (Ses Aktivitesi Tespiti), hem de MFCC katsayılarına beyaz gürültü eklemenin tanıma başarımına olan etkilerini incelemek için, sıfır-on bir arası rakamlarla (toplam 12 komut) yapılan testlerin sonucunda Çizelge 4.'teki sonuçlar elde edilmiştir. Burada komutların başına elle yapay boşluklar eklenmiştir ve tanıma başarımına bakılmıştır. Boşluk miktarı arttıkça, yani SAT hatası büyüdükçe tanıma başarımı düşmektedir. MFCC katsayılarına beyaz gürültü eklemek ise başarımı artırmaktadır.



Şekil 3. Başarılı SAT (Ses Aktivitesi Tespiti) sonucu.



Şekil 4. Hatalı SAT sonucu.

Çizelge 4. Doğru tanıma oranlarının SAT durumuna ve MFCC katsayılarına göre değişimi (12 adet rakam için).

Çok paylı SAT	Az paylı SAT	Paysız SAT	Özellik
3/12	5/12	7/12	MFCC katsayıları
6/12	7/12	11/12	MFCC + beyaz gürültü (SNR = 50 dB)

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada yalıtık sözcüklü bir Türkçe konuşma tanıma sistemi tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Sınıflandırıcı eğitiminde, konuşmacılardan toplanan sınırlı sayıdaki doğal kayıtların yapay yöntemlerle artırılması ile oluşturulan veri kümesi kullanılmıştır. Böylece zahmetli olan tekrar tekrar kayıt almak yerine kayıtlar üzerinde tempo ve perde frekansı değişiklikleri yapılarak veri artırımı gerçekleştirilmiştir. Yapay verilerin tanıma başarımı üzerindeki etkisinin incelenmesi bu çalışmanın özgün tarafıdır. Ayrıca MFCC katsayılarının hesaplanmasında sıfırın logaritmasından kaynaklı olumsuz durumun giderilmesi için SNR = 50 dB olacak şekilde komutlara beyaz gürültü ilave edilmiş, bu işlemin de tanıma başarımındaki etkisi

incelenmiştir. Sonuç olarak, 92 yalıtık komut için ortalama %92.6 doğrulukla çalışan bir Türkçe konuşma tanıma sistemi tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir.

5. Kaynaklar

- Boersma, P. "Praat, a system for doing phonetics by computer". *Glott International* **5:9/10** (2001): 341-345.
- Büyük, O., 2018. Mobil araçlarda Türkçe konuşma tanıma için yeni bir veri tabanı ve bu veri tabanı ile elde edilen ilk konuşma tanıma sonuçları, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **24(2)**, 180-184.

- Coşkun, A. ve Karadaş, İ., 2014. Okul öncesi eğitime yönelik ses kontrollü eğitim yazılımı, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **20 (2)**, 36-41.
- Gelegin, İ. ve Bolat, B., 2011. Ayrık kelime tabanlı bir konuşma tanıma sistemiyle bilgisayar kontrolü, *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu*, Elazığ: 5-7.
- Güneş, H. ve Bıcağcı, S., 2018. Akıllı evler için sesli komut algılama yöntemleri, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, **20(2)**, 561-568.
- Jaitly, N. and Hinton, G. E., 2013. Vocal tract length perturbation (VTLP) improves speech recognition, *In Proc. ICML Workshop on Deep Learning for Audio, Speech and Language*, **117**.
- Kanda, N., Takeda, R., and Obuchi, Y., 2013. Elastic spectral distortion for low resource speech recognition with deep neural networks, *In 2013 IEEE Workshop on Automatic Speech Recognition and Understanding*, IEEE, 309-314.
- Ko, T., Peddinti, V., Povey, D., and Khudanpur, S., 2015. Audio augmentation for speech recognition, *In Sixteenth Annual Conference of the International Speech Communication Association*.
- Oyucu, S., Polat, H. ve Sever, H., 2020. Sessizliğin kaldırılması ve konuşmanın parçalara ayrılması işleminin Türkçe otomatik konuşma tanıma üzerindeki etkisi, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, **8.1**, 334-346.
- Tüfekci Z. and Dişken, G., 2019. Scale-invariant MFCCs for speech/speaker recognition, *Turk J Elec Eng & Comp Sci*, **27**, 3758–3762.

İnternet kaynakları

- 1-<https://www.nch.com.au/wavepad/index.html>, (17.09.2020)

Ek-A

(Komut Listesi)

1.	Sistemi Kapat	42.	Beş	83.	ş (şe)
2.	Ana Menü	43.	Altı	84.	t (te)
3.	Bekleme	44.	Yedi	85.	u
4.	Gözlem	45.	Sekiz	86.	ü
5.	Önceki Menü	46.	Dokuz	87.	v (ve)
6.	Başlat	47.	On	88.	y (ye)
7.	Geri	48.	Onbir	89.	z (ze)
8.	Çıkış	49.	Tamam	90.	Engelsiz Yaşam
9.	Kontrol	50.	Önceki	91.	Hey Gözlem
10.	Telefon	51.	Sonraki	92.	Sil
11.	Eğlence	52.	Kanal Artı		
12.	Televizyon	53.	Kanal Eksi		
13.	Müzik	54.	Ses Artı		
14.	Kitap	55.	Ses Eksi		
15.	İnternet	56.	Sessiz		
16.	Radyo	57.	Sayfa Aşağı		
17.	Haber	58.	Sayfa Yukarı		
18.	Youtube (yuutup)	59.	Dur		
19.	Işık	60.	Boşluk		
20.	Perde	61.	a		
21.	Klima	62.	b (be)		
22.	Yatak	63.	c (ce)		
23.	Aç	64.	ç (çe)		
24.	Kapat	65.	d (de)		
25.	Arttır	66.	e		
26.	Azalt	67.	f (fe)		
27.	İndir	68.	g (ge)		

28.	Kaldır	69.	ğ (yumuşak ge)
29.	Baş Yükselt	70.	h (he)
30.	Baş Alçalt	71.	ı
31.	Kabul Et	72.	i
32.	Reddet	73.	j (je)
33.	Mesaj	74.	k (ka)
34.	Ara	75.	l (le)
35.	Gönder	76.	m (me)
36.	Oku	77.	n (ne)
37.	Sıfır	78.	o
38.	Bir	79.	ö
39.	İki	80.	p (pe)
40.	Üç	81.	r (re)
41.	Dört	82.	s (se)

Perikardial Sıvıdan İzole Edilen Hücrelere Fibroblast Büyüme Faktörü (FGF-2) Etkisinin Analizi**Dilek SÖNMEZER¹, Güler TOPRAK², Ayhan DÜZLER², Fatma LATİFOĞLU^{2*}**¹ Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Adana² Erciyes Üniversitesi, Genom ve Kök Hücre Merkezi, Kayseri² Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Kayseri² Erciyes Üniversitesi, Veterinerlik Fakültesi, Anatomi Bölümü, KayseriSorumlu yazar e-posta: flatifoglu@erciyes.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2018-9616>dsonmezer@cu.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-9017-2943>glrtoprak@gmail.com ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-7679-4853>duzler@erciyes.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-9515574X>

Geliş Tarihi: 14.12.2019

Kabul Tarihi: 20.11.2020

Öz

Perikardiyal sıvı (PF) heterojen bir hücre topluluğuna sahiptir. Bu hücrelerden biri de mezenkimal kök hücre özelliği taşıyarak başka hücrelere farklılaşma potansiyeline sahip olan mezotelyal hücrelerdir. Bu hücrelerin sayısı doku hasarıyla birlikte artarak büyüme faktörleri (VEGF, FGF-2, PDGF, TGF- β) ve ekstrasellüler matriks (ECM) moleküllerini sentezleyerek doku/organda meydana gelen hasarın onarımında önemli bir yer tutmaktadır. Bu çalışmada mezotelyal hücrelerin hücre kültür ortamına FGF-2 (basic fibroblast growth factor)' nin eklenmesiyle mezotelyal hücrelerin vasküler doku oluşumuna etkisi incelenmiştir. Bu amaçla büyüme faktörü eklenmiş ve büyüme faktörü eklenmemiş olan kontrol grubu hücrelerinin birinci ve beşinci günlerdeki ışık mikroskobu görüntüleri kullanılarak analiz edilmiştir. Bu görüntüler ve görüntü histogramları kullanılarak Hjorth parametreleri olan mobilite, aktivite ve komplekslik özellikleri, çarpıklık, basıklık ve entropi değerleri kullanılarak istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Birinci ve beşinci günlerde FGF-2 eklenen ve eklenmeyen kültürdeki hücrelerin görüntülerinden hesaplanan özneliklerin gruplar arasındaki farklılığı değerlendirmek için istatistiksel analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre birinci günde iki grup arasında ve beşinci günde iki grup arasında bağımsız örneklem t testi ve Mann-Whitney U testi neticesinde anlamlı farklılıklar olduğu ($p < 0.05$) görülmüştür. Doku hasarının giderilmesi için gerekli olan ECM bileşenleri ve büyüme faktörlerini sentezleyebilen mezotelyal hücrelerin literatürde yaygın olarak kullanılan mezenkimal kök hücreye alternatif olarak kullanılabileceği bu ön çalışma ile ortaya konulmuştur.

Anahtar kelimeler

Perikardiyal Sıvı;
Mezotelyal Hücre;
bGFG (FGF2); Hjorth
Parametreleri; Doku
Mühendisliği

Analysis of Fibroblast Growth Factor (FGF-2) Effect on Cells Isolated from Pericardial Fluid**Abstract**

Pericardial fluid (PF) has a heterogeneous cell population. One of these cells is mesothelial cells that have the potential to differentiate into other cells, such as mesenchymal stem cells. The number of these cells increases with tissue damage and plays an important role in the repair of tissue/organ damage by synthesizing growth factors (VEGF, FGF-2, PDGF, TGF- β) and extracellular matrix (ECM) molecules. In this study, the effect of mesothelial cells on vascular tissue formation was investigated by adding FGF-2 (basic fibroblast growth factor) to cell culture medium. For this purpose, control group cells and groups of added growth factor were analyzed using light microscopy images at the first and fifth days. Using these images and image histograms, Hjorth parameters which are mobility, activity, complexity and, kurtosis, skewness and entropy values were analyzed statistically. On the first and fifth days, statistical analysis was performed to evaluate the differences between the groups calculated from the images of cells in culture with FGF-2 and without FGF-2 addition. According to the results of independent samples t test and Mann-Whitney U test showed significant differences between the two

Keywords

Pericardial Fluid;
Mesothelial Cell; Basic
Fibroblast Growth
Factor (bGFG /FGF2);
Hjorth Parameter;
Tissue Engineering

groups on the first day and between the two groups on the fifth day ($p < 0.05$).

It was demonstrated with this preliminary study that mesothelial cells, which can synthesize ECM components and growth factors required for tissue damage, can be used as an alternative to mesenchymal stem cells the commonly used in tissue engineering applications.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Doku mühendisliği fonksiyonunu kaybetmiş doku/organın tedavisinde birçok bilim dalının birlikte çalıştığı disiplinler arası bir çalışmanın ürünüdür. Vücudumuzun her bölgesinde hasarın kısa sürede onarımını sağlayıcı ve dokunun eski halini almasını sağlayan kök hücreler bulunmaktadır. Mesotelial hücreler perikard, periton ve pleural bölgelerin iç kısmını kaplayan tek tabakalı mezoteliumu oluşturan kök hücreler gibi farklılaşma potansiyeline sahip, yassımsı/poligonal bir şekle sahiptir.

Kalp rahatsızlığı geçiren hastalarda PF içindeki FGF-2 miktarının artması bilgisinden yola çıkılarak angiogenik özellik taşıyan FGF-2, yeni damar oluşumunu uyarması ve hasarın onarımı için perikardiyal boşluğa enjeksiyonu ile olumlu sonuçlar elde edilmiştir (Uchida et al. 1995, Fujita et al. 1996, Ornitz et al. 2015, Fujita et al. 1998). FGF-2 nin tavşan ve köpek intraperikardiyaline enjeksiyonu sonucu yeni epikardiyal damarların oluştuğu ve kollateral gelişimin olduğu gözlenmiştir (Landau et al. 1995, Laham et al. 1998, Esch et al. 1985, Dauleh et al. 2016, Schelch et al. 2018).

FGF-2 fibroblast büyüme faktörü ailesinden olup, izoelektrik noktası (pI) 9.6-9.8 olan bir polipeptittir. Özellikle fibroblastik hücreler için mitojenik bir uyarıcı ve heparine yüksek bağlanma afinitesine sahiptir. Ayrıca, kültür ortamında hücre büyümesi, çoğalması ve farklılaşmasında etkili bir sinyal molekülüdür (Laham et al. 1998, Esch et al. 1985, Dauleh et al. 2016, Schelch et al. 2018, Yu et al. 2007).

Mevcut literatür bulguları incelendiğinde dental pulp kök hücresi ile yapılan bir çalışmada FGF-2 konsantrasyonu 2,5 ng/mL'nin hücreyi etkileyen konsantrasyon olduğu ifade edilmiştir (Gorin et al. 2016). Mesotelial hücrelerin vücut içinde kendileri FGF-2 sentezleyebildiğinden ve düşük konsantrasyon FGF-2 miktarının mezotelial

hücrelere etkisinin tespiti için bu çalışmada 1ng/mL FGF-2 besiyeri içeriğine eklenerek 1. ve 5. günlerde hücrelere olan etkisi ışık mikroskobu görüntüleri ile incelenmiştir. Bu görüntülerden sayısal olarak bilgi elde edebilmek ortaya konulan özneliklere göre analiz edilmiştir. Bu öznelikler görüntülerin histogramı ve görüntüsünün kendisinden hesaplanan Hjorth parametreleri, çarpıklık, basıklık ve entropi değerleri kullanılarak elde edilmiştir. Gruplar arası farklılığın ortaya konması için istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Bu çalışma, perikardiyal sıvıdan izole edilen mezotelial hücrelere FGF-2 nin etkisinin incelendiği bir ilk çalışma olma özelliği taşımaktadır. Bu açıdan literatüre önemli katkı sağlayacağı öngörülmektedir.

2. Materyal ve Metot

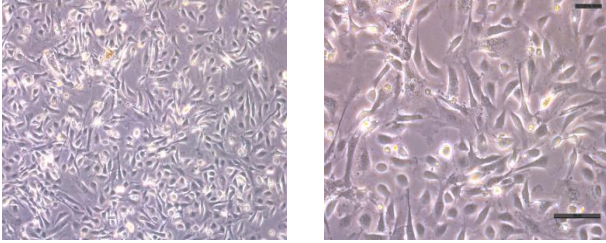
2.1 Sığır kalbinden perikardiyal sıvının alımı

Perikardiyal sıvı kesimhaneye getirilen sağlıklı, 2-3 yaşlarında ve 350-450 kg ağırlığındaki sığırlardan kesiminden hemen sonra alınmıştır. Sığır göğüs kafesi açılarak ve perikardiyumda hasar oluşturmadan perikardiyal boşluğa steril enjektör (50mL) ile girilerek perikardiyal sıvı aspire edilmiştir.

2.2 Perikardiyal sıvıdan hücrelerin izolasyonu

Perikardiyal sıvı örnekleri yaklaşık 30 dk. içinde oda sıcaklığı koşullarında laboratuvara getirilerek iki kez santrifüj edilmiştir. İlk santrifüj 400xg de 5 dk. yapılarak süpernatant kısmı steril yeni bir falkona aktarılarak daha sonra 3500xg de 5dk ikinci santrifüj yapılmıştır. İkinci santrifüj sonunda hücrelerden ayrılmış olan süpernatant (hücresiz perikardiyal sıvı) 0.22 µm lik filtrelerden geçirilerek daha sonra kullanılmak üzere -20°C ye muhafaza edilmek üzere kaldırılmıştır. Pelletdeki perikardiyal sıvı hücreleri (PRSc) 200 µL steril hücresiz

perikardiyal sıvı içinde süspansiyon edilmiştir. Çalışma grubumuzun ortaya koyduğu yöntemle PRSc hücreleri için en iyi besiyeri ortamı olarak belirlenmiş olan Alpha-Mem besiyeri, 10% sıgır serumu (FBS), 250 U/mL penisilin, 250 µg/mL streptomisin, 25 mM glutamin, 20 µg/mL sıgır insülinü olacak şekilde hazırlanmış olan besiyeri içinde, her bir oyukta yaklaşık 1×10^4 hücre olacak şekilde 6 oyuklu kültür kabına ekimi yapılarak 5% CO₂ 37°C olan inkübatöre büyütülmek üzere kaldırılmıştır (Sönmezer vd. 2016, Latifogly vd. 2018). Hücre tutunumu için beklenen 24 saat sonrasında kültür ortamına 1ng/mL FGF-2 eklenerek 1. ve 5.günlerde hücreler ışık mikroskobu ile görüntülenmiştir. Büyüme faktörünün hücelere olan etkisinin analizi, büyüme faktörü eklenmeyen kültürdeki hücrelerin görüntüleri ile karşılaştırılarak yapılmıştır. Büyüme faktörü eklenmiş ve eklenmemiş olan kültürlerin besiyeri değiştirilmeden sadece besiyeri ilavesi yapılarak kültürlerdeki hücrelerin görüntüleri Şekil 1' de görüldüğü gibi elde edilmiştir.



Şekil 1. FGF-2 büyüme faktörü eklenmeden önceki tutunmuş olan hücrelerin 10x ve 20x büyütmedeki ışık mikroskobu görüntüleri

Bu görüntülerin sayısal analizi için Hjorth parametreleri olan mobilite (hareketlilik), aktivite (etkinlik), komplekslik (karmaşıklık) ve buna ek olarak entropi, çarpıklık (skewness), basıklık (kurtosis) değerleri hesaplanarak 6 adet öznelik ortaya konmuştur.

2.3 Hjort parametreleri

Görüntülerden öz nitelik elde etmek için Hjorth parametrelerinden yararlanılmıştır. Hjorth parametreleri; mobilite, aktivite ve komplekslik olmak üzere üç tanedir. Mobilite (Eş. 1) bir dizinin birinci türevinin standart sapmasının dizinin

standart sapmasına oranıdır. Mobilite dizinin varyansdır ve enerjisi ile ilişkilidir (Eş. 2). Komplekslik ise dizinin band genişliği ile ilgili bir özellik olarak tanımlanmaktadır (Eş. 3) (Cano et al. 2009, Rozenkrants et al. 2008, Cecchin et al. 2010).

$$\text{Aktivite} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} [x(n) - \bar{x}]^2 \quad (1)$$

$$\text{Mobilite} = \sqrt{\frac{\text{Aktivite} \left(\frac{dx}{dt} \right)}{\text{Aktivite}}} \quad (2)$$

$$\text{Komplekslik} = \sqrt{\frac{\text{Mobilite} \left(\frac{dx}{dt} \right)}{\text{Mobilite}}} \quad (3)$$

Entropi; düzensizliğin bir ölçüsü olup dizi analizinde farklı entropi hesaplama teknikleri kullanılmakla birlikte bir dizinin entropisi Eş. 4'deki gibi hesaplanmaktadır (Sanei et al. 2011, Alim et al. 2012, Mahaphonchaikul et al. 2010).

$$H(X) = - \sum_{i=1}^M P(X = x_i) \cdot \log_2 P(X = x_i) \quad (4)$$

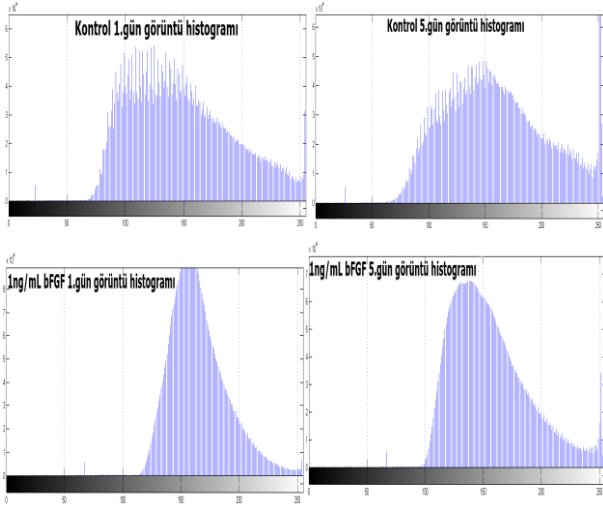
Çarpıklık; Rasgele bir sürecin olasılık dağılımının asimetrisinin bir ölçüsü olarak ifade edilir ve denklemde \bar{Y} ; ortalama, s ; standart sapma ve N dizi sayısını verir ve Eş. 5'deki gibi hesaplanır

$$\text{Çarpıklık} = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^3}{(N - 1)s^3} \quad (5)$$

Basıklık rasgele bir sürecin olasılık dağılımı basıklığının bir ölçüsü olarak ifade edilir. Rasgele sürecin, 4. momenti ile Eş. 6' daki gibi hesaplanır.

$$\text{Basıklık} = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^4}{(N - 1)s^4} \quad (6)$$

Şekil 1’de verilen görüntüler 1944x2592 piksel boyutunda olup bu görüntüler 256x256’lık piksel boyutlarındaki görüntülere parçalanmıştır. Yukarıda bahsedilen özellikler her bir görüntü çerçevesi için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bir görüntü için her bir parametreden 70 adet veri elde edilmiştir. Ayrıca, her bir 256x256’lık görüntünün histogramı elde edilerek, belirlenen öznitelikler bu histogramlar için de hesaplanmıştır. Aşağıdaki şekilde kontrol ve büyüme faktörü uygulanmış olan birinci güne ait görüntülerin histogramı görülmektedir (Şekil 2).



Şekil 2. Kontrol ve 1ng/mL FGF-2 eklenmiş olan hücrelerin 1. ve 5.gün görüntülerinin histogramları

Elde edilen parametrelerin gruplar arasındaki farklılığının değerlendirilmesi için istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Öncelikle her bir parametrenin dağılımı incelenerek, normal dağılım gösterenler bağımsız örneklem t testi ile normal dağılım göstermeyenler ise Mann-Whitney U testi ile analiz edilmiştir.

2.4 Bağımsız örneklem t testi

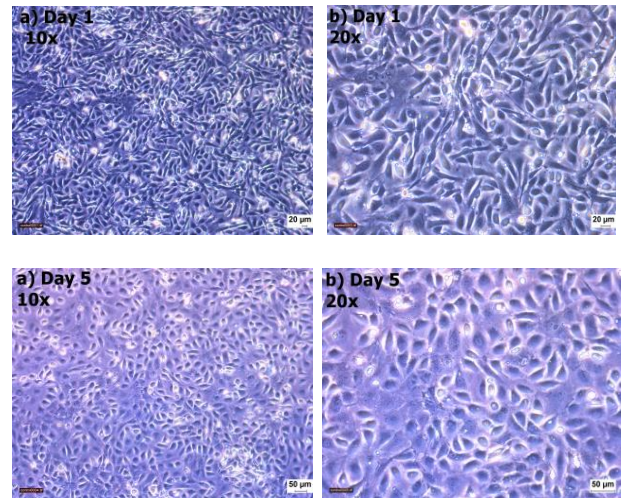
Perikardiyal sıvıdan izole edilen mezotelyal hücrelere 1ng/mL FGF-2 büyüme faktörü eklendiğinde hücre kültüründe meydana gelen değişimin ve FGF-2 eklenmeyen kültürdeki hücrelerdeki farklılığın analizi bağımsız örneklem t testi ile yapılmıştır. Bu test birbirinden bağımsız olan hücre kültür ortamına büyüme faktörü eklenen ve büyüme faktörü eklenmeyen iki grubun ortalamaları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık olup olmadığını belirlemek için yapılmıştır.

parametrik bir testtir. Tam olarak grup ortalamaları arasında gözlenen farkın tesadüfi mi yoksa bağımsız değişkenden mi kaynaklandığını anlamak için bu test yapılmıştır (Vasfi 2014).

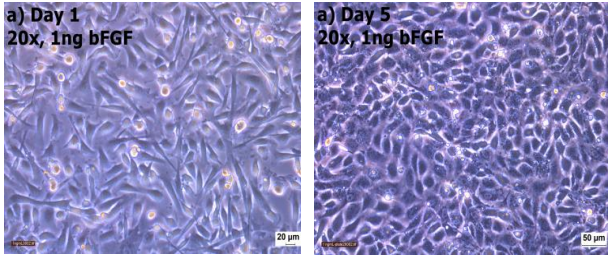
Hücre kültür ortamına büyüme faktörü uygulanan ve uygulanmayan ortamdaki hücrelerdeki farklılık için anlamlılık düzeyi $p < 0.05$ kullanılmıştır.

3. Bulgular

Bu çalışmada perikardiyal sıvıdan izole edilmiş olan mezotelyal hücrelere 1ng/ml FGF-2 büyüme faktörünün eklenmesiyle hücrelerde meydana gelen farklılaşmanın ve doku benzeri yapının oluşumuna etkisi incelenmiştir. Bu amaçla Şekil 3. ve 4’ te görüldüğü gibi 1ng/ml FGF-2 eklenen ve kontrol grubuna ait 1. ve 5. gün mikroskop görüntüleri elde edilmiştir. Bu görüntülerin 256x256 piksellik çerçevelerden ve histogramlarından hesaplanan özniteliklerin maksimum değerleri Çizelge 1’ de görülmektedir. Görüntü ve histogramlarından yukarıda verilen altı parametreye göre hesaplanan öznitelik değerleri SPSS programıyla istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Normal dağılım gösteren verilere bağımsız örneklem t testi uygulanırken normal dağılım göstermeyen parametrelerin karşılaştırılmasında Mann-Whitney U testi kullanılmıştır. İstatistiksel analizi neticesinde elde edilen anlamlılık ve F değerleri Çizelge 2-4’te görülmektedir.



Şekil 3. Kontrol olarak büyüme faktörü içermeyen 10x ve 20x büyütmedeki 1. ve 5. günlerdeki hücrelerinin ışık mikroskobu görüntüleri



Şekil 4. 1ng/mL FGF-2 büyüme faktörünün 1. ve 5. günlerdeki hücrelerinin 20x büyütmedeki ışık mikroskobu görüntüleri

Çizelge 1. Her bir uygulama için mikroskop **görüntüsü verilerinin** maksimum değerleri

Uygulamalar	Aktivite	Entropi	Mobilite	Komplekslik	Kurtosis	Skewness
1. gün Kontrol	2529.46	7.43	0.19	10.09	5.52	1.27
5. gün Kontrol	3184.54	7.41	0.22	10.43	3.41	0.72
1. gün FGF-2	1072.40	6.90	0.18	10.06	5.95	1.28
5. gün FGF-2	1558.90	7.07	0.23	7.95	5.39	1.32

Çizelge 1. 2. a. Kontrol 1. ve 5. gün ile **görüntü verilerinin** bağımsız örneklem t testi ve Mann-Whitney U testi analizi sonuçları

Uygulamalar	*Entropi Sig.(2 tailed)	*Aktivite Sig.(2 tailed)	Mobilite Sig.(2 tailed)	Komplekslik Sig.(2 tailed)	Kurtosis Sig.(2 tailed)	Skewness Sig.(2 tailed)
Kontrol 1. ve 5.gün	0.521	0.851	0.00 (F:6.513)	0.412 (F: 3.582)	0.037 (F:0.488)	0.028 5.367

*Mann-Whitney U testi sonuçları

Çizelge 1.2.b Kontrol 1. ve 5. gün **görüntü histogramı verilerinin** bağımsız örneklem t testi ve Mann-Whitney U testi analizi sonuçları

Uygulamalar	Entropi Sig.(2 tailed)	*Mobilite Sig.(2 tailed)	*Aktivite Sig.(2 tailed)	*Komplekslik Sig.(2 tailed)	*Kurtosis Sig.(2 tailed)
Kontrol 1. ve 5.gün	0.00 (F: 1.960)	0.828	0.994	0.531	0.00

*Mann-Whitney U testi sonuçları

Çizelge 2.a Kontrol 1. ve 5. gün ile **görüntü verilerinin** bağımsız örneklem t testi ve Mann-Whitney U testi analizi sonuçları

Uygulamalar	*Entropi Sig.(2 tailed)	*Aktivite Sig.(2 tailed)	Mobilite Sig.(2 tailed)	Komplekslik Sig.(2 tailed)	Kurtosis Sig.(2 tailed)	Skewness Sig.(2 tailed)
Kontrol 1. ve 5.gün	0.521	0.851	0.00 (F:6.513)	0.412 (F: 3.582)	0.037 (F:0.488)	0.028 5.367

*Mann-Whitney U testi sonuçları

Çizelge 2.b Kontrol 1. ve 5. gün **görüntü histogramı verilerinin** bağımsız örneklem t testi ve Mann-Whitney U testi analizi sonuçları

Uygulamalar	Entropi Sig.(2 tailed)	*Mobilite Sig.(2 tailed)	*Aktivite Sig.(2 tailed)	*Komplekslik Sig.(2 tailed)	*Kurtosis Sig.(2 tailed)
Kontrol 1. ve 5.gün	0.00 (F: 1.960)	0.828	0.994	0.531	0.00

*Mann-Whitney U testi sonuçları

Çizelge 3.a FGF-2 1. ve 5. gün görüntü verilerinin bağımsız örneklem t testi ve Mann-Whitney U testi analizi sonuçları

Uygulamalar	Entropi Sig.(2 tailed)	*Aktivite Sig.(2 tailed)	Mobilite Sig.(2 tailed)	Komplekslik Sig.(2 tailed)	Kurtosis Sig.(2 tailed)	*Skewness Sig.(2 tailed)
FGF-2 1.- 5.gün	0.00 (F:12.841)	0.00	0.00 (F:0.234)	0.00 (F: 11.767)	0.01 (F: 1.071)	0.225-

*Mann-Whitney U testi sonuçları

Çizelge 3.b FGF-2 1. ve 5. gün görüntü histogramı verilerinin bağımsız örneklem t testi ve Mann-Whitney U testi analizi sonuçları

Uygulamalar	*Entropi Sig.(2 tailed)	*Mobilite Sig.(2 tailed)	*Aktivite Sig.(2 tailed)	*Komplekslik Sig.(2 tailed)
FGF-2 1.- 5.gün	0.00	0.00	0.00	0.603

*Mann-Whitney U testi sonuçları

Çizelge 4.a 1.gün Kontrol ve FGF-2 görüntü verilerinin bağımsız örneklem t testi Mann-Whitney U testi analizi sonuçları

Uygulamalar	Entropi Sig.(2 tailed)	*Aktivite Sig.(2 tailed)	Mobilite Sig.(2 tailed)	Komplekslik Sig.(2 tailed)	*Kurtosis Sig.(2 tailed)	*Skewness Sig.(2 tailed)
1.gün Kontrol ve FGF-2	0.00 (F:16.180)	0.00	0.686 (F:0.099)	0.939 (F: 1.459)	0.00	0.00-

*Mann-Whitney U testi sonuçları

Çizelge 4.b 1.gün Kontrol ve FGF-2 görüntü histogramı verilerinin bağımsız örneklem t testi ve Mann-Whitney U testi analizi sonuçları

Uygulamalar	Entropi Sig.(2tailed)	*Aktivite Sig.(2 tailed)	*Mobilite Sig.(2 tailed)	*Komplekslik Sig.(2 tailed)
1.gün Kontrol ve FGF-2	0.00 (F:61.356)	0.00	0.00	0.00

*Mann-Whitney U testi sonuçları

Çizelge 5.a 5.gün Kontrol ve FGF-2 görüntü verilerinin bağımsız örneklem t testi ve Mann-Whitney U testi analizi sonuçları

Uygulamalar	*Entropi Sig.(2 tailed)	*Aktivite Sig.(2 tailed)	Mobilite Sig.(2 tailed)	Komplekslik Sig.(2 tailed)	Kurtosis Sig.(2 tailed)	Skewness Sig.(2 tailed)
5.gün Kontrol ve FGF-2	0.00	0.00	0.00 (F:3.012)	0.00 (F: 16.730)	0.00 (F:16.730)	0.00 (F: 50.965)

*Mann-Whitney U testi sonuçları

Çizelge 5.b 5.gün Kontrol ve FGF-2 görüntü histogramı verilerinin bağımsız örneklem t testi ve Mann-Whitney U testi analizi sonuçları

Uygulamalar	Entropi Sig.(2 tailed)	*Aktivite Sig.(2 tailed)	*Mobilite Sig.(2 tailed)	*Komplekslik Sig.(2 tailed)
5.gün Kontrol ve FGF-2	0.00 (F:46.089)	0.00	0.00	0.00

*Mann-Whitney U testi sonuçları

Çizelge 2a ve 2b' den de görüldüğü gibi kontrol görüntülerinden elde edilen özneliklerin 1. ve 5. güne ait değerleri analiz edildiğinde görüntü histogramının entropi değeri, görüntünün mobilite değeri, çarpıklık ve basıklık değerleri normal dağılım göstermiş olup bağımsız örneklem t testi sonucuna göre anlamlılık değeri $p < 0.05$ olduğu görülmektedir. Anlamlılık değerinin $p < 0.05$ olduğu bu özellikler için F değerleri sırasıyla 1.96, 6.513, 5.367 ve 0.488 olarak elde edilmiştir. Ancak, normal dağılım gösteren komplekslik değeri bağımsız örneklem t testi sonucuna göre, normal dağılım göstermeyen görüntü histogramının mobilite, aktivite ve komplekslik değerleri ile görüntünün aktivite ve entropi değerleri arasında

Mann Withney U testine göre anlamlılık değeri $p > 0.05$ olup bu özelliklerde anlamlı farklılık görülmemiştir.

Ayrıca, Çizelge 3a ve 3b den görüleceği üzere FGF-2 eklenen görüntülerden elde edilen özneliklerin 1. ve 5. güne ait değerleri analiz edildiğinde, görüntünün mobilite, entropi, komplekslik ve basıklık değerleri normal dağılım göstermiş olup bağımsız örneklem t testi sonucuna göre anlamlılık değeri $p < 0.05$ olduğu görülmektedir. Anlamlılık değerinin $p < 0.05$ olduğu bu özellikler için F değerleri sırasıyla 0.234, 12.841, 11.767 ve 1.071 olarak elde edilmiştir. FGF-2 eklenen görüntülerin histogramından hesaplanan mobilite, aktivite, entropi ve görüntüden hesaplanan aktivite

değerleri normal dağılım göstermediği için Mann Withney U testi ile analiz edilmiş olup bu teste göre anlamlılık değeri $p < 0.05$ olarak elde edilmiştir. Ancak görüntü histogramından hesaplanan komplekslik ve görüntüden hesaplanan çarpıklık değerlerinin Mann Withney U testine göre anlamlılık değerinin $p > 0.05$ olduğu görülmüştür. Bu sonuçlara göre büyüme faktörü eklenen 1. ve 5. gün görüntülerinden elde edilen özneliklerden histograma ait kompleksite ve görüntüye ait çarpıklık özellikleri dışında diğer tüm özelliklerde anlamlı farklılık olduğu görülmüştür. Ancak kontrol grubundan elde edilen özelliklerden sadece histograma ait entropi, görüntüye ait mobilite, çarpıklık ve basıklık değerleri dışında diğer özelliklerde farklılık olmadığı görülmüştür.

Çizelge 4a ve 4b analiz edildiğinde kontrol ve FGF-2 eklenen hücrelerin 1. günlerine ait mikroskop görüntülerinde histogramdan hesaplanan entropi, görüntüden hesaplanan entropi değerleri bağımsız örneklem t testi sonuçlarına göre aralarında anlamlı farklılık olduğu ($p < 0.05$) görülmüştür. Anlamlı farklılık ortaya çıkan bu özelliklere ait F değerleri sırasıyla 61,356 ve 16,180 olarak elde edilmiştir. Görüntü histogramı mobilite, aktivite ve kompleksliği ve görüntüden hesaplanan aktivite, basıklık ve çarpıklık değerlerinin Mann Withney U testine göre anlamlı farklılık gösterdiği ($p < 0.05$) görülmüştür. Bu sonuçlara göre iki grup arasındaki görüntüden hesaplanan mobilite ve kompleksite dışındaki tüm özellikler arasında anlamlı farklılık ortaya çıkmıştır. Ayrıca büyüme faktörünün etkisi ile 1. günde kontrol grubuna göre hücrelerde ortaya çıkan farklılaşma, mikroskop görüntülerinden elde edilen özneliklerin istatistiksel olarak anlamlı farklılık göstermesi ile ortaya konmuştur.

Kontrol ve FGF-2 eklenen hücrelerin 5. günlerine ait mikroskop görüntülerinde Çizelge 5a ve 5b den de görüldüğü gibi tüm özellikler için gruplar arasında önemli derecede anlamlı farklılık olduğu görülmektedir ($p < 0.000$). Bu sonuca göre, büyüme faktörü etkisi tüm özneliklerde önemli derecede anlamlı farklılık oluşturmuştur.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada perikardiyal sıvıdan izole edilmiş olan mezotelyal hücelere 1ng/ml FGF-2 büyüme faktörünün eklenmesiyle hücrelerde meydana gelen farklılaşmayla doku benzeri yapıların oluşumuna olan etkisi incelenmiştir. Doku/organ hasarının onarımında mezotelyal hücreler FGF-2 ve diğer büyüme faktörlerini sentezleyerek dokunun eski halini almasını sağlar. Hasarın olmadığı durumlarda mezotelyal hücrelerin FGF-2 sentezlemediği düşüncesinden yola çıkılarak in vitro hücre kültürü ortamına büyüme faktörü eklenmesiyle mezotelyal hücreler doku oluşumuna yönlendirilerek doku mühendisliği çalışmalarında yaygın olarak kullanılan mezenkimal kök hücelere alternatif olarak kullanılabilceği düşünülmektedir. Bu çalışmada FGF-2 büyüme faktörünün 1ng/mL miktarında kültür ortamına eklenerek hücelere olan etkisi mikroskop görüntüleri ile incelenmiştir. Hücrelerin mikroskopik incelemesinde belirgin bir farklılık görülmemesine rağmen, görüntülerden elde edilen özneliklerin analizinde önemli farklılıklar ortaya çıkmıştır.

Kalp ile ilgili rahatsızlıklarda büyüme faktörlerinin etkisinin araştırıldığı çalışmalarda kalp rahatsızlığı ile birlikte FGF-2 konsantrasyonunun 1.224-1.461 ng/ml iken kalp rahatsızlığı olmayan kişilerin perikardiyal sıvısında FGF-2 konsantrasyonunun 0.292-0.389 ng/ml olduğu belirlenmiştir (Fujita et al. 1998). Dental pulp kök hücresi ile yapılan bir diğer çalışmada FGF-2'nin hücre için etkili konsantrasyonu 2,5 ng/mL olduğu belirtilmiştir (Gorin et al. 2016).. Düşük konsantrasyon FGF-2 miktarının mezotelyal hücelere etkisinin araştırıldığı bu çalışmada 1ng/mL FGF-2 kültür ortamına eklenerek analiz edilmiştir. Yapılan çalışmalardan farklı olarak FGF-2'nin hücelere olan etkisi hjorth parametrelerine göre analiz edilmiştir. Hücre kültürüne FGF-2 eklendikten sonraki 1. ve 5.gün mikroskop görüntülerinde komplekslik ve çarpıklık özellikleri dışında diğer tüm özelliklerde anlamlı farklılık olduğunun görülmesi hücre farklılaşmasının olduğunu göstermektedir. Kontrol grubu ile FGF-2 eklenen hücrelerin 1. gün mikroskop görüntülerinde histogramdan hesaplanan entropi ve görüntüden hesaplanan

entropi değerleri bağımsız örneklem t testi sonuçlarına göre aralarında anlamlı farklılık ($p<0.05$) olması hücrelerde büyüme ve çoğalmanın etkisiyle entropide değişiklik olduğunu göstermektedir (Çizelge 4). Ayrıca, görüntü histogramından hesaplanan mobilite, aktivite ve kompleksliği ve görüntüden hesaplanan aktivite, basıklık ve çarpıklık değerlerinin Mann Withney U testine göre anlamlı farklılığın ($p<0.05$) ortaya çıkması hücrelerin farklılaşmaya başladığını göstermektedir.

Elde edilen sonuçlara göre vaskülarizasyonda da etkili olan FGF-2 büyüme faktörünün kalp rahatsızlığı geçiren hastaların tedavisinde kullanılabileceğine yönelik yapılan çalışmalara bu çalışmamızın katkı sağlayacağı düşünülmektedir (Laham et al. 1998, Landau et al.1995, Uchida et al. 1995).

Çalışmanın ileriki aşamalarında hücre farklılaşmasının RT-PCR analizleri ve flow sitometrisi yöntemleri de kullanılarak analiz edilmesi planlanmaktadır.

Gelecekteki çalışmalarımızda büyüme faktörü miktarı artırılarak mezotelyal hücrelerin in vitro kültüründe kullanılacak en iyi FGF-2 miktarı belirlenmesi çalışmalarına yer verilecektir. Ayrıca, diğer büyüme faktörleri olan VEGF, PDGF ve TGF- β 'nin in vitro kültür ortamında mezotelyal hücrelere olan etkisi incelenerek doku mühendisliği çalışmalarına katkı sağlaması hedeflenmektedir.

5. Kaynaklar

Alim, OA, Moselhy, M, Mroueh, F, 2012. EMG Signal Processing and Diagnostic of Muscle Diseases, *2nd International Conference on Advances in Computational Tools for Engineering Applications (ACTEA)*, 1-6, Beirut, Lebanon, 12-15 Dec.

Cano, ME, Class, QA Polich, J, 2009. Affective valance, stimulus attributes, and P300: Color vs. black/White and normal vs. scrambled images, *International Journal of Psychophysiology*, **71**, 17-24.

Cecchin, T, Ranta, R, Koessler, L, Caspary, O, Vespignani, H, Maillard, L, 2010. Seizure lateralization in scalp EEG using hjorth parameters, *Clinical neurophysiology*, **121(3)**,290-300. doi: 10.1016/j.clinph.2009.10.033.

Dauleh, S, Santeramo, I, Fielding, C, Ward, K, Herrmann, A, Murray, P, Wilm, B. 2016. Characterisation of cultured mesothelial cells derived from the murine adult omentum. *PLoS one*, **11(7)**, e0158997.

Esch, F, Baird, A, Ling, N, et al, 1985. Primary structure of bovine pituitary basic fibroblast growth factor (FGF) and comparison with the amino-terminal sequence of bovine brain acidic FGF. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **82**, 6507-6511

Fujita, M, Ikemoto, M, Kishishita, M, et al. 1996. Elevated basic fibroblast growth factor in pericardial fluid of patients with unstable angina. *Circulation* **94**, 610-3.

Fujita, M, Ikemoto, M, Tanaka, T, et al. 1998. Marked elevation of vascular endothelial growth factor and basic fibroblast growth factor in pericardial fluid of patients with angina pectoris. *Angiogenesis*, **2**, 105-108. doi: 10.1023/A:1009062712441

Gorin, C, Rochefort, GY, Bascetin, R, Ying, H, Lesieur, J, Sadoine, J, Beckouche, N, Berndt, S, Novais, A, Lesage, M, Hosten, B, Vercellino, L, Merlet, P, Le-Denmat, D, Marchiol, C, Letourneur, D, Nicoletti, A, Vital, SO, Poliard, A, Salmon, B, Muller, L, Chaussain, C, Germain, S, 2016. Priming Dental Pulp Stem Cells With Fibroblast Growth Factor-2 Increases Angiogenesis of Implanted Tissue-Engineered Constructs Through Hepatocyte Growth Factor and Vascular Endothelial Growth Factor Secretion. *Stem Cells Translational Medicine*, **5(3)**, 392-404. doi: 10.5966/sctm.2015-0166.

Laham, RJ, Simons, M, Tofukuji M, Hung, D, Sellke, FW, 1998. Modulation of myocardial perfusion and vascular reactivity by myocardial basic fibroblast growth factor: Insight into ischemia-induced reduction in endothelium-dependent vasodilation. *Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, **116(6)**, 1022-8. doi: 10.1016/S0022-5223(98)70055-8.

Landau, C, Jacobs, AK, Haudenschild, CC. 1995. Intrapericardial basic fibroblast growth factor induces myocardial angiogenesis in a rabbit model of chronic ischemia. *American Heart Journal*, **129(5)**, 924-31. doi: 10.1016/0002-8703(95)90113-2.

Latifoğlu, F, Sönmezer, D, Toprak, G, Düzler A, İşoğlu, İA, Kaan, D, 2018. Cell isolating from bovine pericardial fluid and culturing for next tissue engineering applications. *International Conference on Technology, Engineering and Science (Icontes 2018)*, Antalya, Türkiye, 26-29 October, **4**, 224-229.

Mahaphonchaikul, K, Sueaseenak, D, Pintavirooj, C, Sangworasil, M, 2010. EMG signal feature extraction

based on wavelet transform, *International Conference on Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, **1**, 356–360, Chiang Mai, Thailand, 19-21 May.

Ornitz, DM, Itoh, N, 2015. The Fibroblast Growth Factor signaling pathway. *Wiley Interdisciplinary Reviews-Developmental Biology*, **4**, 215–266.

Rozenkrants, B, Polich, J, 2008. Affective ERP processing in a visual oddball task: Arousal, valance, and, *Clinical Neurophysiology*, **119**, 2260-2265.

Rozenkrants, B, Olofsson, JK, Polich, J, 2008. Affective visual event-related potentials: Arousal, valance, and repetition effects for normal and distorted pictures, *International Journal of Psychophysiology*, **67**, 2008, 114-123.

Sanei, S, Hosseini-Yazdi, A, 2011. Extraction of ECG from single channel EMG signal using constrained singular spectrum analysis, *17th International Conference on Digital Signal Processing (DSP)*, 1-4, Corfu, Greece, 6-8 July.

Schelch, K, Wagner, C, Hager, S, Pirker, C, Siess, K, Lang, E, Marian, B, 2018. FGF2 and EGF induce epithelial–mesenchymal transition in malignant pleural mesothelioma cells via a MAPKinase/MMP1 signal. *Carcinogenesis*, **39(4)**, 534-545.

Sönmezer, D, Latifoğlu, F, İsoğlu, İA, Düzler, A, Toprak, G, Kaan, D, 2016. Hücre Bileşeni ve Biyomalzeme ile Vasküler Doku Üretimi. *Tıp Teknolojileri Ulusal Kongresi (TIPTEKNO'16)*, Antalya, Türkiye, ss.205-208, 27-29 Ekim

Uchida, Y, Yanagisawa-Miwa, A, Nakamura, F, Yamada, K, Tomaru, T, Kimura, K, Morita, T, 1995. Angiogenic therapy of acute myocardial infarction by intrapericardial injection of basic fibroblast growth factor and heparin sulfate: an experimental study. *American Heart Journal*, **130**, 1182-1188.

Vasfi, TN, 2014. SPSS Uygulamalı İstatistik Teknikleri, **3. Baskı**, Seçkin Yayıncılık Ankara, 296.

Yu, PJ, Ferrari, G, Galloway, AC, Mignatti, P, Pintucci, G, 2007. Basic fibroblast growth factor (FGF-2): the high molecular weight forms come of age. *Journal of Cellular Biochemistry*, **100**, 1100–1108.

Araştırma Makalesi / Research Article

Üst Ekstremitte Dış İskelet Robot İçin Giyilebilir Kablosuz MIMU Sensörler Vasıtası İle İnsan Robot Etkileşim Ağı Tasarımı

Beyda TAŞAR^{1*}, Oğuz YAKUT¹, Sait MÜFTÜ¹, Şakir Furkan YÖNDEM¹, Hakan DURMUŞ¹¹Firat University, Faculty of Engineering, Department of Mechatronics, Elazığ

* Sorumlu yazar e-posta: btasar04@hotmail.com

oyakut@firat.edu.tr

saitmüftü33@gmail.com

yondem_furkan@hotmail.com

drmskhn@hotmail.com

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-4689-8579>ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-0986-1435>ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-5621-7805>ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-0067-1379>ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0002-0311>

Geliş Tarihi: 19.08.2019

Kabul Tarihi: 20.11.2020

Öz

Bu araştırma kapsamında insan vücuduna uyumlu, insan hareketlerini destekleyen iki serbestlik dereceli bir üst-ekstremitte dış iskelet robot sisteminin kontrolü için giyilebilir kablosuz sensörler MIMU (ivmeölçer, jiroskop) vasıtası ile insan robot etkileşim ağı tasarımı gerçekleştirilmiştir. Kişinin üst ve alt kol uzuvlarına bağlı iki adet MIMU sensörden açılal ivmelenme, jiroskop ve manyetometre bilgileri alınıp, AHRS (Attitude and Heading Reference Systems) algoritması ile bu sensör verileri bütünleştirilip kişinin üst ekstremitte hareketine ilişkin (üst kol, alt kol) kuaternion yönelim matrisi hesaplanmıştır. Kinematik analiz ile de kuaternion matrisi verileri kullanılarak omuz ve dirsek eklemlerine ait Euler yönelim açıları (x, y, z eksenleri için) hesaplanmıştır. Geliştirilen etkileşim ağı ile laboratuvar olanakları ile tasarlanan ve imalatı yapılan iki serbestlik dereceli prototip üst ekstremitte dış iskelet robot kolun gerçek zamanlı hareket kontrolü gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, kullanıcı kişi kolunu hareket ettirenken, dış iskelet robotta senkronize olarak aynı hareketi gerçekleştirmektedir.

Anahtar kelimeler

MIMU; Üst Ekstremitte Dış İskelet Robot; İnsan-Robot Etkileşimi; Kinematik Analiz; AHRS Algoritması

Human Robot Interaction Network Design with Wearable Wireless MIMU Sensors for Upper Extremity Exoskeleton Robot

Abstract

Within the scope of this research, human robot interaction network design was carried out by means of wearable wireless sensors MIMU (accelerometer, gyroscope, magnetometer) for the control of a two-degree upper-extremity exoskeletal robot system compatible with human body and supporting human movements. Angular acceleration, gyroscope information was obtained from two MIMU sensors connected to the upper and lower limbs of the subject, and AHRS (Attitude and Heading Reference Systems) algorithm was integrated with these sensor data and the upper extremity movement (upper arm, lower arm) quaternion orientation matrix was calculated. Euler orientation angles (for x, y, z axes) of shoulder and elbow joints were calculated by using kinematic analysis. With the developed interaction network, real time motion control of two degrees of freedom prototype upper extremity exoskeleton robot arm which is designed and manufactured with laboratory facilities was realized. As a result, the user performs the same movement synchronously in the exoskeleton robot as the person moves the arm.

Keywords

MIMU; Upper Extremity Exoskeleton Robot; Human-Robot Interaction; Kinematic Analysis; AHRS Algorithm

1. Giriş

Son yıllarda, giyilebilir robotlara yönelik çalışmalar oldukça yoğunlaşmıştır. Dış iskelet robot, bir operatör tarafından giyildiğinde kişinin iskelet ve kas sistemine ve hareketine destek sağlayan, kişi ile senkronize hareket edebilen robotlar (Şekil 1) olarak tanımlanabilirler (Hua vd. 2016, Pons 2008). Operatör ile robot arasında kurulacak etkileşim ağı aracılığıyla robot, operatör kişinin hareket motivasyonunu algılar, kişinin hareket aktivitesini takip eder, hareketini destekler ve fiziksel mukavemetini (yük taşıma kapasitesi, çalışma süresi, vb.) artırır. Literatürde kullanım amacına göre üst ekstremitte dış iskelet robotlar ikiye ayrılmaktadır, bunlar askeri (mukavemet arttırmak amaçlı) ve rehabilitasyon (hareketi asiste etmek ve desteklemek amaçlı) tasarımlardır (Dollar ve Herr 2008, Vukobratovic 2006, Cowanet 2012, Mohammed vd. 2012, Marchal-Crespo ve Reinkensmeyer, 2009, Pons 2010).

Dünyada yükselmekte olan yaş ortalamasına paralel olarak serebrovasküler ve nöromusküler hastalıklar artmaktadır ve bu kişiler fizik tedavi ve rehabilitasyon hizmetine ihtiyaç duymaktadırlar (Dollar ve Herr 2008, Vukobratovic 2006). Fiziksel

terapi olarak adlandırılan ve fizyoterapist bir ekip tarafından hastanın üst ekstremitte fonksiyonunu restore etmek için uygulanan geleneksel yöntemin başarılı olduğu bilinmektedir (Marchal-Crespo ve Reinkensmeyer 2009, Pons 2010, Kawamoto vd. 2003). Bununla birlikte, yüksek hasta sayıları ve düşük terapist sayıları, hastaların yeterli sayıda fizik tedavi seansı almalarını engellemektedir. Ayrıca terapistler tarafından kişiye manuel olarak yaptırılmaya çalışılan rehabilitasyon hareketlerinin birebir tekrarlanamaması (hız ve eklem hareket yörüngesinin değişkenliğe uğraması) da geleneksel terapi hastanın ilerlemesini ve iyileşmesini olumsuz yönde etkiler. (Fleischer and Wege vd. 2006). Yaşlıların ve hastaların sayısındaki artış, robotik rehabilitasyon çalışmalarına olan ilgiyi arttırmıştır (Fleischer vd. 2005, Fleischer vd. 2006, Wang ve Makeig 2009, Lew vd. 2012, Valiente 2015). Robotla terapinin geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında çok daha yüksek ve tekrarlanabilir başarı sonuçları verdiği araştırmacılarca rapor edilmiştir (Fleischer vd. 2005). Bu alandaki en bilinen başarılı üst ekstremitte robotlar, T-Wrex Dış iskelet robot (Sanchez et. al. 2006), MGA dış iskelet robot (Lenzo 2013), RUPERT (Huang vd. 2012), L-EXOS (Frisoli et. al. 2009) dir.



Şekil 1. Örnek üst ekstremitte dış iskelet robot görselleri

Dış iskelet robot çalışmaları başlıca iki temel bölüme ayrılmaktadır. Birinci kısım, mekanik tasarım, imalat ve eyleyici seçimi, ikinci kısım ise bu araştırma çalışmasının da konusu olan insan – robot etkileşimi yani insan hareket arzusunun algılanması ve bu istek doğrultusunda dış iskelet robotun kişi ile senkronize hareketinin sağlanmasıdır. Literatürde, dış iskelet robotlarda insan-robot etkileşim ağının kurulumu için üç farklı sensör türü kullanımı göze çarpmaktadır.

- 1) Biyoelektriksel sinyaller (EMG, EEG) ile etkileşim ağı oluşturulması
- 2) İnsan-robot arasındaki etkileşim kuvvetinin ölçümü vasıtası ile etkileşim ağı oluşturulması
- 3) MIMU sinyalleri vasıtası ile etkileşim ağı oluşturulması

İlk yöntemde, biyoelektriksel sinyallerin (elektromiyografi (EMG) veya elektroensefalogram (EEG) doğrudan kullanıcı kişiden giyilebilir sensörler vasıtası ile kaydedilmesi ve ardından insan hareket

arzusunun bu sinyaller aracılığıyla belirlenmesi ilkesi söz konusudur (Fleischer and Wege vd. 2006, Kawamoto vd. 2003, Fleischer vd. 2005, Fleischer vd. 2006, Wang ve Makeig 2009, Lew vd. 2012). Bu nedenle, diğer iki yöntemle kıyasla, bu yöntemde bilgi ve zaman kaybı çok düşüktür ve insan hareket arzusunu yüksek doğrulukla tanımak mümkündür (Pons 2010). Ancak biyoelektriksel sinyal tabanlı etkileşim ve kontrol stratejileri, biyomedikal kayıt cihazları çevresel faktörlerden (titreşim ve manyetik alandan) etkilediğinden kullanışlı değildir.

İkinci yöntem ise, kullanıcı ile dış iskelet arasına yerleştirilen sensörlerden etkileşim kuvvetlerinin ölçülmesi prensibine dayanır. Etkileşim kuvvetinin büyüklüğüne göre dış iskelet robot eklemleri ile kullanıcı kişinin eklemleri arasındaki açıl hareket farklılığı ilişkilendirip dış iskelet robotun eklem eyleyicilerinin hızı ve konumu kontrol edilmektedir. Bazı araştırmacılar bu etkileşim kuvvetini kullanıcı ve robot arasındaki bağlantı noktasına yerleştirdikleri kuvvet sensörleri ile ölçerken, diğerleri robot bağlantısına yerleştirilen elastik malzemenin deformasyon hızını hesaplayarak belirlemişlerdir (Valiente 2005, Kawamoto and Sankai 2005, De Rossi 2011). İnsan ve robot arasındaki basınç etkileşimini ölçen ve bu bilgi ile kontrol stratejisi geliştiren araştırmacılar da mevcuttur (Suzuki vd. 2007, del-Ama vd. 2012).

Üçüncü yöntem ise kişinin uzuvlarına giydiği MIMU sensörlerden gelen ivmeölçer, jiroskop ve manyetometre bilgilerinin füzyonu sonucu kişinin hareketi esnasında uzuvların hız, yönelim ve oryantasyon bilgilerinin hesaplanması ve bu bilgi ile dış iskelet robotun eklem eyleyicilerinin kontrolörü prensibine dayalıdır (Luinge vd. 2005, Luinge vd. 2007, Roetenberg vd. 2005, Roetenberg vd. 2009, Mihelj 2006, Bleser vd. 2011). X, y, ve z eksenlerinde yönelim yani Euler açıları (yunuslama, yalpalama ve sapma açıları) belirlemek için AHRS adı verilen algoritmalar geliştirilmiştir (El-Gohary ve McNames 2012, El-Gohary ve McNames 2015, Taunyazov vd. 2016, Picerno vd. 2011, Taetz vd. 2016, Vignais vd. 2013, Peppoloni vd. 2016, Peppoloni vd. 2015). Bu algoritma ile ivmeölçer, jiroskop ve manyetometre ölçümlerinin füzyonu ile en optimum yönelim sonucu hesaplanır (Miezal vd. 2013, Jung vd. 2010, Peppoloni vd. 2013, Zhang vd. 2011, Miezal vd.

2011, El-Gohary vd. 2011, Ruffaldi vd. 2014). Bu yöntem bilgi ve zaman kaybı çok düşük olması ve biyoelektriksel sensörlerin kaydında olduğu gibi çevresel etki ve elektrot titreşim problemlerinin de bulunmaması nedeni ile dış iskelet robot tasarımı çalışmalarında özellikle tercih edilmektedir.

Bu araştırma kapsamında insan vücuduna uyumlu, insan hareketlerini destekleyen iki serbestlik dereceli (omuz ve dirsekte birer serbestlik derecesi) üst ekstremitte dış iskelet robot sistemi için insan-robot etkileşim ağının tasarımı çalışması gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında öncelikle giyilebilir kablosuz MIMU sensörler vasıtası ile kişinin kol hareketi esnasında oluşan açıl ivme, yerçekimi etkisi ölçülmüştür. Kullanılan AHRS algoritması ile de alt ve üst kolun yönelim açısı yani Euler açıları (x, y, z eksenleri etrafında) hesaplanmıştır. Son aşamada ise geliştirilen insan-robot etkileşim ağı tasarımı ve imalatı yapılan iki prototip bir dış iskelet robot üzerinde test edilmiştir.

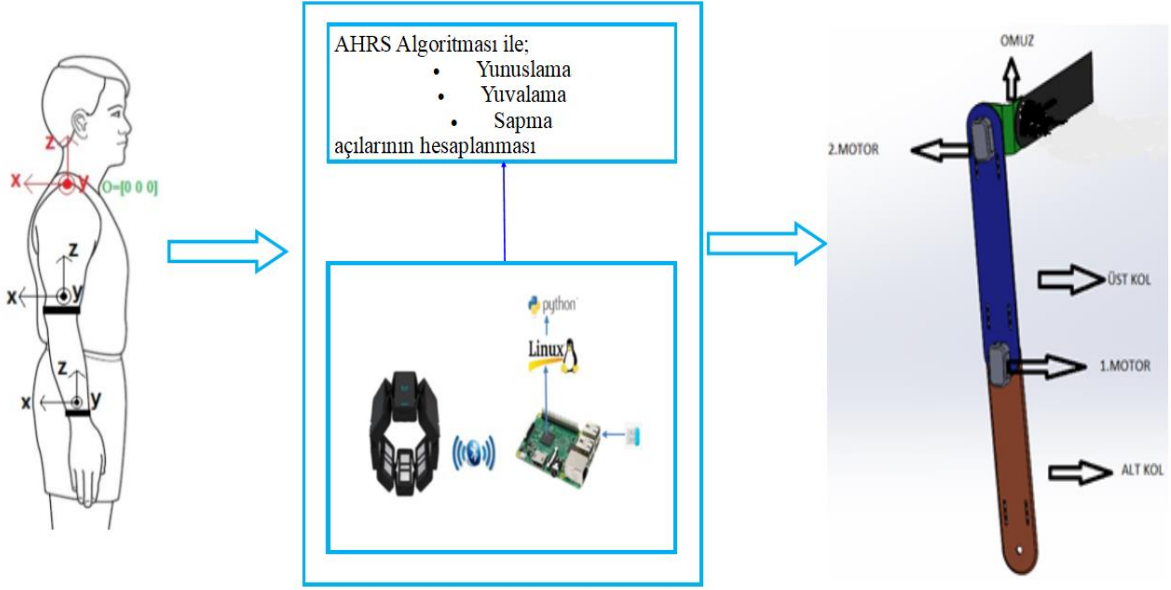
2. Materyal ve Metot

2.1. Çalışmaya Genel Bakış

Bu çalışmada, düşük maliyetli 2 DOF dış iskelet robotu, terapötik egzersizleri yapmak ve hareketlerini desteklemek için tasarlanmış ve MIMU sensörler vasıtası ile insan – robot arasında etkileşim ağı tasarımı yapılmıştır. Mekanik özellikler, elektronik donanım, dış iskelet robota ilişkin matematiksel modelleme ve etkileşim ağı tasarımı ayrıntılı olarak sunulmuştur. Çalışmanın kapsamını özetleyen blok şeması Şekil 2'de yer almaktadır. Operatör kişinin üst ve alt kol uzuvlarına konumlandırılan MIMU sensör verileri ile üst ve alt kol eklemlerinin oryantasyon açıları (Euler açıları yani yunuslama, yuvarlanma, yalpalama (sapma) açıları) hesaplanmış ve kişinin hareket isteği ile senkronize bir şekilde dış iskelet robotun hareket kontrol sağlanmıştır. Kişinin alt kol uzvuna (dirseğe yakın) ve üst kol uzvuna (omuza yakın) olmak üzere iki adet giyilebilir MIMU sensör konumlandırılmıştır. Kullanılan MIMU sensör Thalmic Firmasınca üretilen myo kol bandı üzerinde yer alan 9 DOF MIMU sensördür. 50 Hz örnekleme frekansı ile sensör verisi alınmakta ve bluetooth protokolü ile Raspberry pi 3 gömülü sistem kartına iletilmektedir. MIMU, açıl

hız, doğrusal ivme verisini tek bir modülde toplayan elektronik bir sensör birimdir. MIMU temelde üç ayrı sensör içerir. Bunlar ivmeölçer, jiroskop ve

manyetometredir. Ve bu üç sensör verisinin birleşimi ile harekete ait kinematik veriler (açısal ivmelenme, açısal oran (hareket miktarı)) elde edilir.



Şekil 1. Çalışmaya ait blok şeması

2.2. AHRS Algoritması ile Euler açılarının hesaplanması

AHRS algoritması ile yönelim bilgisini elde etmek için jiroskoplardan, ivmeölçerlerden ve manyetometreden gelen bilgiyi en uygun şekilde türleştirir. Bir AHRS algoritması kavramsal olarak iki ayrı bloğa ayrılmıştır: 1) jiroskoplardan hesaplanan yönelim değeri ve 2) ivmeölçer ve manyetometrelerden hesaplanan yönelim değeri. AHRS algoritmaları, her iki bağımsız bir yönelim tahminini kullanarak, her iki yaklaşımı kaynaştırılmış tek bir çözüme entegre etmektedir. Jiroskop ile tek başına yönelim bilgisini hesaplamak mümkün olsa da uzun vadedeki kayma yani drift hatası en büyük dezavantajdır. Bu nedenle manyetometre ile kalibrasyonunun yapılması yani AHRS algoritması ile sonuçların sentezlenmesi oryantasyonu gösteren Euler açılarının (yunuslama, yalpa ve sapma açıları) doğru hesaplanması için etkin bir yöntemdir. AHRS algoritması olarak Magdwick algoritması kullanılmıştır. Bu yöntem, MIMU' nun ivmeölçer okumalarına dayanarak yerçekimi alanına göreli 3D oryantasyonunu ve manyetometreleri kullanarak dünya manyetik alanı boyunca oryantasyonunu elde etmeyi mümkün kılan bir gradyan iniş optimizasyonuna dayanır. Her sensörün katkısını en

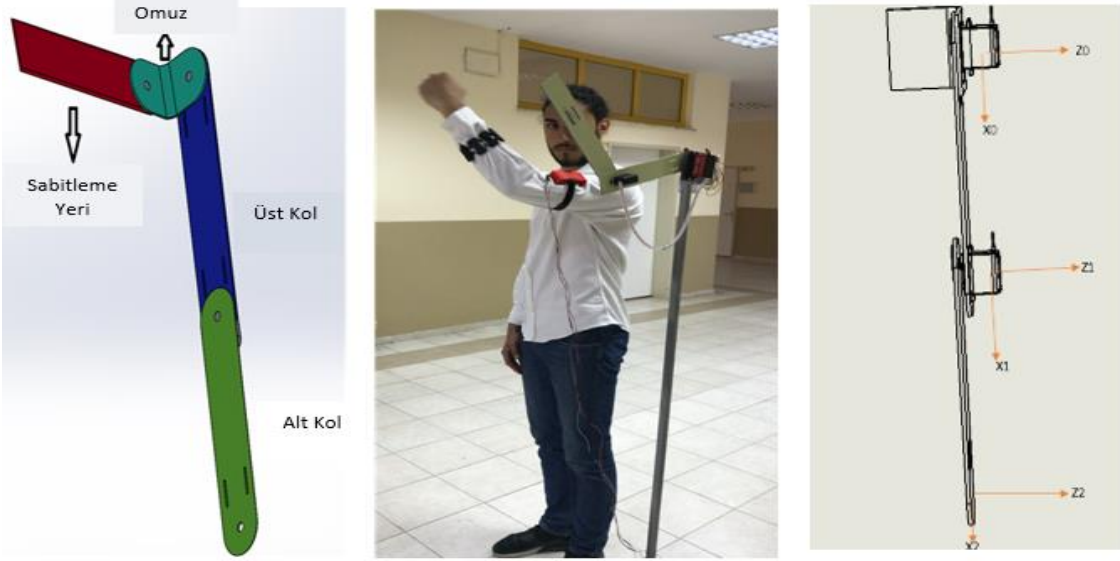
uygun şekilde ağırlıklandırarak oryantasyon tahminine yaklaşma oranını kontrol etmek için bir parametre kullanılır. Bu Algoritma, oryantasyon verilerinin kuaterniyon gösterimi ile ifadesini sunar. Kuaternion matrisinden Euler açılarına dönüşüm ise Eşitlik (1) yardımı ile hesaplanmıştır.

$$\begin{bmatrix} \gamma \\ \beta \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tan^{-1} \frac{2(q_0q_1 + q_2q_3)}{1 - 2(q_1^2 + q_2^2)} \\ \sin^{-1}(2(q_0q_2 - q_3q_1)) \\ \tan^{-1} \frac{2(q_0q_3 + q_1q_2)}{1 - 2(q_2^2 + q_3^2)} \end{bmatrix} \quad (1)$$

2.3. Dış iskelet robotun tasarımı ve imalatı

Biyolojik kolun kinematikğine uyum sağlayacak şekilde iki sayıda bağımsız serbestlik derecesine sahip üst ekstremité dış iskelet robotun tasarımı SolidWorks programı ile üç boyutlu olarak tasarlanmıştır (Şekil 3 a). Kolun sadece x- y eksenine dik olan z eksenine doğrudusunda hareket ettiği kabulün yapıp x ve y doğrultusundaki hareketleri ihmal edilmiştir. Üst ekstremité dış iskelet robotun imalatı alikobat (alüminyum kompozit) malzemenin torna, freze, kaynak işlenmesi ve bazı parçalarının da 3D yazıcı kullanılarak imal edilip montajlanması sonucu üretilmiştir (Şekil 3 b). Robotun her bir ekleminde

açısıl hareket miktarını ölçmek için birer adet endüstriyel potansiyometre yerleştirilmiştir.



Şekil 3. Üst Ekstremitte Dış İskelet robotun a) Solid Tasarımı b) Çalışma Esnasında Dış iskelet Robot Prototipinin Fotoğrafi c) Eksen takımı yerleşim planı

Dış iskelet robotta eklem eyleyicisi olarak iki adet DC motor (omuz ve dirsek eklemi için) kullanılmıştır. Ayrıca her bir eyleyici için bir adet sürücü ve tüm sistemin bilgisayardan bağımsız kontrolü için Raspberry pi 3 gömülü sistem kartı kullanılmıştır. Tüm sistemin enerji ihtiyacı yüksek güçlü LiPo bataryalar ile sağlanmıştır. Tüm kinematik hesaplamalar ve motor kontrol yazılımları Raspberry pi 3 gömülü sistem kartı üzerinde python dilinde kodlanmıştır.

2.4. Dış iskelet robotun Matematiksel Modeli

İnsan kolu, eklemler ile birbirine bağlanan kemiklerden oluşmaktadır. Eklemlerinin her pozisyonu ve yönelimi ise önceki ve sonraki eklem oryantasyonuna bağlıdır ve ona göre ifade edilir. Bu yapı kinematik bir zincir yapısı oluşturur (Bergamasco 1995, Güzeliş ve Birgül 2005).

2.4.1. Düz Kinematik Analiz

Dış iskelet robot iki serbestlik derecesine sahiptir. Yani bir adet motor omuz ekleminde bir adet motorda dirsek ekleminde yer almaktadır (θ_1, θ_2). Robotun uzuv koordinat sistemi ve mafsıl koordinatlarının yerleşimleri Şekil 3c' de gösterilmiştir. Kinematik Analiz için Denavit-Hartenberg yöntemi kullanılmıştır. (Bergamasco 1995, Güzeliş ve Birgül 2005, Melchiorri C. 2015)

Çizelge 1. Robotun bu konfigürasyonu için D – H çizelgesi

D-H Tablosu	θ	D	a	α
1	θ_1	0	L0	0
2	θ_2	0	L1	0

Elde edilen D – H parametrelerine (Çizelge 1) göre robotun kolun uç noktasının (x_2, y_2, x_2) sabit kabul edilen referans eksene göre (x_0, y_0, z_0) konum ve oryantasyonunu gösteren transformasyon matrisinin genel gösterimi Eşitlik 2'deki gibidir.

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_i & \sin\theta_i \sin\alpha_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

İki serbestlik dereceli sistem için Transformasyon matrisi T, Eşitlik 3'deki gibi ifade edilir.

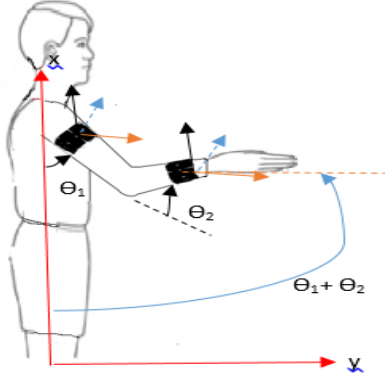
$$T = A_1 * A_2 \quad (3)$$

Tablo 1' deki D – H parametrelerini kullanarak robota ait dönüşüm matrisleri Eşitlik 3' de yerine koyularak robot transformasyon matrisi Eşitlik 4'deki gibi elde edilmiştir.

$$T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) & -\sin(\theta_1 + \theta_2) & 0 & L1 * \cos(\theta_1 + \theta_2) + L0 * \cos(\theta_1) \\ \sin(\theta_1 + \theta_2) & \cos(\theta_1 + \theta_2) & 0 & L1 * \sin(\theta_1 + \theta_2) + L0 * \sin(\theta_1) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.4.2. Ters Kinematik Analiz

Ters kinematik analiz, kartezyen uzayda ana koordinat eksen takımına göre verilen uç elemanın konum ve yönelim verileri yardımıyla eklem değişkenlerinin bulunması şeklinde ifade edilebilir. Robotun izlemesi istenen yörünge bilinir ve bu yörüngeyi sağlayacak mafsal(eklem) değişkenlerinin bulunması istendiği durumlarda ters kinematik analiz yöntemi kullanılır. (Bergamasco 1995, Güzelış ve Birgül 2005).



Şekil 4. Ters kinematik Analiz için grafiksel yaklaşım

Şekil 14' deki gibi kullanıcı kişinin alt koluna giydiği MIMU sensörden alınan verilerin füzyonu vasıtası ile hesaplanan Euler açıları kolun uç noktasının yönelim açısını ifade etmektedir. Yani iki eklemin hareketi sonucu oluşan x, y, ve z eksenlerindeki yönelimlerinin toplamını verir.

Denklem (5- 8)'den yararlanarak MIMU verisinden hesaplanan yalpalama, yuvarlama, yunuslama açıları yardımı ile oryantasyon matrisi hesaplanacak olursa, Yalpalama, z eksenini etrafında saatin tersi yönünde α açısı kadar dönmeyi ifade eder. Dönme matrisi,

$$R_z(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

Yunuslama, y eksenini etrafında saatin tersi yönde β açısı kadar dönmeyi ifade eder. Dönme matrisi

$$R_y(\beta) = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \quad (6)$$

Yuvarlanma, x eksenini etrafında saatin tersi yönde γ açısı kadar dönmeyi ifade eder. Dönme matrisi

$$R_x(\gamma) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{pmatrix} \quad (7)$$

Elde edilen yunuslama, yuvarlanma ve yalpalama rotasyon matrislerinin çarpılmasıyla tek bir rotasyon matrisi oluşturulabilir.

$$R(\alpha, \beta, \gamma) = R_z(\alpha)R_y(\beta)R_x(\gamma) = \begin{pmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma + \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \\ \sin \alpha \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma \end{pmatrix} \quad (8)$$

$R(\alpha, \beta, \gamma)$ eşitliğindeki α, β, γ değerleri yerine alt kol MIMU verisinden hesaplanan yunuslama, yuvarlanma, yalpalama açıları (α_{alt} , β_{alt} , γ_{alt}) yazılır ve düz kinematik analiz ile elde edilen T matrisinin 3x3 lük rotasyon kısmına eşitlenecek ve tanjant eşitlikleri oluşturulacak olursa Eşitlik 9-10 elde edilir.

$$\tan \alpha_{alt} = \tan(\theta_1 + \theta_2) \quad (9)$$

$$\alpha_{alt} = (\theta_1 + \theta_2) \quad (10)$$

Ters kinematik analiz yaklaşımı ile Eşitlik 11 yazılabilir.

$$A_1 = A_2^{-1} * T \quad (11)$$

$R(\alpha, \beta, \gamma)$ eşitliğindeki α, β, γ değerleri yerine bu kez üst kol MIMU verisinden hesaplanan yunuslama, yuvarlanma, yalpalama açıları ($\alpha_{üst}$, $\beta_{üst}$, $\gamma_{üst}$) yazılır ve A₁ matrisinin 3x3 lük rotasyon kısmına eşitlenecek ve tanjant eşitlikleri oluşturulacak olursa θ₁ elde edilir.

$$\tan \alpha_{üst} = \tan(\theta_1) \quad (12)$$

$$\alpha_{üst} = (\theta_1) \quad (13)$$

Eşitlik 14 yardımı ile de θ₂ açısı hesaplanır.

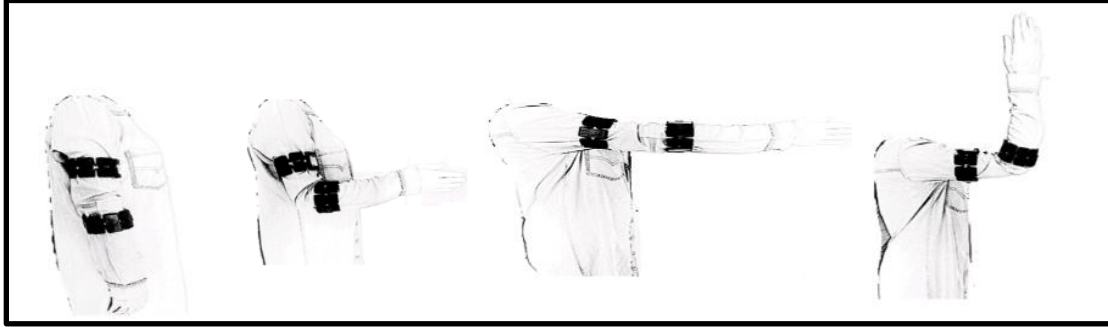
$$\theta_2 = (\alpha_{alt} - \alpha_{üst}) \quad (14)$$

3. Bulgular Ve Tartışma

Bu çalışma kapsamında öncelikle iki serbestlik dereceli bir üst ekstremité dış iskelet robotun tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Sonrasında kişi örnek bir hareket senaryosunu (Şekil 5)

gerçekleştirirken üst ve alt kola bağlı 9 DOF MIMU sensörleri aracılığı ile kişinin üst ve alt kol hareket yönelimleri algılanmış AHRS algoritması yardımı ile

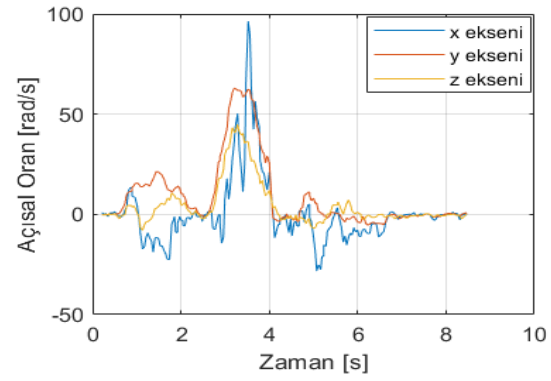
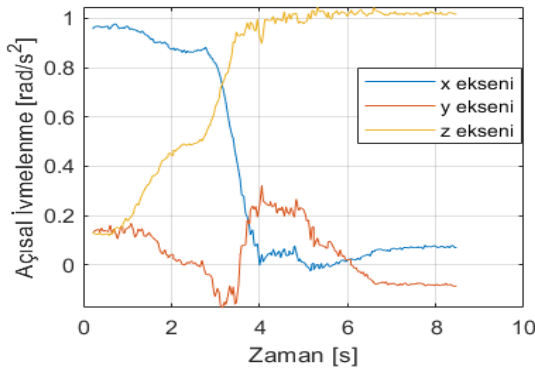
kuaternion matrisi, ters kinematik analizle de Euler açıları (yuvalama, yunuslama, yalpalama açıları) hesaplanmıştır.



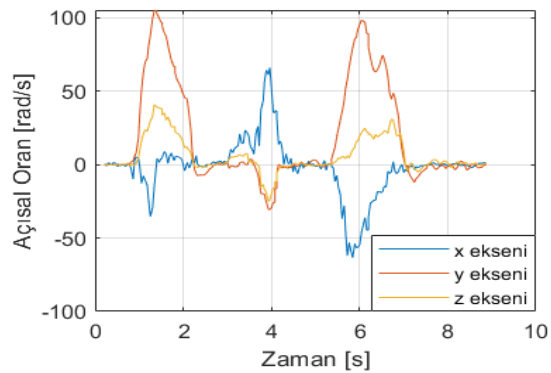
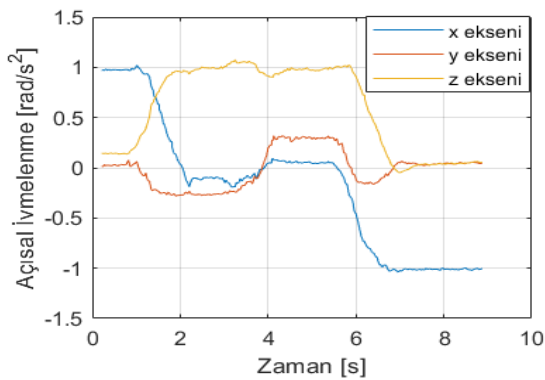
Şekil 5. Hareket senaryosu

Kişi örnek bir hareket senaryosunu gerçekleştirirken üst ve alt kola bağlı MIMU sensörlerinden ölçülen üç ekseninde açısal ivmelenme ve açısal oran değişimleri

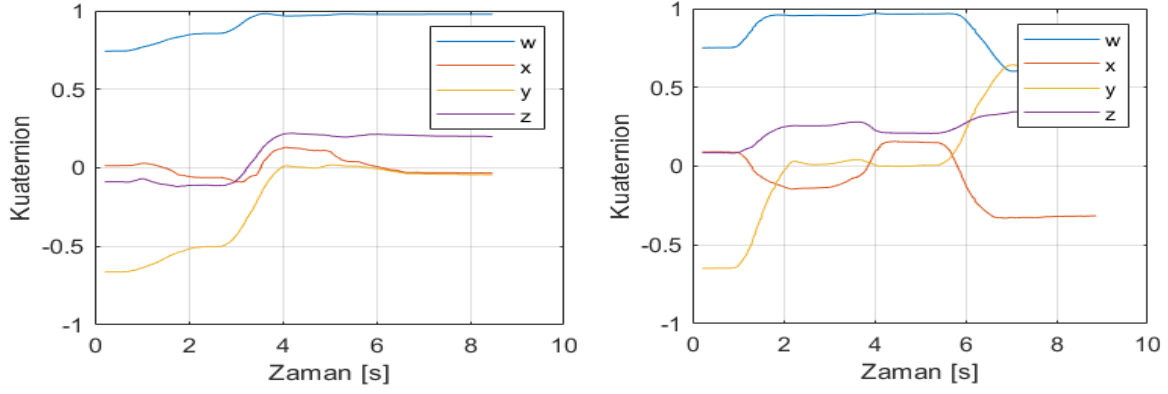
Şekil 6-7'de görülmektedir. Eşitlik (1) yardımı ile hesaplanan kuaternion matrisi ise Şekil 8'de görüldüğü gibi değişmektedir.



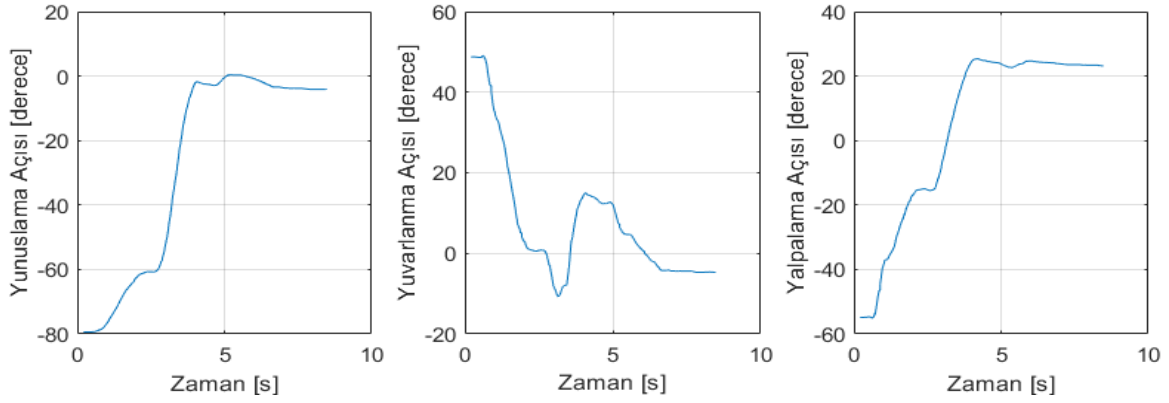
Şekil 6. Üst kola bağlı MIMU sensörden ölçülen ivmelenme ve açısal oran verilerinin değişimi a) üst kol b) alt kol



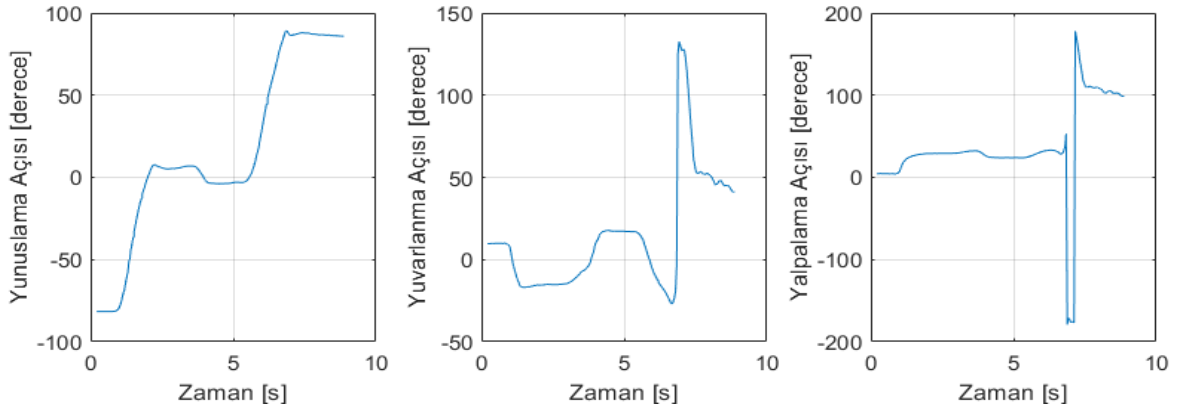
Şekil 7. Alt kola bağlı MIMU sensörden ölçülen ivmelenme ve açısal oran verilerinin değişimi a) üst kol b) alt kol



Şekil 8. MIMU sensör füzyonu ile hesaplanan kuaternion verisi a) Üst kol ve b) alt kol



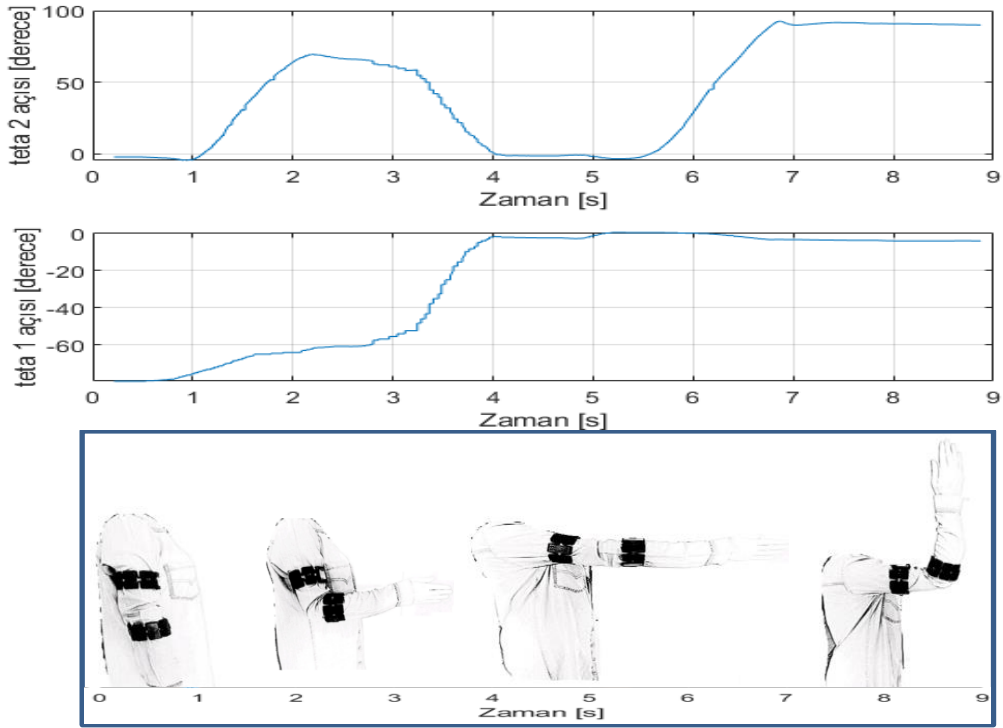
Şekil 9. Üst kol MIMU verisi için hesaplanan Euler açılarının değişim grafiği



Şekil 10. Alt kol MIMU verisi için hesaplanan Euler açılarının değişim grafiği

Şekil 9-10'da kuaternion matrisleri kullanılarak ters kinematik analiz ile hesaplanmış üst kol ve alt kol uzuvlarının Euler açılarının (yunuslama, yuvarlanma, yalpalama açıları) değişimini yer almaktadır. Son olarak hesaplanan Euler açıları vasıtası ile Eşitlik 12-14 kullanılarak, omuz ve dirsek ekleminin (teta1 ve teta 2) açısal hareket miktarı hesaplanmıştır. Bu açı değerleri MIMU sinyaller vasıtası ile insan - robot

etkileşim ağı kurulmuş dış iskelet robotun kişi ile senkronize bir şekilde hareket etmesi için eklem motorlarına referans açı değeri olarak gönderilmiş ve dış iskelet robot eklemlerinin hareket kontrolü sağlanmıştır. Şekil 11'de kişi ile senkronize hareket eden dış iskelet robotun omuz ve dirsek eklemlerinin açısal hareket değişimi grafik olarak sunulmuştur.



Şekil 11. Üst ve alt kol eklemlerinin açıları ile değişim grafiği



Şekil 12. Üst ekstremitte bir dış iskelet robotun kontrolü için MIMU sensörler vasıtası ile etkileşim ağı tasarımına ait final çalışmaya fotoğrafı

Şekil 12'de ise bu deneysel uygulamaya ilişkin görsel öğeler yer almaktadır. Dış iskelet robotun omuz ve dirsek eklemine yerleştirilen potansiyometre yardımı ile hesaplanan açısal hareket miktarı, MIMU sensör ile ölçülen kişinin omuz ve dirsek hareketlerini sırası ile maksimum 0.9273° ve 0.5268° lik hata ile izlemektedir. Luengas YR (2018), arkadaşları ile 2 serbestlik dereceli bir üst ekstrimitenin eklem yörünge kontrolü için iki ayrı kontrolör tasarladılar ve sonuçlarını karşılaştırdılar.

PD kontrolör ile omuz ve dirsek eklemi için sırası ile ortalama takip hatası $\{0.8213^{\circ}, 1.8965^{\circ}\}$ ve Fuzzy PD kontrolör ile omuz ve dirsek eklemi için sırası ile ortalama takip hatası $\{0.326^{\circ}, 0.784^{\circ}\}$ dir. Atia MGB. ve Salah O. (2018), bir serbestlik dereceli bir üst ekstrimitenin dirsek eklem yörünge kontrolü için Fuzzy PID kontrolör tasarladılar ve kontrolörün ortalama takip hatası 1.75° idi. Yavuz A. (2019) ise arkadaşları ile tasarladığı dirsek dış iskelet robot için PID kontrolör yöntemi kullandılar ve 0.572° lik bir

takip hatası ile yörünge takibi sağladılar. Bu sunulan prototip çalışmalarının sonuçlarının yanı sıra halihazırda rehabilitasyon merkezlerinde aktif olarak kullanılan ticari üst ekstremitte dış iskelet robotların, maksimum yörünge izleme hataları için kabul edilebilir sınırın maksimum 15° olarak ifade edilmiştir (Hussain S.(2013), Veneman, JF. (2007)). Bu bilgi ışığında tasarlanan ve MIMU sensör vasıtası ile kontrol edilen iki serbestlik dereceli üst ekstremitte robotun 1.9273⁰ maksimum takip hatası limit sınırlar içerisinde.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada üst ekstremitenin hareketi esnasında eklem ve kol rehberliği sağlayacak olan iki serbestlik dereceli bir üst ekstremitte dış iskelet robotun tasarımı, kinematik analizi ve giyilebilir IMU sensör vasıtası ile kontrolüne ilişkin metot analiz edilmiş ve uygulamalı sonuçları grafiksel olarak sunulmuştur. Dış iskelet robotun insan hareketlerini senkronize bir şekilde takip edebildiği gösterilmiştir. Yazarlar, kontrol yaklaşımının, nöromüsküler bozuklukların ardından üst ekstremitte hareketlerinin yeniden eğitilmesi amacıyla yararlı olabileceğine inanıyor ve gelecekteki çalışmalarda mekanik tasarımı geliştirerek giyilebilir bir forma taşımayı ve kontrolörün başarısını günlük yaşamda ev terapisi için kullanıma uyarlamayı planlıyor.

Teşekkür

Bu proje 2209-A TÜBİTAK- Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında desteklenmiştir ve TUBİTAK 2242 Lisans Projeleri Bölge Yarışmalarında Bilişim Teknolojileri alanında ikincilik ödülüne layık görülmüştür. Ayrıca bu çalışma Fırat Üniversitesi tarafından MF 18.58 Başlangıç ArGe FUBAP Projesi kapsamında desteklenmiştir.

Kaynaklar

Atia MGB. and Salah O, 2018. Fuzzy logic with load compensation for upper limb exoskeleton control based on IMU data fusion, *Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetic*, December 12-15, 2018, Kuala Lumpur, Malaysia

Bergamasco M, Scattareggia MS, 1995. The Mechanical Design of the MARCUS Prosthetics hand, *In Proceedings of the IEEE International Workshop on Robot and Human*.

Bleser G, Hendeby G, Miezal M, 2011. Using egocentric vision to achieve robust inertial body tracking under magnetic disturbances. *In Proceedings of the 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, Basel, Switzerland, 26–29 October 2011, pp. 103–109.

Cowanet RE, 2012. Recent trends in assistive technology for mobility. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, **9**: 20, 1–8, Apr. 2012.

Del-Ama AJ, Moreno JC, Gil-Agudo A, De-los-Reyes A, and Pons JL., 2012. Online assessment of human–robot interaction for hybrid control of walking. *Sensors*, **12**: 1, 215–225.

De Rossi M, 2011. Sensing pressure distribution on a lower-limb exoskeleton physical human–machine interface. *Sensors*, **11**: 1, 207–227, Jan. 2011.

Dollar AM and Herr H, 2008. Lower extremity exoskeletons and active orthoses: Challenges and state of the art. *IEEE Transactions on Robotics*, **24**: 1, 144–158, Feb. 2008.

El-Gohary M, McNames J, 2012. Shoulder and elbow joint angle tracking with inertial sensors. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, **59**, 2635–2641.

El-Gohary M, McNames J, 2015. Human joint angle estimation with inertial sensors and validation with a robot arm. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, **62**, 1759–1767.

El-Gohary M, Holmstrom L, Huisinga J, King E, McNames J, Horak F, 2011. Upper limb joint angle tracking with inertial sensors. *In Proceedings of the 2011 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, Boston, MA, USA, 30 August–3 September 2011, pp. 5629–5632

Fleischer C. Wege, A, Kondak K. and Hommel G. 2006. Application of EMG signals for controlling exoskeleton robots. *Biomed Tech*. **51**: 5/6, 314–319

- Fleischer C, Reinicke C, and Hummel G. 2005. Predicting the intended motion with EMG signals for an exoskeleton orthosis controller, *Proceedings of the IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems*, pp. 2029–2034.
- Fleischer C. and Hummel, G, 2006. Embedded control system for a powered leg exoskeleton, In *Embedded Systems—Modeling, Technology, and Applications*. New York, NY, USA: Springer-Verlag, 177–185.
- Frisoli A1, Bergamasco M, Carboncini MC, Rossi B, 2009. Robotic assisted rehabilitation in Virtual Reality with the L-EXOS. *Stud Health Technol Information*, **145**:40-54.
- Güzel S, Bingül, Z. 2005. Robot Tekniği 1, Birsen yayınevi, İstanbul
- Huang J, Tu X, and He J. 2015. Design and Evaluation of the RUPERT Wearable Upper Extremity Exoskeleton Robot for Clinical and In-Home Therapies. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics: Systems*, DOI: 10.1109/TSMC.2015.2497205
- Huo W, Mohammed S, Moreno J C, and Amirat Y, 2016. Lower Limb Wearable Robots for Assistance and Rehabilitation: A State of the Art. *IEEE Systems Journal*, **10**: 3, 1068 – 1081.
- Hussain S, Xie S. Q, Jamwal, P. K. 2013. Control of a robotic orthosis for gait rehabilitation. *Robotics and Autonomous Systems*, **61**, 911–919.
- Jung, Y, Kang, D, Kim, J, 2010. Upper body motion tracking with inertial sensors. In *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, Tianjin, China, 14–18 December 2010, pp. 1746–1751.
- Kawamoto H, Lee S, Kanbe S, and Sankai Y, 2003. Power assist method for HAL-3 using EMG-based feedback controller, *Processing of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 1648–1653.
- Kawamoto H. and Sankai, Y, 2005. Power assist method based on phase sequence and muscle force condition for HAL. *Journal Advanced Robotics*, **19**: 7, 717–734.
- Lenzo B. 2013. Design of Novel Robotic Exoskeletons with Hybrid Actuation for Human. Scuola Superiore Sant'anna-Pisa: Innovative Technologies
- Lew E, Chavarriaga R, Silvoni S, and Millán JDR. 2012. Detection of self-paced reaching movement intention from EEG signals. *Frontiers in Neuroengineering*, **5**: 13, 1–17.
- Luengas YR, Lopez-Gutierrez JR, Salazar S and Lozano R, Robust controls for upper limb exoskeleton, real-time results, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part I: J Systems and Control Engineering*, 1–10, IMechE 2018, Reprints and permissions: sagepub.co.uk/journalsPermissions.nav, DOI: 10.1177/0959651818758866
- Luinge HJ, Veltink PH. 2005. Measuring orientation of human body segments using miniature gyroscopes and accelerometers. *Medical and Biological Engineering & Computing*. **43**, 273–282.
- Luinge HJ, Veltink PH., Baten CT, 2007. Ambulatory measurement of arm orientation. *Journal of Biomechanics*, **40**, 78–85.
- Marchal-Crespo L, and Reinkensmeyer DJ. 2009. Review of control strategies for robotic movement training after neurologic injury. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, **6**: 20, 1–15.
- Melchiorri C. 2015. Kinematic Model of Robot Manipulator Lecturer Notes, Bologna University, Department of the Electrical and Electronic Engineering.
- Mihelj M. 2006. Inverse kinematics of human arm based on multisensor data integration. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, **47**, 139–153
- Miezal M, Bleser G, Schmitz N, Stricker D. 2013. A generic approach to inertial tracking of arbitrary kinematic chains. In *Proceedings of the 8th International Conference on Body Area Networks*, Boston, MA, USA, 30 September– 2 October, 2013, pp. 189–192. 67.
- Miezal M, Taetz B, Bleser G, 2016. On Inertial Body Tracking in the Presence of Model Calibration Errors. *Sensors* **16**, 1132.

- Mohammed S, Amirat Y, and Rifai H, 2012. Lower-limb movement assistance through wearable robots: State of the art and challenges, *Advanced Robotics*, **26**: 1/2, 1–22.
- Picerno P, Cereatti A, Cappozzo, A, 2011. A spot check for assessing static orientation consistency of inertial and magnetic sensing units. *Gait Posture*, **33**, 373–378.
- Peppoloni L, Filippeschi A, Ruffaldi E, Avizzano CA, 2013. A novel 7 degrees of freedom model for upper limb kinematic reconstruction based on wearable sensors. *In Proceedings of the 2013 IEEE 11th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY)*, Subotica, Serbia, 26–28 September 2013, pp. 105–110.
- Peppoloni L, Filippeschi A, Ruffaldi E, Avizzano C. 2016. A novel wearable system for the online assessment of risk for biomechanical load in repetitive efforts. *International Journal of Industrial Ergonomics*, **52**, 1–11.
- Peppoloni L, Brizzi F, Avizzano CA, Ruffaldi, E. 2015. Immersive ROS-integrated framework for robot teleoperation. *In Proceedings of the 2015 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, Arles, France, 23–24 March 2015, pp. 177–178.
- Pons JL, 2010. Rehabilitation exoskeletal robotics, *IEEE Eng. Med. Biol. Mag.*, **29**: 3, pp. 57–63, May/Jun. 2010.
- Pons JL, *Wearable Robots: Biomechatronic Exoskeletons*. New York, NY, USA: Wiley, 2008.
- Roetenberg, D, Luinge HJ, Baten CT, Veltink PH. 2005. Compensation of magnetic disturbances improves inertial and magnetic sensing of human body segment orientation. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. **13**, 395–405
- Roetenberg D, Luinge, H, Slycke, P. 2009. Xsens MVN: Full 6 DOF Human Motion Tracking Using Miniature Inertial Sensors, Xsens Motion Technologies BV: Enschede, The Netherlands.
- Ruffaldi E, Peppoloni L, Filippeschi A, Avizzano C, 2014. A novel approach to motion tracking with wearable sensors based on Probabilistic Graphical Models. *In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Hong Kong, China, 31 May–7 June 2014, pp. 1247–1252.
- Sanchez R, Liu J, Rao S, Shah P, Smith R, Rahman T and Reinkensmeyer D. 2006. Automating Arm Movement Training Following Severe Stroke: Functional Exercises with Quantitative Feedback In A Gravity-Reduced Environment. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 378–389.
- Suzuki K, Mito G, Kawamoto H, Hasegawa Y, and Sankai, Y, 2007. Intention-based walking support for paraplegia patients with robot suit HAL. *Advanced Robotics*, **21**: 12, 1441–1469.
- Taunyazov T, Omarali, B, Shintemirov, A. 2016. A novel low-cost 4-DOF wireless human arm motion tracker. *In Proceedings of 6th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob)*, Singapore, 26–29 June 2016, pp. 157–162.
- Taetz B, Bleser, G, Miezal, M. 2016. Towards Self-Calibrating Inertial Body Motion Capture. *In Proceedings of the 19th International Conference on Information Fusion*, Heidelberg, Germany, 5–8 July 2016.
- Vignais N, Miezal M, Bleser G, Mura K, Gorecky D, Marin F, 2013. Innovative system for real-time ergonomic feedback in industrial manufacturing. *Appl. Ergon.* **44**, 566–574.
- Vukobratovic M. 2006. Humanoid robotics—Past, present state, future, *In Proc. 4th Serbian-Hungarian Joint Symp. Intell. Syst.*, pp. 13–31.
- Valiente A, 2005. Design of a Quasi-Passive Parallel Leg Exoskeleton to Augment Load Carrying for Walking, M.S. thesis, Dept. Mech. Eng., Massachusetts Inst. Technol., Cambridge, U.K., Aug. 2005.
- Veneman JF, Kruidhof R, Hekman EEG, Ekkelenkamp R, Van Asseldonk EHF, Van der Kooij H, 2007. Design and evaluation of the LOPES exoskeleton robot for interactive gait rehabilitation. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 15 379–386.
- Wang Y. and Makeig, S, 2009. Predicting Intended Movement Direction Using EEG from Human Posterior Parietal Cortex. In: Schmorow DD,

Estabrooke IV, Grootjen M. (eds) *Foundations of Augmented Cognition. Neuroergonomics and Operational Neuroscience*. FAC 2009. Lecture Notes in Computer Science, **5638**. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-02812-0_52

Yavuz A, Akdoğan E, Aktan ME, Koru A, 2019. Design, Produce and Control of A 2-Dof Upper Limb Exoskeletal Robot, *Journal of Thermal Engineering*, **5**(2), Special Issue 9, 119-130.

Zhang ZQ, Wong WC, Wu JK, 2011. Ubiquitous human upper-limb motion estimation using wearable sensors. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*. **15**, 513–521.

Uçuş Aşamalarının Bölümlendirilmesi: Havacılık Verilerinde Gözetimsiz Öğrenme Uygulaması

Oğuz BEKTAŞ

İstanbul Medeniyet Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul.

PhD: University of Warwick, MSc: Queen Mary University of London

e-posta: oguz.bektas@medeniyet.edu.tr ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-3687-3703

Geliş Tarihi: 04.03.2020

Kabul Tarihi: 02.12.2020

Öz

Anahtar kelimeler
Havacılık; Hava Araçları; Uçuş Verileri ve Rejimleri; Gözetimsiz Öğrenme; Özdüzenleyici Haritalar Yöntemi; Kümeleme

Hava araçları, işlevleri ve yapıları gereği, buldukları operasyon boyunca birden fazla değişken rejim içinde bulunmaktadır. Kalkış, iniş, tırmanış, düz uçuş, yatay düzlemde dönüş vb durumlarda hava aracından elde edilen veriler farklılık göstermekte ve sinyal değerleri içinde buldukları çevre ve uygulamalara göre değişmektedir. Bu makalede, aynı grupta bulunan uçuş veri kümelerinin diğer veri kümelerine göre daha ayırt edici olan karakteristik özelliklerine göre sınıflandırılması ve uçuş rejimlerinin bu kümeler amacıyla saptanması amaçlanmıştır. Bu amaçla, yapay sinir ağlarının gözetimsiz bir eğitim biçimini kullanan "Özdüzenleyici Haritalar" yöntemi kullanılmış ve bölümlendirme işlemi rekabetçi öğrenme ve haritalama sistemiyle tamamlanmıştır. Böylece, birden fazla boyutta bulunan farklı verilerin işaretlenerek, rejim bazında çalışılmasına olanak sağlanmıştır.

Segmentation of Flight Stages: An Unsupervised Learning Model for Aviation Data

Keywords
Aerospace; Aircrafts; Flight Data and Regimes; Unsupervised Learning; Self-Organizing Maps; Clustering

Abstract

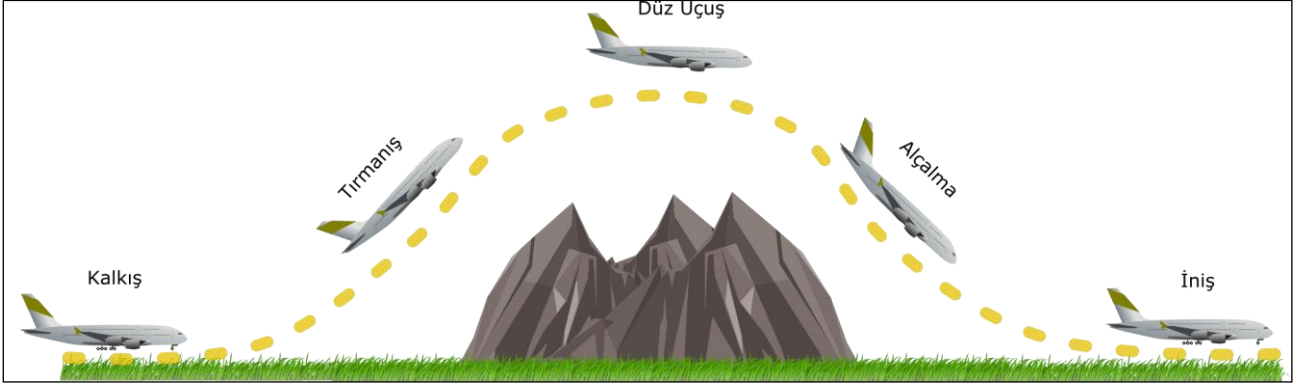
Due to their functions and characteristics, the aircrafts function in multiple variable regimes throughout their operations. In the cases of take-off, landing, climbing, cruise flight, rolling etc., the condition monitoring data from an aircraft differ and their values vary according to the environment and applications in which they are in. In this article, it is aimed to classify the flight data clusters in the same group as more distinctive than other clusters and to determine flight regimes for these data. For this purpose, the "Self-Organizing Maps" method, which uses a type of unsupervised neural network training, is used and the clustering is completed with a competitive learning and mapping system. Thus, it is possible to work on regime basis by marking different data in multiple regime dimensions.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

İçerdiği geniş kapsamlı aşamalar nedeniyle, uçuşu basit bir tanımla sınırlandırmak kolay değildir- hava taşıtları, taşıma kapasitelerine ve her nevi insanlı ya da insansız uçan çok geniş bir yelpazedeki araçların çeşitliliğine göre farklı uçuş rejimlerine sahip olabilmektedir. Genel olarak, kimi hava taşıtlarına ait verilerin toplanması ve işlenmesi göreceli olarak daha az önem teşkil etse de genişleyen ticari havacılık sektörünün ve yüksek güvenilirlik gerektiren yolcu uçaklarının ürettiği "durum izleme verileri" giderek artan bir öneme sahiptir.

"Nesnelerin İnterneti" ve "Büyük Veri Analitiği" ile ilgili uygulamalar arttıkça ve yeni güncellemeler geldikçe bu verilerin daha detaylı olarak uygulanabilme imkânı ortaya çıkmıştır (Bektaş 2020a). Her ne kadar, koruyucu bakım uygulamaları kompleks sistemlerden yüksek verim almak ve üretim kayıplarını en aza indirmek için, operasyon süresince ölçüm cihazları ile izleme olarak sonuçları analiz etse de; havacılık sistemlerinde bulunan farklı uçuş aşamalarının analiz edilmesi bu verilerin istenilen seviyede dönüştürülmesi, daha iyi anlaşılması ve ön işleme tabi tutulabilmesi için gereklidir.



Şekil 1. Uçuş operasyon aşamaları

Özellikle, küme analizi (veya yaygın bilinen ismi ile kümeleme) bu ön işlemenin başlıca aşamalarından biri olup sinyal işleme problemlerini çözmek için kullanılan dönüştürme işlemlerinden biridir. Farklı boyutlarda bulunan sinyal değerlerinin aynı sınıflandırmada yer alması için diğer grup elementlerinden farklı olarak herhangi bir şekilde birbirine paralel olup olmadıklarına karar verilebilir. Böylece, verilerin tek düzeye indirgenebilmeleri ve/veya istenilen düzeyde etiketlenilerek buldukları boyutta işlenebilmelerine olanak sağlanabilmektedir. Kümeleme yöntemleri, temelde bir sınıflandırmayı nelerin oluşturduğu ve bunların nasıl etkili bir şekilde tespit edileceği bakımından farklılık gösterir.

Havacılık sistemlerinde operasyon durumunun izlenmesinde başlıca sorun, verilerin çok boyutlu ve gürültülü olmalarından dolayı sahip oldukları karakteristikleridir. Veri analizi doğru bir şekilde ele alınsa bile, veri işleme birden fazla operasyonel rejim yapısının neden olacağı kısıtlamaların üstesinden gelebilecek etkili tekniklere dayanmalıdır. Ayrıca, bu verilerin anlamlı ve kullanışlı bilgilere dönüştürülmesine ihtiyaç vardır. Literatürde, Fourier Dönüşümü (Bracewell 1986, Ozaktas ve Kutay 2001, Lindon and Ferrige 1980), Dalgacık Dönüşümü (Aballe et al. 1999, Garguet-Duport et al. 1996, Koçyiğit ve Korürek 2010), Kalman filtresi (Chui and Chen 2017) gibi birçok veri işleme stratejisi olmuştur. Bunlar gibi sinyal işleme yaklaşımları çok çeşitli problemlerle başa çıkmak ve farklı olayları anlamak için vazgeçilmez bir rol oynarken, küme analizi her zaman önemli ve birincil

bir görev olmuştur. Kümeleme algoritmalarının temel amacı, büyük yapılandırılmış veya yapılandırılmamış veri kümelerini anlamlandırmak ve bunlardan daha kullanışlı olacak değerler çıkarmaktır. Büyük boyutlu yapılandırılmamış verilerle çalışıldığında, verileri analiz etmeye başlamadan önce istikrarlı bir tür gruplamaya ayırmaya çalışmak mantıklıdır. Kümeleme ve verileri sınıflandırma, toplu olarak kapsamlı bir bakış açısına sahip olmaya ve ardından yapılacak olan analize daha derinlemesine girmeden önce bazı mantıksal yapılar oluşturulmasına olanak tanır. Kümeleme yöntemleri, bir kümedeki iki veri noktasının birbirine benzeyeceği şekilde belirli sayıda grup veya kategoriye verileri tahsis ederken, farklı kümelere gelen veri noktalarını ayrı olarak sınıflar.

Havacılık sistemleri ve benzeri karmaşık sistemlerde, verilerin sınıflandırılması ve kümelmesi amacıyla Gauss karışım modeli (McLachlan and Peel 2004), en yakın komşu algoritması (Ramasso 2014), K-ortalama (Lam 2014), ve bulanık eseme c-ortalama (Sugeno 1993) gibi modeller kullanılmıştır. Kullanılan bu uygulamalardan gözetimli öğrenme algoritmaları farklı kümelere keskin bir sınıflandırma sağladığından ötürü; uçuş boyunca her bir rejimde bulunan verilerin centroidlerinin değişmesine karşı elverişsiz olabilmektedirler. Bu sorun k-ortalama gibi gözetimsiz modeller ile çözülebilsede, tam olarak bir öğrenme olmadığı için görece daha basit bu gözetimsiz modeller karmaşık verileri kümelemede kötü bir performans çıkarır. Bununla birlikte, günümüzde giderek kullanım alanları artan ve adını duyurmaya başlayan Big Data (Büyük Veri)

konusunun kümeleme ile birlikte ele alınması gerekmektedir. Her ne kadar bu olgu teknolojinin ilerlemesi ile önem kazanmış olarak görülse de yıllardır havacılık alanında durum izleme verilerinin elde edilmesi gelişimini tamamlamıştır. Fakat, bu boyutta veri içeriklerinin görece daha gelişmiş modellemeler ile analiz edilmesi gerekmektedir. Uçuş rejimlerinin karmaşıklığından (bknz. **Şekil 1**. Uçuş operasyon aşamaları) ve hedef tanımlamasının etkilemesinden kaçınmak için, verilerin sebep-sonuç biçiminde etiketlenmesinden farklı olarak birbirleri arasındaki ilişkiler genel olarak giriş verisi ile öğrenilebilir. Böylece, öğrenme için çıkış verisi sağlanmadan örneklerin birbirine olan uzaklıklarını, komşuluk ilişkilerini ve yoğunluklarını kullanarak sınıflandırma ile ilgili çıkarımlar yapılabilir (Bektaş 2020b). Tam bu noktada, özdüzenleyici haritalar yönteminin kullanılması, karmaşık uçuş rejimlerine sahip büyük verilerin yüksek performans ile kümelenebilmesi için bir avantaj sağlar. Burada modelin sunduğu bir diğer fayda ise; rejimlerin kolay bir biçimde ve iki boyutlu olacak şekilde görselleştirilmeleri; böylelikle bölümlenmek için kullanılmalarıdır. Ayrıca; özdüzenleyici haritalar diğer yöntemlere kıyasla hesaplama gereksinimlerini de azaltır.

Bu çalışma beş bölümden oluşmaktadır. İkinci bölüm, alan ve modelle ilgili geçmişte bulunan çalışmalar ve literatürü içermektedir. Sonrasındaki bölüm ise uygulama seti ve özdüzenleyici haritalar yöntemini incelemektedir. Dördüncü bölüm, test uygulaması ve ortaya çıkan sonuçları analiz etmektedir. Son bölümde ise çalışmanın çözümlemesi, kısıtları ve gelecekte olabilecek potansiyel çalışma önerileri yer almaktadır.

2. Metot ve Materyal

Özdüzenleyici haritalar yönteminde öğrenmenin temel amacı, ağ bölümlerinin belirli girdi örüntülerine karşı benzer şekilde karşılık vermesini sağlamaktır. Ağ bölümleri aynı girişleri kendilerinin dahili parametreleriyle karşılaştırır. Sonrasında, kazanan (winner) olarak da adlandırılan en iyi eşleşmeye sahip bölüm (best match) daha sonra bu girdiye göre ayarlanır. Bu tür gerçek bir rekabetçi

(gözetimsiz) öğrenme, birincil verilerin kümelenebilmesini ve nihayetinde hiyerarşik olarak düzenlenmiş bir şekilde tespit edilmelerini sağlar (Özçalıcı 2017).

Bu çalışmada sunulan öğrenme algoritması, "X" girişinin bir nöral ağ yapısındaki "M" nöronları kümesine eşlenmesini sağlayan doğrusal olmayan bir topoloji oluşturur ve aşağıda belirtilen şekilde formülize edilir (Kohonen 1990, Wittek 2013, Wittek et al. 2017).

$$X = \{x(t) \mid t \in \{t_0, \dots, t_f\}\} \quad (1)$$

$$M = \{n_1, \dots, n_k\} \quad (2)$$

Burada, sırasıyla t_0 ve t_f eğitimin başlangıç ve bitiş noktalarını temsil etmektedir. n_1, \dots, n_k nöronları, aşağıdaki ağırlık vektörleriyle bir ızgaraya yerleştirilir.

$$W = \{w_1(t), \dots, w_k(t)\} \quad (3)$$

Daha sonra, her bir veri noktası için "M" nöronları kümesindeki en iyi eşleşen "BM" birim hesaplanır.

$$BM(x(t)) = n_b \in M \quad (4)$$

Böylece, "d" veri kümesindeki mesafe fonksiyonu özellik alanında aşağıdaki gibi düzenlenir:

$$d(x(t), w_b(t)) \leq d(x(t), w_j(t)) \quad (5)$$

$$\forall w_j(t) \in W, \quad (6)$$

Daha sonra dizi, yeni $w_j(t+1)$ 'in eski $w_j(t)$ ve yeni $x(t)$ 'den yinelemeli olarak hesaplandığı düzgünleştirme tipi bir işlem olarak formüle edilir.

$$w_j(t+1) = w_j(t) + \alpha h_{b_j}(t) (x(t) - w_j(t)) \quad (7)$$

Burada " α ", düzeltme boyutunu tanımlayan skaler bir öğrenme faktörüdür; değer " t " endeksi ile azalır. " $h_{b_j}(t)$ " konumu koşullara bağlı olan komşuluk işlevidir. Bu işlev genellikle Gaussian olarak alınır (Wittek et al. 2017).

$$h_{b_j} = \exp\left(\frac{-\|r_b - r_j\|}{\delta(t)}\right) \quad (8)$$

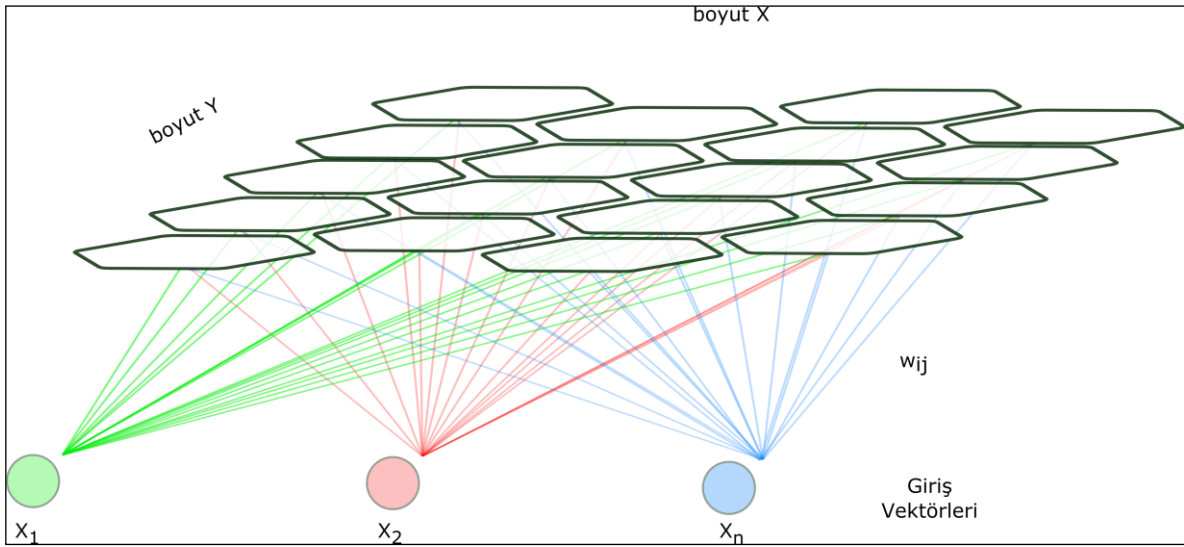
Burada " r_b " ve " r_j " düğümlerin koordinatlarıdır. " $\delta(t)$ " genişliği, etki alanını daraltmak için monoton

olarak azalır. Bundan sonra, ağırlık güncellemesinin toplu formülasyonu şu şekilde hesaplanır:

$$w_j(t_f) = \frac{\sum_{x'=t_0}^{t_f} h_{b_j}(t') x(t')}{\sum_{x'=t_0}^{t_f} h_{b_j}(t')} \quad (9)$$

Burada belirtilen özdüzenleyici haritalar yönteminin görseli **Şekil 2**'de grafik ile açıklanmıştır. Görseldeki metot, x_1, \dots, x_n , boyunca yayılan giriş veri uzayından iki boyutlu bir düğüm dizisine bir eşleme

tanımlar. Sinir ağlarında bulunan diğer eğitim algoritmalarının metodolojilerinden farklı olarak, özdüzenleyici haritalar yöntemi bir çıkış vektörü gerektirmez ve x_1, \dots, x_n 'yi herhangi bir dış denetim olmadan sınıflandırabilir. **Şekil 2** görselinden de anlaşılacağı üzere özdüzenleyici haritaların yapısı nispeten daha kolay anlaşılabilir grafiklere olanak sağlamaktadır. Fakat, yapılarının detaylı analizleri diğer yapay sinir ağlarına paralel şekilde oldukça zordur (Özçalıcı 2017).



Şekil 2. Özdüzenleyici Haritalar Yöntemi

3. Veri Seti ve Çalışmanın Vaka Analizi

Çalışmanın vaka analizi için kullanılan senaryo, operasyonel döngü geçmişleri boyunca izlenmiş set verileri yardımıyla yapılmaktadır. Bu amacı gerçekleştirmek için bir uçuştan diğerine farklı uçuş koşullarında çalışan bir uçak motor ünitesinin modellenmesinden alınan bilgi kullanılmaktadır (Saxena et al. 2008). Bu nedenle veri seti, çeşitli faktörlere bağlı olarak, miktar ve oran bakımından her uçuş aşaması için farklı olacaktır. Belirli bir uçuş sırasında değişen rejimler, yalnızca uçuş süresi ve uçuş koşullarına bağlı olarak doğrudan ölçülemeyeceği ve dolayısıyla her uçuş sırasında toplanan sensor verilerinden çıkarılan bilgilere dayanması gerekmektedir. Modellenen bu senaryoda, motor performansı üzerinde önemli bir

etkisi olan üç çalışma ayarı vardır. Bu ayarlar, 0-42 bin ft. arasında değişen rakım, 0-0.84 arası Mach sayısı ile 60 veya 100 değerinde throttle resolver açısı (TRA) olarak dahil edilmiştir (bknz **Çizelge 1.** Operasyon Set Verileri). Veriler ayrıca sensor gürültüsü ile kirletilmiştir. Çalışmada, bu veri setinden bir uçuş yörüngesi (trajectory) alınarak sunulan metot uygulanmıştır. Burada kullanılan yörünge, aynı uçak motorundan uzun bir zamanda toplanan verileri içeren ve normal çalışma koşullarından bir performans bozukluğuna kadar olan operasyonel süreleri, run-to-failure, ihtiva eden bir operasyonlar bütünüdür. Dolayısıyla, bu yörünge uçak motorunun kullanışlı operasyon süresince birçok uçuşundan alınmış enstantane (snapshot) verilerden oluşmaktadır. Bu özelliğinden ötürü, veri seti görece yoğundur. Enstantane veriler rastgele

seçildiği için rejimler arası geçişlerde bir sıra bulunmamakta ve bu da; yapılacak olan analizi daha da zorlayarak kullanılan model performansının daha iyi bir biçimde ölçülmesine olanak sağlamaktadır.

Çizelge 1. Operasyon Set Verileri

Operasyonel döngüde süre	Rakım (0-42 bin ft.)	Mach sayısı (0-0.84)	Throttle resolver açısı (TRA) (20-100)
0	42.0049	0.84	100
1	20.002	0.7002	100
2	42.0038	0.8409	100
3	42	0.84	100
4	25.0063	0.6207	60
5	34.9996	0.84	100
6	0.0019	0.0001	100
7	41.9981	0.84	100
8	42.0016	0.84	100
9	25.0019	0.6217	60
10	20.0016	0.7	100
11	34.9993	0.84	100
12	24.9986	0.62	60
13	20.0056	0.7008	100
14	25	0.62	60

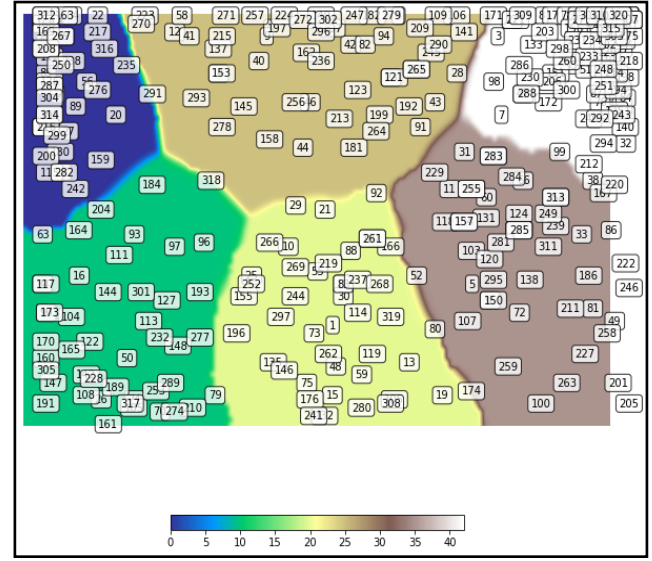
306	42.0038	0.84	100
307	42.0074	0.8412	100
308	20.0038	0.7015	100
309	42.0014	0.84	100
310	42.0044	0.8401	100
311	35.0045	0.8401	100
312	0.0001	0	100
313	35.0069	0.84	100
314	0.0019	0	100
315	42.005	0.8402	100
316	0.0014	0.0014	100
317	10.0046	0.25	100
318	10.0009	0.252	100
319	20.006	0.7002	100
320	42.0058	0.84	100

Her ne kadar Özdüzenleyici haritalar modellenmeden önce vaka analizinde altı farklı uçuş aşamasının verildiği bilirse de, modellenen sistem büyük bir harita boyutu ile (100x100 nöron bileşeni) nitelendirilmiştir. Çalışmada analizi gerçekleştirmek için Python 3 kullanılmış ve özdüzenleyici haritalar, Wittek et al. (2017) tarafından geliştirilen metot ile modellenmiştir.

4. Bulgular ve Analiz

Bu bölümde eğitilen algoritmanın kümeleme ve uçuş aşamalarını tanımlanmasıyla ortaya çıkan sonuçlar, çizelgeler ve grafikler ile açıklanacaktır. Eğitim süresi boyunca özdüzenleyici haritalarda verilen nöronlar birbirleriyle -bir bakıma- çekişme içinde bulunurlar. Bu çekişme sonrasında galip gelen

nöron ve çevresinde bulunan ağırlık vektörleri, verilen gözlemlere göre yenilenmektedir (Kohonen 2001).



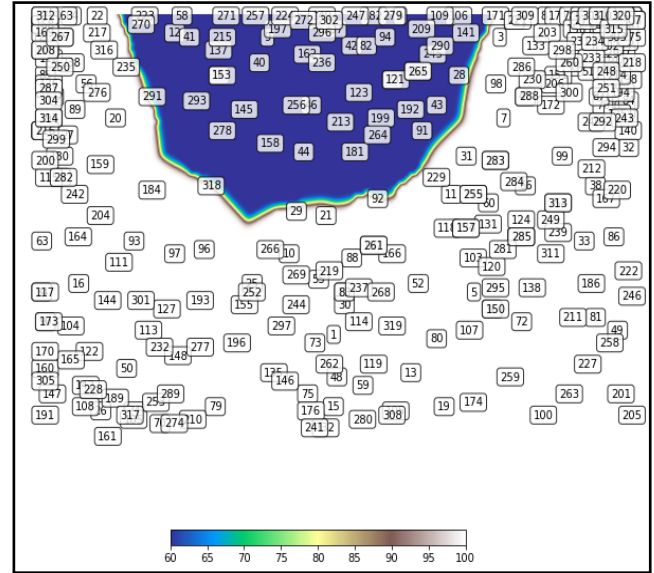
Şekil 3. Rakım (0-42 bin ft.) set verisine göre rejimlerin kümelenmesi

Bu eğitim sonucunda elde edilen verilerin benzer örüntüleri aynı rejim katmanı ve renginde konumlandırılmıştır (bknz Şekil 3-4-5'de bulunan çıktı katmanlarında farklı renkler ile gösterilen rejim kümeleri). Bu şekillerde bulunan rejim kümeleri, komşu özdüzenleyici harita ağırlıkları (matris U - Kohonen katmanı) ile her bir nöronda hangi aracın olduğunu gösteren başarı oranı tablosu ile temsil edilmektedir (Özçalıcı 2016). Bu rejim çıktı haritaları nöronların sahip olduğu izlenimleri ve birbirine olan uzaklıkları göstermektedir.

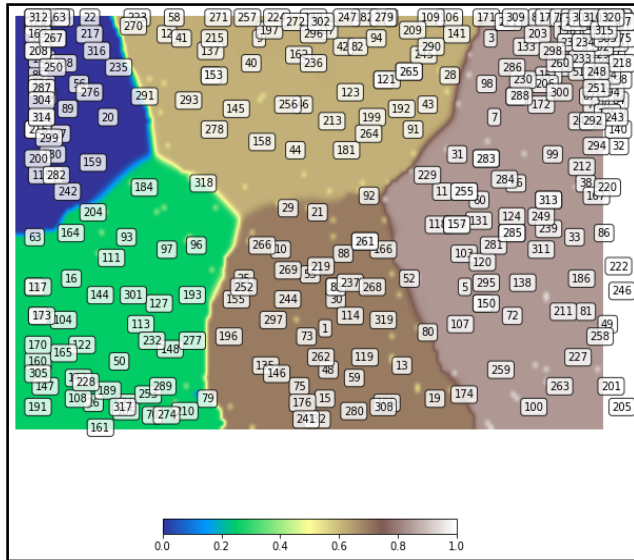
Bu şekillerde bulunan katmanlardaki renk değişimleri ve renkler arası geçiş, komşu rejimlerin birbirlerine olan farklılıkları gösterir. Şekillerde görüleceği üzere bulunan rejim kümeleri oldukça keskindir ve renk geçişleri sadece katman sınırları arasında çok kısıtlı olarak çıkmıştır. Bu durumdan ötürü, farklı renk kümeleri arasındaki sınırlar açık bir şekilde görülebilmektedir. Ayrıca, küme katmanları tek renk titreminde sınıflanmıştır ve bir ton farklılığı gözlemlenmemektedir. Bu ise, girdi olarak verilen motor performans verilerinin benzer merkezler

üzerinde birbirlerine benzer olduğunu belirtmektedir.

Şekil 3'de rakım set veri girdisi ile sınıflandırma yapılmıştır. Diğer iki operasyon set verisinin aksine altı farklı rejimin hepsi de kümelenmiştir. Koyu mavi düşük rakım verisini içermektedir ve bu nedenle yer anındaki (deniz seviyesi) aşamalarını temsil etmektedir. Deniz seviyesi çalışma alanı dışındaki bölgelerde bulunan veriler, rakım seviyesinden öngörüleceği üzere uçuşun farklı koşullarına işaret edecektir. Bu durumda, eğitilen algoritma doğal olarak farklı koşulları kümelemiştir. Örneğin, maksimum rakım seviyesi ~42 bin ft beyaz renk tabakası ile belirtilirken, değişkenlik belirten bölümler diğer renklerle gösterilmiştir.



Şekil 5. Throttle resolver açısı (TRA) (20-100) set verisine göre rejimlerin kümelenmesi



Şekil 4. Mach sayısı (0-0.84) set verisine göre rejimlerin kümelenmesi

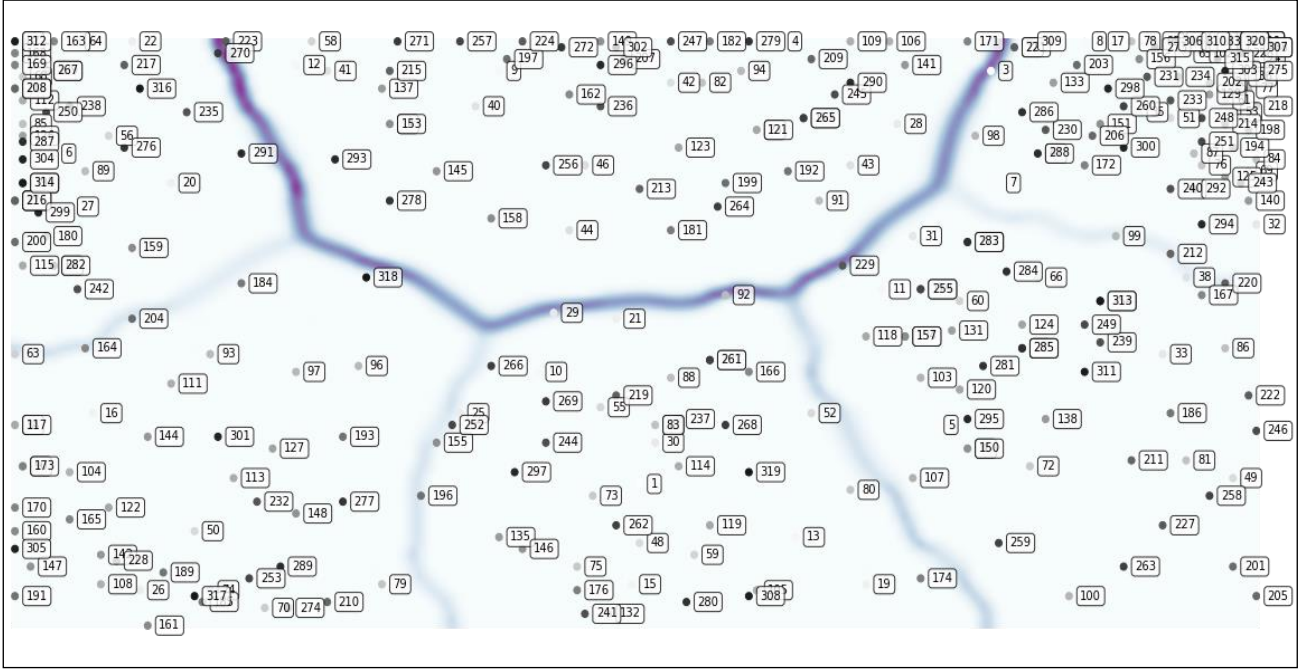
Rakım analizi sonucundaki görseller farklı rejim renkleriyle sunulduktan sonra, sıra Mach sayısı ile küme tabakalarının belirlenmesine gelmektedir. Rakımın ~35 ve ~42 bin ft olduğu bölümlerde Mach sayısı ~0.84 civarındadır ve aynı tabaka rengi ile gösterimi yapılmış ve bir önceki grafiğe göre beş farklı grupta yapılmıştır. Ayrıca, deniz seviyesi gruplamasında beklenildiği üzere hız seviyesi oldukça düşüktür ve ara rejimlerde rakıma bağlantılı olarak değişen Mach sayıları mevcuttur.

Analiz sonucunda ortaya çıkan önceki görseller kümelerin yerlerinin belirlenmesinde etkili olarak kullanılmasına rağmen; **Şekil 5'**de throttle resolver açısı verisi kısıtlı olarak sadece ikili bir grupta yapılmıştır.

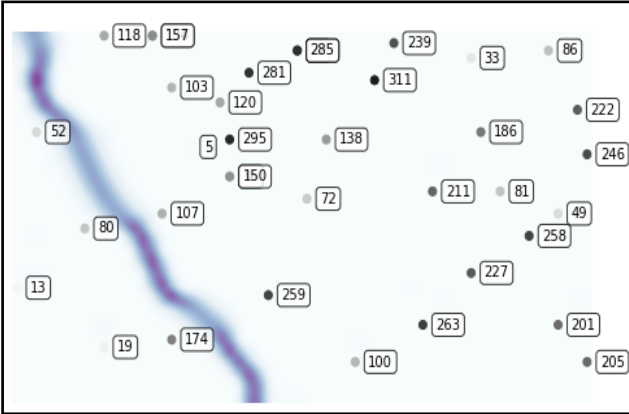
Çizelge 2. Altı uçuş rejimi: küme merkezleri ve yarıçapları

Rakım	Küme Merkezleri		Küme Yarıçapı
	Mach	TRA	
42	0.84	100	0.006
35	0.84	100	0.006
0	0	100	0.003
20	0.7	100	0.006
25	0.62	60	0.006
10	0.25	100	0.006

Küme tabakaları tanımlandıktan sonra, rejim sınıflandırmasına ilişkin tanımlayıcı istatistiklerin **Çizelge 2'**de incelenmektedir. Burada küme merkezleri ve verilerin bu merkezlere olan uzaklık seviyeleri (küme yarıçapı) verilmektedir. Her rejim sahip olduğu belirgin özelliklere göre önceki görsellerdeki tabakalara ayrıldıktan sonra, **Şekil 6'**da küme sınırları belirtilmiştir.



Şekil 6. Küme Sınırları



Şekil 7. Küme Sınırları yoğun gösterim

Komşu tabakalara olan uzaklık arttıkça sınırlarının koyuluğu artmıştır. Ayrıca, daha yoğun bir analiz için belirli bir alan (bknz **Şekil 7** sağ alt köşe) yakınlştırabilir ve verilerin birbirlerine olan uzaklıkları daha yakın olarak incelenebilir. Bu görselde U-Matrix ile her veri noktası için en iyi eşleşen birimler çizilmiştir.

Genel olarak, sunulan yöntem veri setinde belirtildiği üzere uçuş verilerinde altı farklı rejimi işaretleyerek istenilen sağlam sonuçları elde edebilmiştir. Veri seti, çalışmada kümele amacıyla

kullanılan operasyon set verilerinden (rakım, Mach sayısı ve throttle resolver açısı) başka sensor verilerini içermektedir. Çalışmamızda bulunan kümelemeye dayanarak bu sensor verilerinin içinde bulunduğu her bir rejim kendi içlerinde standart skorları alınıp normalize edildiğinde ve rejimler tekrar aynı zaman serisinde birleştirildiğinde anlamlı bir bütün teşkil etmektedir. Özellikle bu normalize işleminden sonra sensor verilerinin exponansiyel bir artış veya azalış göstermesi ve veri setinde bahsedildiği üzere normal çalışma koşullarından bir performans bozukluğuna kadar olan süreç ile (run-to-failure) paralellik göstermesi çalışmanın sonucunun doğruluğunu ispat etmekte ve modelin veri analizinde kullanışlı olduğunu göstermektedir.

5. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada özdüzenleyici haritalar yöntemi, farklı uçuş rejimlerini temsil eden uçuş verileri ile eğitilmiştir. Verilen parametrelerle uçuş altı farklı rejime bölünmüş ve bir renk spektrumu ile tabakalar gösterilmiştir. Çalışmada, ticari havacılık sektörünün gün geçtikçe artan çok rejimli büyük veri analizi

ihtiyacına, durum izleme verilerini başarılı bir şekilde kümeleyerek karşılık verilmiştir. Bundan ötürü, uygulama önemli bir potansiyele sahiptir. Fakat uçuş rejimleri genellikle bu makalede kullanılan vaka analizinden daha karmaşık bir yapıdadır ve bu durum gelecek projeler için önemli bir çalışma alanına işaret etmektedir.

6. Kaynaklar

- Aballe, A., Bethencourt, M., Botana, F., and Marcos, M. 1999. Using wavelets transform in the analysis of electrochemical noise data. *Electrochimica Acta*, **44(26)**, 4805-4816.
- Bektaş, O. 2020a. Kestirimci Bakım İçin Döner Mekanizma Bozulma Eğrisinin Tanımlanması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, **(19)**, 420-428.
DOI: 10.31590/ejosat.708257
- Bektaş, O. 2020b. Uçak İtki Takatinin Segmentasyonu. 8. *Ulusal Havacılık Ve Uzay Konferansı (UHUK'2020)*, Ankara, Turkey.
- Bracewell, R. N. 1986. *The Fourier transform and its applications*. New York: McGraw-Hill.
- Chui, C. K., and Chen, G. 2017. Kalman filtering. Springer International Publishing, 19-26.
- Garguet-Duport, B., Girel, J., Chassery, J. M., and Patou, G. 1996. The use of multiresolution analysis and wavelets transform for merging SPOT panchromatic and multispectral image data. *Photogrammetric Engineering and remote sensing*, **62(9)**, 1057-1066.
- Jack Lam, S. S. 2014. Enhanced trajectory based similarity prediction with uncertainty quantification. *Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society*, 623-634.
- Koçyiğit, Y., and Korürek, M. 2010. EMG işaretlerini dalgacık dönüşümü ve bulanık mantık sınıflayıcı kullanarak sınıflama. *İTÜDERGİSİ*, **4(3)**.
- Kohonen, T. 1990. The self-organizing map. *Proceedings of the IEEE*, **78(9)**: 1464-1480.
- Kohonen, T. 2001. Self-Organizing Maps. In *Springer Series in Information Sciences*, **30**, 501.
- Lindon, J. C., and Ferrige, A. G. 1980. Digitisation and data processing in Fourier transform NMR. *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy*, **14(1)**, 27-66.
- McLachlan, G., and Peel, D. 2004. *Finite mixture models*. John Wiley & Sons.
- Ozaktas, H., and Kutay, M. 2001. The fractional Fourier transform. *European Control Conference (ECC) IEEE*, 1477-1483.
- Özçalıcı, M. 2017. Özdüzenleyici Haritalar Yardımıyla Piyasa Bölümlendirmesi: Türkiye İkinci El Otomobil Piyasası Örneği. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, **12(2)**, 23-36.
- Özçalıcı, M. 2016. Hisse Senetlerinin Özdüzenleyici Haritalarla Kümelendirilmesi: BIST50 Endeksinde Yer Alan Hisseler Üzerine Bir Uygulama. *Istanbul University Journal of the School of Business*, **45(1)**, 22-33.
- Peter Wittek, S. C. 2017. Somoclu: An Efficient Parallel Library for Self-Organizing Maps. *Journal of Statistical Software*, **78(9)**, 1-21.
- Ramasso, E. 2014. Investigating computational geometry for failure prognostics. *International Journal of Prognostics and Health Management*, **5(1)**, 1-18.
- Saxena, A., Goebel, K., Simon, D., & Eklund, N. 2008. Damage propagation modeling for aircraft engine run-to-failure simulation. *International Conference on Prognostics and Health Management*. Denver: IEEE.
- Sugeno, M. 1993. Fuzzy hierarchical control of an unmanned helicopter. *Fifth IFSA World Congress*, Seoul, 179-182.
- Wittek, P., 2013. Somoclu: An efficient distributed library for self-organizing maps. *arXiv*, **1305.1422**, 1-7.

Witteck, P., Gao, S. C., Lim, I. S., & Zhao, L. 2017. Somoclu:
An Efficient Parallel Library for Self-Organizing Maps.
Journal of Statistical Software, **78(9)**, 1-21