



ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ
DERGİSİ

CUKUROVA UNIVERSITY
JOURNAL OF THE FACULTY OF ENGINEERING

Cilt/Vol: 37

Sayı/Issue: 1

Mart/March 2022

ISSN 2757-9255



ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ DERGİSİ
Cukurova University, Journal of the Faculty of
Engineering



Sahibi (Owner)

Ulus ÇEVİK
Ç.Ü. Mühendislik Fakültesi Dekanı

Editör (Editor)

Serin MEZARCIÖZ

EDİTÖR KURULU (Editorial Board)

Ramazan ÇOBAN (Çukurova Üniversitesi)

Mutlu AVCI (Çukurova Üniversitesi)

Mustafa GÖK (Çukurova Üniversitesi)

Ahmet DAĞ (Çukurova Üniversitesi)

Hüseyin AKILLI (Çukurova Üniversitesi)

Ulus ÇEVİK (Çukurova Üniversitesi)

Ali KOKANGÜL (Çukurova Üniversitesi)

Mesut BAŞIBÜYÜK (Çukurova Üniversitesi)

Mevlüt Sami AKÖZ (Çukurova Üniversitesi)

Oğuz DEMİRYÜREK (Erciyes Üniversitesi)

Hüsamettin BULUT (Harran Üniversitesi)

Metin GÜRÜ (Gazi Üniversitesi)

Mehmet Emin AYDIN (University of the
West of England, İngiltere)

Azra BİLGİN (University of Colorado Boulder,
ABD)

Ulvi Can ÜNLÜGENÇ (Çukurova Üniversitesi)

Özen KILIÇ (Çukurova Üniversitesi)

Serin MEZARCIÖZ (Çukurova Üniversitesi)

Zeynep ZAIMOĞLU (Çukurova Üniversitesi)

Ali KESKİN (Çukurova Üniversitesi)

R. Tuğrul OĞULATA (Çukurova Üniversitesi)

F. Duygu SABAN (Çukurova Üniversitesi)

Hüseyin VAPUR (Çukurova Üniversitesi)

Hüseyin R. YERLİ (Çukurova Üniversitesi)

Ergun ERÇELEBİ (Gaziantep Üniversitesi)

Nihan ÇETİN DEMİREL (Yıldız Teknik Üniversitesi)

Serter ATABAY (American University of Sharjah,
United Arab Emirates)

Muammer KOÇ (Hamad Bin Khalifa University,
Qatar)

Tamio ENDO (Mie University-Japonya)

Hakemli Bir Dergidir. Yılda Dört Sayı Basılır. / Refereed Journal. Published Quarterly.

Dergimiz **TÜBİTAK ULAKBİM** Mühendislik ve Temel Bilimler Veri Tabanı Listesi'nde taranmaktadır.
Indexed by **TÜBİTAK ULAKBİM** Mühendislik ve Temel Bilimler Veri Tabanı Listesi

Derginin eski adı: Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi
(ISSN: 1019-1011)

YAZIŞMA ADRESİ/CONTACT

Ç.Ü. Mühendislik Fakültesi Dergi ve Yayın Kurulu Başkanlığı Balcalı 01330 Sarıçam/ADANA
Tel : (322) 338 63 57 Fax : (322) 338 61 26 E-posta: mmfdergi@cu.edu.tr - cu.mmfdergi@gmail.com

AMAÇ ve KAPSAM

Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, yılda dört sayı olarak yayımlanan hakemli bilimsel bir dergidir. Mühendislik alanındaki gelişmeleri takip etmek, meslek kuruluşları ve bireylerin ulusal ve uluslararası gelişmelerine katkıda bulunmak ve bu alanlarda Türkçe bir kaynak oluşturmak amacıyla yayımlanmaktadır. Derginin yazım dili Türkçe/İngilizcedir. Daha önce başka bir yerde yayımlanmamış tüm özgün ve güncel bilimsel araştırma ve uygulamaları kapsayan makaleler kabul edilmektedir. Tüm mühendislik alanları ile ilgili teorik/deneysel ve uygulamaya yönelik çalışmalar Dergi'nin ilgi alanındadır. Çeviri ve derleme makaleler kabul edilmemektedir. **“Araştırma ve uygulama içeren makaleleri”** yayımlanmaktadır.

AIM and SCOPE

Journal of the Engineering Faculty of Cukurova University is a peer-reviewed scientific journal which is currently published quarterly. The journal is published to follow the developments in the field of engineering, to contribute to the national and international development of professional organizations and individuals, and to create a Turkish resource in these areas. The language of the journal is Turkish/English. All original and up to date scientific research and applications articles that have not been published elsewhere are accepted. Theoretical/experimental and practical studies related to all engineering fields are in the scope of the Journal. Translation and compilation articles are not accepted. The journal publishes **“articles of research and practice”**.

İÇİNDEKİLER/CONTENTS

Taş Mastik Asfalt Karışımlarda Mermer Tozu Kullanımının Dayanıma Etkisinin Araştırılması	1
<i>Investigation of the Effect of Using Marble Dust on Strength in Stone Mastic Asphalt Mixtures</i>	
Elif İZOL ve Ali SARIŞIK	
Çeşitli Örme Kumaşlarda Farklı Tekniklerle Gözenekliliğin Belirlenmesi ve Hava Geçirgenliği için Optimum Tekniğin Tespiti Üzerine Bir Çalışma	13
<i>A Study on Determining Porosity with Different Techniques and Revealing Optimum Technique for Air Permeability in Various Knitted Fabrics</i>	
Seval UYANIK ve Mehmet MERKEPÇİ	
Optimization of Water Distribution System within Tented Camps	23
<i>Çadır Kamplar İçerisinde Su Dağıtım Sisteminin Optimizasyonu</i>	
Abdullah ALHAMAD ve Ayşe Yeter GÜNAL	
Enhancement of Surface Area of Cordierite Structure by Oxalic Acid Treatment for SCR Applications	33
<i>SCR Uygulamaları için Oksalik Asit İşlemi ile Kordiyerit Yapının Yüzey Alanının İyileştirilmesi</i>	
Himmet ÖZARSLAN ve Ali KESKİN	
Exergy Analysis of a Double-Stage Organic Rankine Cycle Using Renewable Energy	43
<i>Yenilenebilir Enerji Kullanan İki Aşamalı Bir Organik Rankine Çevriminin Ekserji Analizi</i>	
Ahmet KAPLAN ve Arif ÖZBEK	
Yeraltı Kömür Maden Makinaları Operatörlerinin Gürültü ve Titreşim Maruziyetlerinin Araştırılması	55
<i>Investigation of Noise and Vibration Exposure of Underground Coal Mining Machinery Operators</i>	
İlknur EROL	
Seralarda Doğal Havalandırma Açıklıklarının Belirlenmesi	67
<i>Determination of Natural Ventilation Openings in Greenhouses</i>	
A. Nafi BAYTORUN ve Mahamed Abdalla MAKUUY ABASS	

İÇİNDEKİLER/CONTENTS

- Poliüretan ile Güçlendirilmiş Balastın Hareket Eden Tekerlek Yükü Altındaki Deformasyon Davranışının Nümerik Olarak İncelenmesi 79**
Numerical Investigation of Deformation Behavior of Ballast Reinforced with Polyurethane Under a Moving Wheel Load
Halil İbrahim FEDAKAR
- Flow Characteristics and Heat Transfer Enhancement of Sinusoidal Corrugated Channels with Different Configurations 93**
Sinüs Şeklinde Oluklu Kanalların Farklı Konfigürasyonlardaki Akış Karakteristiği ve Isı Transfer İyileştirmesi
Veli ÖZBOLAT ve Beşir ŞAHİN
- Examination of the Physical Properties of Saturated and Dry Marbles via P-S Wave Velocity 109**
P-S Dalga Hızı ile Doygun ve Kuru Mermerlerin Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi
Eshaq Ali MOHAMMADI ve Özen KILIÇ
- A Content-Based Product Recommendation Approach 119**
Bir İçerik-Tabanlı Ürün Öneri Yaklaşımı
Yıldan BİTİRİM
- Comparative Safety Analyses of Slope-Shallow Foundation Interaction under Static and Dynamic Loading Conditions 129**
Statik ve Dinamik Yükleme Koşulları Altında Şev-Yüzeysel Temel Etkileşiminin Karşılaştırmalı Güvenlik Analizi
Zülal AKBAY ARAMA, İlknur DALYAN ve Muhammed Selahaddin AKIN
- Yünlü ve Pamuklu Kumaşların Yer Fıstığı Tohum Kabuğuyla Boyanması ve Renk Haslıklarının İncelenmesi 143**
Dyeing of Wool and Cotton Fabrics with Peanut Seed Shell and Investigation of Color Fastness
Halil ÖZDEMİR
- İnce Numara Kompakt İpliklerin Katlama-Bükümünde Hamel Büküm (Elasto-Twist) Teknolojisinin Kullanımı ve İplik Özellikleri 159**
Use of Hamel Twist (Elasto-Twist) Technology in Doubling-Twisting of Fine Number Compact Yarns and Yarn Properties
Mehmet ŞAHİN ve Osman BABAARSLAN

İÇİNDEKİLER/CONTENTS

- Wind Farm and Installed Wind Power Analyses of Turkey 171**
Türkiye'deki Rüzgâr Santrallerinin ve Kurulu Rüzgâr Gücünün Analizleri
Akın İLHAN, Mehmet BİLGİLİ ve Beşir ŞAHİN
- Farklı Atkı Sıklıklarına Sahip Denim Kumaşların Aşınma Sonucunda Değişen Optik Özelliklerinin İncelenmesi 187**
Investigation of Changed Optical Properties of Denim Fabrics Caused by Abrasion
Sabiha SEZGİN BOZOK ve R. Tuğrul OĞULATA
- Piezoelektrik Levha Viskoz Akışkan ve Rijit Duvardan Oluşan Sistemin Zorlanmış Titreşimine Akışkan Özelliklerinin Etkisi 197**
Effect of Fluid Properties on Forced Vibration of the System Consisting of Piezoelectric Plate, Viscous Fluid and Rigid Wall
Zeynep EKİCİOĞLU KÜZECİ
- Elektrikli Araçların Kablosuz Güç Transferi Sistemi için Dairesel Bobinli Bir Transformatörün Tasarımı ve Veriminin Analizi..... 209**
Design and Efficiency Analysis of a Circular Coil Transformer for Wireless Power Transfer System of Electric Vehicles
Yıldırım ÖZÜPAK
- Assessment of Biogas and Syngas Potentials of Cotton Stalks in Turkey 221**
Türkiye'de Pamuk Saplarının Biyogaz ve Sentez Gazı Potansiyelinin Değerlendirilmesi
Nazife Işık HAYKIR
- Bir Konfeksiyon İşletmesinde Seçilmiş Ergonomik Risklerin İş Sağlığı ve Güvenliği Kapsamında Analizi ve Risk Değerlendirmesi 237**
Analysis and Risk Assessment of Selected Ergonomic Risks in the Apparel Industry in the Context of Occupational Health and Safety
Serkan GÜLERER ve Emel Ceyhan SABİR
- Yüzeysel Su Kaynağından İçme Suyu Eldesinde Alkali Koagülasyon Metodunun Uygulanması ve Kalsiyum Sertliğinden İleri Gelen Kireç Taşı Oluşumu..... 249**
Application of Alkaline Coagulation Method in Obtaining Drinking Water from Surface Water Source and Limestone Formation Caused by Calcium Hardness
Hasan Kıvanç YEŞİLTAŞ ve Turan YILMAZ

İÇİNDEKİLER/CONTENTS

- Fast Computation of Parameters of the Random Variable that is Logarithm of Sum of Two Independent Log-normally Distributed Random Variables..... 261**
İki Bağımsız Log-Normal Dağıtılmış Rastgele Değişkenin Toplamının Logaritması Olan Rastgele Değişkenin Parametrelerinin Hızlı Hesaplanması
Zekeriya TÜFEKÇİ ve Gökay DİŞKEN
- 2007 ve 2018 Yılları Türkiye Deprem Yönetmeliklerine Göre Zemin Parametreleri ve Deprem Verilerinin Karşılaştırılması; Siirt İli Vaka Çalışması..... 271**
Comparison of Ground Parameters And Earthquake Data According To Turkish Earthquake Codes of 2007 and 2018; A Case Study, The City of Siirt
Mehmet Hayrullah AKYILDIZ ve Ersin AYHAN
- Fonksiyonel Derecelenmiş Malzeme ve Değişken Kesitli Silindirik Olmayan Helisel Çubukların Titreşimi 283**
Vibration Analysis of Non-Cylindrical Helical Rods with Functionally Graded Materials and Variable Cross-sectional Area
Yavuz Çetin CUMA ve Faruk Fırat ÇALIM
- Türkiye'nin Güneş Enerjisi Potansiyeli ve İskenderun için Örnek Üretim Projeksiyonu 293**
Turkey's Solar Energy Potential and Sample Production Projection for Iskenderun
Levent Cenk KUMRUOĞLU ve Salih Berkan ATEŞ

Taş Mastik Asfalt Karışımlarda Mermer Tozu Kullanımının Dayanma Etkisinin Araştırılması

Elif İZOL*¹ ORCID 0000-0003-2826-6970

Ali SARIŞIK² ORCID 0000-0001-7698-6134

¹Harran Üniversitesi, İnşaat Teknolojisi Programı, Şanlıurfa

²Harran Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa

Geliş tarihi: 09.06.2021

Kabul tarihi: 21.03.2022

Atıf şekli/ How to cite: SARIŞIK, A., İZOL, E., (2022). Taş Mastik Asfalt Karışımlarda Mermer Tozu Kullanımının Dayanma Etkisinin Araştırılması. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37(1), 1-11.

Öz

Doğal kaynaklarda meydana gelen hızlı tüketim gelecek kaygısına neden olmaktadır. Bu nedenle ortaya çıkan atık malzemelerin değerlendirilmesi önemli hale gelmektedir. Bu çalışmada, üstün performanslı asfalt kaplama olan Taş Mastik Asfalt (TMA) karışımına, mineral filler olarak atık mermer tozu eklenerek, Marshall tasarım prosedürü ile oluşturulan karışımların performansına ilişkin bir karşılaştırma yapılmıştır. Bunun yanı sıra alternatif filler malzemesi olarak, kalker ve atık halde ortaya çıkan mermer tozu kullanılmıştır. Asfalt karışımlarda sıklıkla kullanılan bazalt malzemesi, kaba-ince agrega ve kontrol filler olarak kullanılmıştır. Agregaların kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi için gradasyon eğrisine uygun olacak şekilde, belirli oranlarda bitüm kullanılarak Marshall stabilite deneyi yapılmıştır. Her bitüm yüzdesine sahip 3 numune olmak üzere, toplam 45 numune dökümü yapılmıştır. Optimum bitüm yüzdesinin belirlenmesinin ardından bazalt, kalker ve mermer filler malzemenin kullanıldığı numuneler, Karayolları Teknik Şartnamesine göre değerlendirilmiştir. Diğer malzemelerle benzer sonuçların elde edilmesi ile mermer tozunun taş mastik asfaltlarda alternatif filler malzemesi olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Taş mastik asfalt, Marshall stabilite, Mineral filler, Mermer tozu, Aşınma tabakası

Investigation of the Effect of Using Marble Dust on Strength in Stone Mastic Asphalt Mixtures

Abstract

Rapid consumption of natural resources causes future anxiety. For this reason, the evaluation of the resulting waste materials becomes important. In this study, a comparison was made regarding the

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Elif İZOL, elifizol@harran.edu.tr

performance of the mixtures formed by Marshall design procedure by adding waste marble dust as mineral filler to the Stone Mastic Asphalt (SMA) mixture, which is a high-performance asphalt coating. In addition, limestone and waste marble dust were used as alternative filler materials. Basalt material, which is frequently used in asphalt mixtures, was used as coarse-fine aggregate and control filler. In order to determine the chemical, physical and mechanical properties of the aggregates, the Marshall stability test was carried out using certain proportions of bitumen in accordance with the gradation curve. A total of 45 samples were cast, 3 samples with each bitumen percentage. After determining the optimum bitumen percentage, the samples using basalt, limestone and marble filler materials were evaluated according to the Highway Technical Specifications. It has been concluded that marble dust can be used as an alternative filler material in stone mastic asphalts with similar results with other materials.

Keywords: Stone mastic asphalt, Marshall stability, Mineral filler, Marble dust, Wear layer

1. GİRİŞ

Son zamanlarda çevrenin korunmasına ilişkin sorunlar ve bu sorunlara karşı çözümler, toplumlarda büyük önem kazanmıştır. Bu konu ile ilgili endişelerin artmasıyla ülkeler, geri dönüşüm ve kaynakların korunması için oldukça kapsamlı çalışmalar başlatmıştır. Birçok yetkili ve bilim araştırmacısı, atıkların çevresel ve ekonomik olarak sürdürülebilir bir şekilde yeniden kullanılmasına ayrıcalık tanımaya başlamışlardır. Bu çalışmalardan biri de atıkların değerlendirilmesi ile alakalıdır [1,2].

İnşaat mühendisliği uygulamalarında, endüstriyel atıkların geri dönüşümü hakkında yapılan çalışmalar, önemli bir gelişme göstererek devam etmektedir. Buna benzer şekilde atıkların yeniden kullanılması, kalıntıların yapı malzemeleri üzerine etkisinin araştırılması ve bunun çevreye olan etkilerinin araştırılması da uzun yıllardan beri incelenmektedir [3]. Türkiye’de mermer üretimi yıllık 7 milyon ton’dur. Ayrıca Türkiye’nin mermer rezervleri, dünya rezervlerinin %40’ını oluşturmaktadır [4,5]. Mermer atıkları, mermer ocaklarında mermer üretimi, blok alınması ve yapılan diğer işlemler sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu atıklar, parça mermer atıkları ile daha küçük boyutlara sahip olan, özellikle kesim sonucu açığa çıkan toz mermer atıklarıdır. Bu tür atıklar hem görüntü hem de çevre kirliliğine neden olmaktadır,

bu nedenle inşaat sektöründe kullanılarak değerlendirilmesi çevresel açıdan da yarar sağlayacaktır.

Yapılan araştırmalar çeşitli boyutlardaki mermer atıklarının, bitümlü sıcak karışımlarda (BSK) kullanılabileceğini göstermiştir. Asfalt karışımlar için alternatif malzeme olarak çeşitli atıkların değerlendirildiği, hatta bitümün atıklarla modifiye edilebileceğine dair birçok çalışma mevcuttur [1]. Ahmadinia ve arkadaşları [6], polimer modifiye bitümün maliyetli olması sebebiyle buna alternatif olarak, atık polimer kullanımını değerlendirmişlerdir. Bu kapsamda atık plastik şişelerin (Poliyeten Tereftalat (PET)), taş mastik asfalt karışımlara etkisini çeşitli deneylerle incelemişlerdir. Sonuç olarak PET ilavesinin, hem taş mastik asfalt karışımların özellikleri üzerinde olumlu etkiye sahip olduğunu hem de ekonomik olduğunu göstermişlerdir. Gürü ve arkadaşları [7], tüketim sonrası meşrubat şişelerinden oluşan, polietilen tereftalat (PET) atıklarını, yol kaplama malzemesi olarak değerlendirmişlerdir. Bu amaç kapsamında, ince sıvı polioliol pet (TLPP) ve viskoz polioliol PET (VPP) katkılarını PET şişelerden kimyasal olarak türeterek, asfalt ağırlığının belirli oranlarında kullanmışlardır. Modifiye asfaltın düşük sıcaklıkta çatlama direncini iyileştirdiği, soyulma direncini arttırdığı ancak tekerlek izi direncini azalttığı sonucuna varmışlardır. Keskin ve Karacasu [8], yapmış oldukları çalışmada atık bor içeren

asfalt betonlarının performansını değerlendirmişlerdir. Çalışma kapsamında atık halde bulunan bor mineralini, ince ve filler malzeme yerine, öğütülmüş Atık Bor (ÖAB), Etibor-48 (Boraks Pentahidrat) (BP) ve Etibor-68'i (Susuz Boraks) (SB) ise değişik oranlarda kullanılmıştır. ÖAB katkı içeren numunelerin aşınma ve binder tabakaları için gerekli koşulları sağladığı ve kullanılabilir olduğu sonucuna varmışlardır. Karacasu ve Bilgiç [9], atık değerlendirmesi yaparak, çevresel açıdan katkı sağlayacak bir çalışma yapmayı amaçlamışlardır. Bu çalışma kapsamında araç lastiği parçacıkları, sert plastik parçaları ve lastik tozu atıkları kullanmışlardır. Yapılan tekrarlı yükler altında oluşan deformasyon sonuçlarına bakılarak, %2 oranında lastik tozu ile sert plastik parçacıkları ilave edilmiş olan asfalt betonlarında, deformasyon açısından oldukça olumlu sonuçlar elde edildiğini dile getirmişlerdir. Yıldırım ve arkadaşları [10], yapmış oldukları çalışmada, bitümü, atık lastik ve cam lif ile modifiye ederek asfalt betonunun performansı üzerine etkilerini incelemişlerdir. Cam lifinin, asfalt dayanımı arttırdığını ve atık lastik kullanılarak oluşturulan numunelerden daha dayanıklı olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, cam lifi katkısının asfalt betonlar için daha ekonomik olacağını dile getirmişlerdir. Moghaddam ve arkadaşları [11], atık plastik şişeler içeren taş mastik asfalt karışımların, dinamik özelliklerini incelemişlerdir. Deneysel çalışma sonucunda karışımın sertlik modülünün, daha düşük PET içeriği miktarında arttığını görmüşler. Ayrıca PET takviyeli karışımlar, PET içermeyen karışımlara kıyasla önemli ölçüde daha yüksek yorulma ömürleri sergilemiştir. Karakuş [12], Diyarbakır'daki bazalt işleme tesislerinden alınan ince ve kaba bazalt atığının öncelikle bazı mekanik ve yapısal özelliklerini belirlemiştir. Daha sonra bu atık malzemeleri kullanarak, Türkiye Karayolları Teknik Şartnamesine göre bir TMA tasarlamış; Marshall stabilite ve akma testlerini, tasarlanan TMA numuneleri üzerinde gerçekleştirmiştir. Test sonuçlarına göre, üretilen

bazalt atığının ve TMA'nın özelliklerinin, belirtilen sınırlar içinde olduğunu ve bu atık malzemelerin TMA' da agrega ve mineral dolgu olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

Bu çalışma ile atık mermer tozunun inşaat sektöründe, özellikle asfalt kaplamalarda, mineral filler olarak kullanılabilirliği ve atıkların değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Materyal

Türkiye'de devamlı olarak nüfusun artmasıyla tüketimde de artışlar meydana gelmiş ve sınırlı bulunan hammaddeler hızlı bir şekilde azalmaya başlamıştır. Bunun sonucunda ise, mevcut bulunan kaynakların daha ekonomik biçimde kullanılması oldukça önem kazanmıştır. En küçük boyuta sahip mermer atıkları olan mermer tozunun, büyük bir miktarı 300 mikronun altındaki boyutlara sahiptir. Ülkemizde 1 m³ boyuta sahip olan blokların işlenmesiyle açığa çıkan toz miktarı, blok ağırlıklarının yaklaşık olarak %80'i olmaktadır. Oluşan bu atıklar çamur yığınlarıyla beraber doğaya zarar vermekte ve kontrolsüz olarak dökülmektedir [13].

Yapılan araştırmalar sonucunda Afyon'da bulunan işletmelerde mermer plakalarının ve bloklarının parlatılması ve kesilmesiyle yılda en az 125.000 ton ile 150.000 ton mermer tozu açığa çıktığı görülmüştür. Açığa çıkan bu mermer tozlarının büyük bir kısmı çevre kirliliğine sebebiyet vermektedir. Bu nedenle atıkların alternatif olarak kullanım alanları bulunmalı ve değerlendirilmelidir [13]. Türkiye'deki mermer yataklarının harita üzerinde gösterimi Şekil 1'de, işletilebilir mermer rezervleri ise Çizelge 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Türkiye’de mermer yataklarının haritada gösterimi [14]

Çizelge 1. Türkiye’nin işletilebilir mermer rezervleri [15]

İl	İşletilebilir rezerv (Bin m ³)
Balıkesir	1.300.000
Bursa	135.000
Kırklareli	33.500
Afyon	135.000
Aydın	9.000
İzmir	1.500
Muğla	181.000
Kütahya	200.000
Uşak	500.000
Ankara	2.000
Eskişehir	960.000
Kırşehir	165.000
Niğde	250.000

Bu çalışmada agrega ve bitüm ana malzeme, filler agregası ise değişken malzeme olarak belirlenmiştir. Üç farklı tipte kullanılan filler agregalarından biri mermer tozu olup, Diyarbakır ilinde bulunan DİMER (Diyarbakır Mermer A.Ş.) mermer fabrikalarında açığa çıkan atıklardan temin edilmiştir. Diğer filler agregalar ise yine Diyarbakır ilinden temin edilen kalker ve bazalttır. Kaba ve ince agrega olarak da bazalt malzemesi kullanılmıştır.

Çalışmada kullanılan B-50/70 penetrasyona sahip bitüm, Batman rafinerisinde üretilmiştir. Taş mastik asfalta özgül malzeme olan selülozik elyaf ise Teknomet Mühendislik’ten temin edilmiştir.

Çizelge 2. TMA aşınma tabakası Tip-1 A sınır değerleri [16]

Elek çapı (mm)	Alt limit (%Geçen)	Üst limit (%Geçen)
19,00	100	100
12,50	90	100
9,50	50	75
4,75	25	40
2,00	20	30
0,425	12	22
0,180	9	17
0,075	8	12

Karayolları Teknik Şartnamesine uygun olarak hazırlanan, Çizelge 2’de görülen, TMA Tip-1 A aşınma için önerilen sınır değerler kullanılarak gradasyon oluşturulmuştur. Deneyde kullanılan malzemelerin içeriklerini belirlemek amacıyla civalı porozimetre ve XRF analizleri yapılmış ve bu özellikler sırasıyla Çizelge 3 ve Çizelge 4’te belirtilmiştir. Yoğunluğu en düşük olan malzemenin mermer olduğu görülmektedir. Bunun

nedeni, mermerin safsızlık (temizlik) özelliğidir. Kalkerin yoğunluğu ise mermerin yoğunluğundan fazladır. Bunun nedeni ise kalkerin oksitli bileşen içermesidir. Yoğunluk olarak bazaltın diğer iki malzemeyi geride bırakmasının nedeni ise, bazaltın barındırdığı bileşenlerin, diğer iki malzemenin bileşenlerinden daha ağır olmasıdır.

Çizelge 3. Civalı porozimetre analizi sonuçları

Malzeme	Ortalama gözenek çapı (µm)	Görünür yoğunluk (g/cm ³)	Porozite (%)
Mermer	1,95	2,5131	3,24
Kalker	0,29	2,6740	6,22
Bazalt	0,28	2,9090	5,38

Çizelge 4. XRF analiz sonuçları (%)

Bileşen	Bazalt %	Kalker %	Mermer tozu %
SiO ₂	45,36	0,44	0,12
Al ₂ O ₃	17,46	0,24	0,02
CaO	10,74	55,42	43,28
Na ₂ O	4,19	-	0,04
MgO	4,18	0,15	10,65
TiO ₂	2,65	-	-
K ₂ O	1,92	0,01	0,002
P ₂ O ₅	0,55	0,04	0,006
SO ₃	0,05	0,01	0,13
SrO	-	0,02	-
Cl	0,01	-	-
Fe ₂ O ₃	0,17	-	-
Kız. Kaybı	0,15	43,45	45,62

2.2. Metot

Çalışma kapsamında agrega özelliklerini belirlemek amacıyla; elek analizi, kaba-ince ve filler malzemelerinin özgül ağırlık tespiti, kaba-ince agregalarda su emme oranının tespiti, Los Angeles aşınma, yassılık indeksi, soyulma mukavemeti ve metilen mavisi deneyleri uygulanmıştır. Bitüm özelliklerini belirlemek amacıyla; penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite, parlama noktası, dönmeli ince film etüvü

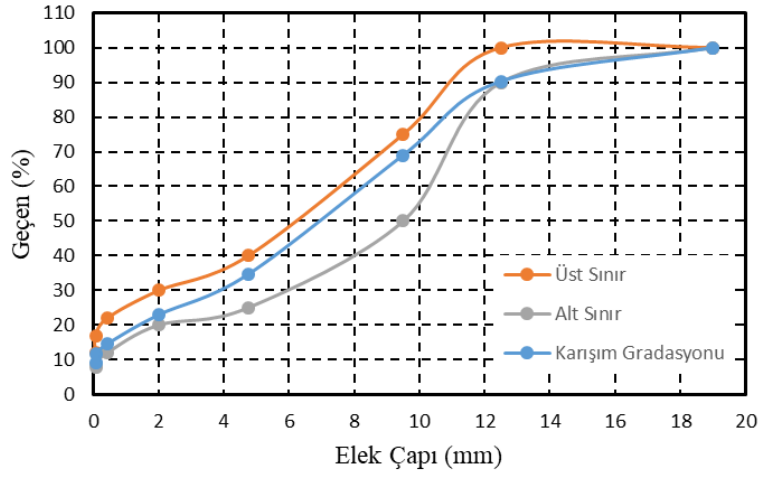
(RTFOT = Rolling Thin Film Oven Test), bitüm özgül ağırlık deneyleri uygulanmıştır. Bu deneylerden elde edilen veriler ve sonuçlar ışığında optimum bitüm oranını belirlemek amacıyla, atık mermer tozundan elde edilen agregalar ve kontrol grubu agregalar kullanılarak Marshall numuneleri hazırlanmıştır.

Belirlenmiş olan agrega gradasyonları sonucu toplam 1150 g ağırlığında agrega ile bitüm oranları; %5,5, %6, %6,5, %7, %7,5 olacak şekilde her bir bitüm oranına sahip üç adet numune hazırlanmıştır. Toplamda 45 adet numune, 145 °C karışım sıcaklığıyla oluşturulmuştur. Oluşturulan bu numunelerin ise her birine karışım ağırlığının %0,3'ü oranında elyaf ilave edilmiştir. Ayrıca bunun yanında bitüm miktarının %4'ü oranında da modifiye katkı olarak SBS (Stiren-Bütadien-Stiren) kullanılmıştır. Hazırlanmış olan karışımlar kalıplara dökülerek her iki yüze 50 vuruş yapılmıştır. Dizayn sonucu optimum bitüm miktarları belirlenmiştir. Bunun yanı sıra TMA karışımlar için uygulanan Schellenberger bitüm süzülme deneyi yapılmıştır. Bu deneyde amaç, bitüm ve bitüm harcının mineral agregadan ne miktarda süzülüğünü belirlemektir. Deney sonucunda karışımın ağırlığı tartılıp elde edilen ağırlık kaybı, yüzde cinsinden elde edilmiştir. Sıkıştırılmış olan bitümlü karışımların, nemden veya sudan kaynaklanan bozulmalara karşı direncini ölçmek amacıyla da indirekt çekme mukavemeti deneyi yapılmıştır.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

3.1. Agrega Deney Sonuçları

Bu bölümde yol agregalarına uygulanması gereken standart agrega deneyleri ele alınmıştır. Çalışmada kullanılan agregalar için, özgül ağırlık ve su emme oranları Çizelge 6'da sunulmuştur. Ayrıca bu agregalara ait olan gradasyon eğrisi Şekil 2'de ve gradasyon değerleri Çizelge 5'te verilmiştir. Yapılan elek analizi sonucunda agrega gradasyonunun, Karayolları Teknik Şartnamesi'nde verilen TMA Tip-1 aşınma tabakası için önerilen sınır eğrileri arasında kaldığı görülmüştür.



Şekil 2. Karışım gradasyon eğrisi

Çizelge 5. Karışım gradasyonu

Eleğ çapı (mm)	Karışım gradasyonu (%)	Üst sınır	Alt sınır
19	100	100	100
12,50	90,3	100	90
9,50	69	75	50
4,75	34,6	40	25
2,00	22,9	30	20
0,425	14,5	22	12
0,075	11,6	17	9
0,075	9,3	12	8

Çizelge 6. Özgül ağırlık ve su emme deney sonuçları

Özellikler	Agrega tipi				
	Kaba agrega (Bazalt)	İnce agrega (Bazalt)	Filler		
			Bazalt	Kalker	Mermer tozu
Hacim özgül ağırlık	2,79	2,722			
Zahiri özgül ağırlık	2,92	2,946	2,945	2,731	2,853
Su emme (%)	1,6	2			

Agregalara uygulanan diğer deneyler Çizelge 7'de sunulmuştur. Agregalar, yol kaplamaları yapıldığında sıkıştırılmaya maruz kalmaktadırlar. Bunun yanı sıra trafik yüklerinin de etkisiyle aşınma ve kırılmalara karşı dirençli olması gerekmektedir. Yapılan Los Angeles deneyinde, agregaların dirençli olduğu saptanmıştır. Ayrıca agreganın yassı olması, küresel ya da kare şekilli agregalara göre karışıma uygunluk açısından yeterli olmamaktadır. Bu nedenle çalışma kapsamında kullanılan agregalar örnekleri, yassılık

indeksi deney standardına göre tanımlanmıştır. Bunun yanı sıra trafik ve su etkisiyle, bitüm-agrega adezyonu bozulur ve bitüm, agregalar üzerinde soyulmaya başlar. Çalışma kapsamında kullanılan bitüm ve agregaların, birbirine yapışma özelliğinin ölçüsünü belirlemek amacıyla soyulma deneyi yapılmış ve standarda uygunluğu saptanmıştır. Metilen mavisi deneyi sonucunda tüm agregaların sınır değerleri sağladığı görülmüştür. En iyi sonucu ise mermer tozunun verdiği görülmektedir. Bilindiği gibi bu deney

numunelerdeki kil miktarı hakkında bilgi zararlı olabilmektedir. Vermektedir. Kil ve silt gibi ince malzemeler ise

Çizelge 7. Agrega deneylerinin sonucu

Deneyin adı	Deney standardı	Birim	Deneyin sonucu	Şartname sınır değerleri
Los Angeles	TS-EN 1097-2	(%)	19,6	Maks. %25
Yassılık indeksi	TS-EN 933-3	(%)	15,7	Maks. %25
Soyulma mukavemeti	TS-EN 12697-11	(%)	60-70	Min. %60
Metilen mavisi	TS EN 933-9	(%)	1,25 (Bazalt) 2,0 (Kalker) 1,0 (Mermer tozu)	Max. %3

3.2. Bitüm Deney Sonuçları

Bu bölümde ise kullanılan bitüm malzemesinin özelliklerini belirlemek ve şartnameye uygunluğunu tespit etmek amacıyla gerekli deneyler yapılmış olup sonuçları Çizelge 8’de sunulmuştur. Oluşturulan karışımlarda, stabiliteye etki eden faktörlerden biri de penetrasyondur. Optimum stabiliteyi sağlayan bitüm kullanılarak, trafik yükü nedeniyle oluşan deformasyonlar

azaltılabilmektedir. Öte yandan, tekerlek izi etkisini azaltmak amacıyla yumuşama noktası değeri belirlenmelidir. Bunun yanı sıra, karışımın hazırlanması, serilmesi ve sıkıştırılmasıyla bitümlü bağlayıcı yaşlanmaya maruz kalmaktadır. Bu yaşlanmanın örneği ise dönmeli ince film etüvü ile gözlemlenebilmektedir. Yapılan bitüm deneyleri sonucunda, deney standartlarına göre tanımlanmış bitümlü bağlayıcı kullanılmıştır.

Çizelge 8. Bitüm deneylerinin sonucu

Deneyin adı	Deney standardı	Birim	Deneyin sonucu	TS EN 14023 sınır değerleri
Penetrasyon	TS-EN 1426	0,1 mm	40	25-55
Yumuşama noktası	TS-EN 1427	°C	75,7	min. 70
Kuvvet ölçümlü düktilite	TS-EN 13589	cm	100+	min. 100
Parlama noktası	TS-EN ISO 2592	°C	238	min. 220
Özgül ağırlık	TS-EN 15326	g/cm ³	1,03	1,0-1,1
Dönmeli ince film etüv deneyi				
Kütle değişimi (artma)	TS-EN 12607-1	%	0,27	maks. 0,5
Yumuşama noktası farkı (artma)	TS EN 1427	°C	2,5	maks. 8
Kalıcı penetrasyon	TS EN 1426	%	72,2	min. 40

3.3. Sıcak Karışım Deney Sonuçları

3.3.1. Marshall Stabilite Deneyi Sonuçları

Gradasyona uygun olacak şekilde 1150 gram agrega, %5,5, %6, %6,5, %7, %7,5 oranlarında

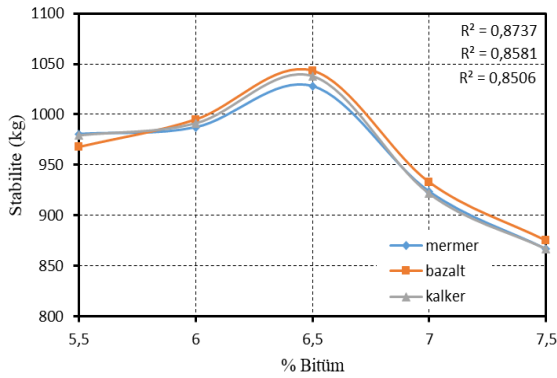
bitüm ile karıştırılarak numuneler hazırlanmıştır. Daha doğru bilgi elde edilmesi için, her bitüm yüzdesine sahip üç adet olmak üzere toplam 45 adet numune hazırlanmıştır. Deney sonucunda, bitüm yüzdelere bağlı olarak % boşluk değerleri karşılaştırılmalı olarak elde edilmiştir. Optimum

bitüm miktarı; en yüksek D_p 'ye karşılık gelen bitüm miktarı, en yüksek stabiliteye karşılık gelen bitüm miktarı, V_f ve V_h grafiği şartname ortalama değerden indirilen dikmeye karşılık gelen bitüm miktarlarının ortalaması dikkate alınarak hesaplanmıştır. Ardından akma ve VMA değerlerine uygunluğu kontrol edilmiştir.

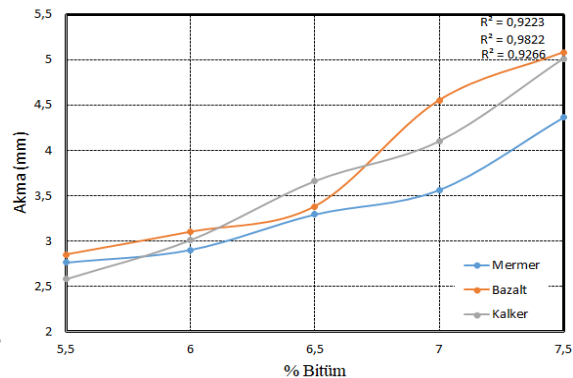
Belirlenen optimum bitüm miktarları; bazalt kullanılan karışımda %6,6, kalker kullanılan karışımda %6,5 ve mermer kullanılan karışımlarda %6,6 olarak elde edilmiştir.

Marshall deneyi sonucunda elde edilen grafikler Şekil 3'te görülmektedir. Stabilite, deformasyonlara karşı kaplamanın gösterdiği direnç olarak tanımlanmaktadır. Bitüm-Stabilite % grafiği incelendiğinde, kalker ve mermer kullanılan numunelerin aynı eğilimde davranış

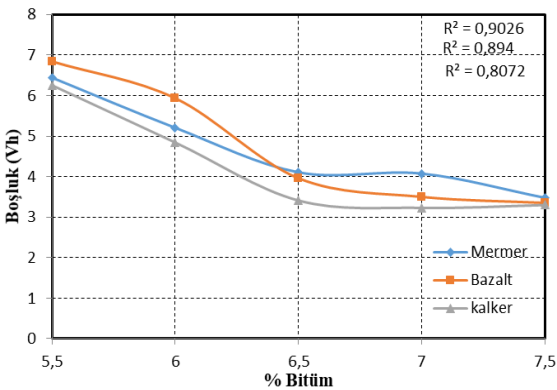
gösterdiği gözlenmektedir. Bazalt kullanılan numunelerde ise, stabilite değeri başlangıçta diğer numunelerden düşüktür. Ancak bitüm oranı arttıkça diğerlerinden daha yüksek stabilite değerine ulaştığı görülmektedir. En düşük stabilite değerinin mermer kullanılan numunelerde, en yüksek stabilite değerinin ise bazalt kullanılan numunelerde olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra akma değeri, trafik yükü altında, bitümün yüke karşı gösterdiği dirençtir. % Bitüm-Akma grafiği incelendiğinde, mermer ve kalker kullanılan numunelerin aynı eğilimde olduğu ve en düşük akma değerine mermer kullanılan numunelerin sahip olduğu görülmektedir. Bitüm-Boşluk % grafiğinde ise boşluk oranının, şartnamede belirtilen sınırlar içerisinde kalan değerlerinin, yaklaşık olarak %6,5 bitüm oranlarına denk geldiği görülmektedir.



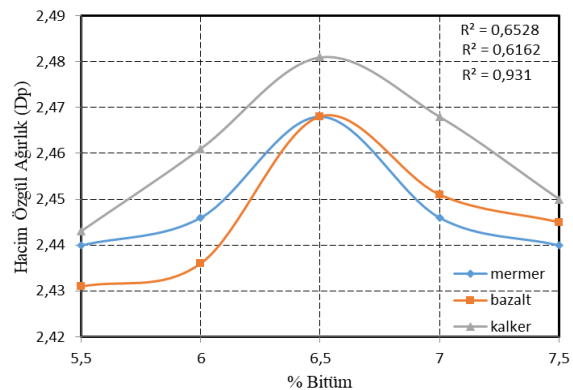
a)



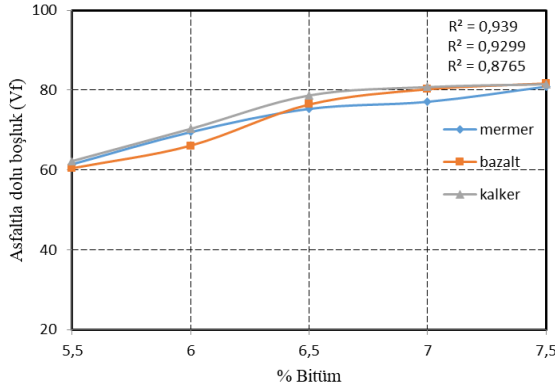
b)



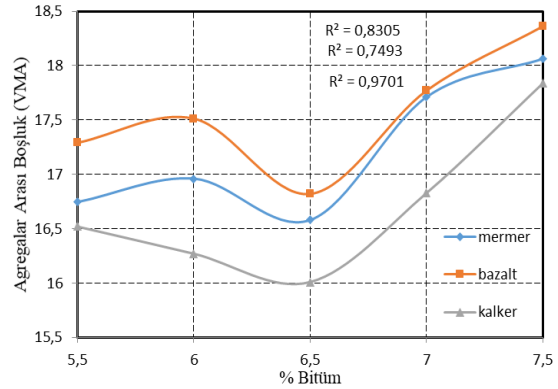
c)



d)



e)



f)

Şekil 3. Marshall stabilite deneyi grafikleri

Her numunede bitüm miktarının artmasıyla hava boşluğunun azaldığı gözlenmiştir. Optimum bitüm içeriğinde en fazla boşluk oranına mermer kullanılan numunelerin sahip olduğu görülmüştür. Bitüm-Hacim Özgül Ağırlık % grafiğine bakıldığında, her numune için belirli bitüm miktarına kadar hacim özgül ağırlık (D_p) değerinin arttığı ve sonrasında azalma meydana geldiği görülmektedir. Optimum bitüm miktarında bazalt ile mermerin aynı değere ve kalkerin de bu numunelere oldukça yakın bir değere sahip olduğu görülmeye karşın en yüksek hacim özgül ağırlık değeri kalker kullanılan numunelerde gözlenmiştir. Asfaltla dolu boşluk (V_f) oranına bakılmasının sebebi, agregalar arasındaki boşluğu, ayrıca buna bağlı olarak da asfalt içeriğini sınırlamaktır [17]. Bitüm- V_f % grafiğinde, V_f değerleri bitüm miktarının artmasıyla artış göstermiştir. Her üç numune türü için de değerlerin birbirine yakın olduğu görülmektedir. En fazla oran ise kalker kullanılan numunelerde gözlenmiştir.

Agregalar arası boşluk (VMA) değerleri, sıkışmış durumda olan karışımların içerisinde bulunan agregaların arasındaki boşluk alanı hacmini temsil etmektedir. Bu değer bitümlü sıcak karışımlarda durabiliteye etki eden en önemli tasarım parametresidir [18]. VMA değerlerinin, şartnameye göre minimum %16 olması istenmektedir. Bitüm-VMA % grafiğine bakıldığında, bütün numuneler bu değeri sağlamaktadır.

3.3.2. İndirekt Çekme Mukavemeti Deneyi

İndirekt çekme mukavemeti (İÇM) deneyi, sıkıştırılmış olan bitümlü karışımlarda, sudan veya nemden kaynaklı olarak meydana gelen bozulmalara karşı direnci ölçmek amacıyla yapılan bir deneydir. İÇM deneyi için Marshall test cihazı kullanılarak indirekt çekme mukavemeti değerleri hesaplanmıştır. TMA Tip-1 dizaynına uygun numuneler üzerinde, koşullu ve koşulsuz şartlar olacak şekilde deney yapılmış ve elde edilen sonuçlar Çizelge 9'da verilmiştir.

Asfalt karışımlarda suya karşı direncin sayısal indeksini elde etmek için, donma-çözülme koşullandırmasından sonra bulunan mukavemet değerinin, normal numunelerin mukavemetine oranı hesaplanmalıdır, bu da İÇM oranını vermektedir [19].

Çizelge 9. İÇM deney sonuçları

TMA karışımları	Koşullu (kg/cm ²)	Koşulsuz (kg/cm ²)	İÇM (%)
Bazalt	8,04	8,57	93,81
Mermer	6,62	7,52	88,03
Kalker	7,79	8,98	86,74

*AASHTO T 283 İÇM Oranı, min % 80

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada; kaba ve ince agrega olarak bazalt, filler malzeme olarak da bazalt, mermer tozu ve kalker olmak üzere üç tip agrega kullanılmıştır.

Ayrıca polimer modifiye bitüm ve taş mastik asfalt için kullanılan selülozik elyafla karışımlar oluşturulmuştur. Mineral filler olarak bazalt ve kalker agregasının kullanıldığı numuneler kontrol numuneleri olarak değerlendirilmiştir. Gerekli görülen agrega deneyleri ve ardından modifiye bitüm için gerekli deneyler yapıldıktan sonra karışımlar oluşturulmuştur. Optimum bitüm miktarını belirlemek amacıyla bu karışımlara öncelikle Marshall stabilite deneyi yapılmıştır. Ardından süzülme deneyi ve indirekt çekme deneyi uygulanmıştır.

Çalışma koşullarında geçerli olmak üzere aşağıda verilen bazı sonuçlar elde edilmiştir.

- TMA karışımlarda taş iskelet, bitümün bağlayıcı etkisiyle bir arada tutunmakta ve tekerlekten gelen yükleri taşımaktadır. Bitüm ise agregalar arasında oluşan boşluğu kısmen doldurmakta ve bu sayede arada hava boşlukları kalmaktadır. Elbette BSK içerisinde hava boşluklarının bulunması gereklidir. Hava boşluklarının bu değeri Karayolları tarafından % 2-4 olarak sınırlandırılmaktadır.
- TMA Tip-1 için dizayn kriterlerinde belirtilmiş olan V_h sınır değerleri, tüm karışımlar için uygundur. Bazaltın filler olarak kullanıldığı karışımlarda VMA değeri 16,82 ile diğer iki tür karışıma oranla daha yüksek değere sahiptir. Bununla beraber tüm karışımlar, şartname değerlerini sağlamaktadır.
- V_f değeri, agregalar arasındaki boşluğun bitümle dolması nedeniyle, bitüm arttıkça artmaktadır. Boşlukların yeterli miktarda dolmaması sonucunda, yağmur suyu ve istenmeyen maddeler aradaki boşluklara girmektedir. Bunun sonucunda yolda çatlamlar ve çökmeler oluşmaktadır. Her karışım için bu değerler birbirine yakındır.
- Stabilite, agregaların birbirlerine kenetlenmesiyle ilişkilidir. Çalışmada kaba ve ince agregalar ile aynı türde olan bazalt fillerinin kullanılması, iç kenetlenmeyi arttırmış ve stabilite değerini yükseltmiştir.

- Marshall deneyi sonucunda elde edilen optimum bitüm yüzdesi; kalker fillerinin kullanıldığı karışımlarda % 6,5, mermer fillerinin kullanıldığı karışımlarda % 6,6 ve bazalt fillerinin kullanıldığı karışımlarda % 6,6 olarak elde edilmiştir. Bu sayede mermer tozunun TMA karışımlarla, bitüm kullanımı açısından aynı ekonomikte olduğunu söylemek mümkündür.
- Mermer fillerinin, bitüm süzülme deneyinde en iyi sonucu verdiği görülmüştür. TMA karışımlarda oldukça önemli olan süzülme deneyi, atık mermerin katkı malzemesi olarak da kullanılabilmesini göstermiştir.
- Su ve nemden kaynaklanan bozulmalara karşı en iyi direnç, bazalt fillerinin kullanıldığı karışımlarda elde edilmiştir.

Sonuç olarak, mermer atıklarından oluşan mermer tozunun, filler olarak kullanıldığı karışımların birçok deneyde uygun sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Hem çevre kirliliğini azaltması hem de bazı noktalarda iyileştirici özelliklerinin olması sebebiyle TMA karışımlarda kullanılabilceği sonucuna varılmıştır. Ancak daha kesin sonuçlar elde etmek için farklı oranlarda mermer tozu içeren numunelerin incelenmesi önerilmektedir.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma Harran Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (HÜBAP) tarafından 19262 numaralı proje tarafından desteklenmiştir. Çalışmada kullanılan malzemelerin temini, Teknomet Mühendislik ve Diyarbakır Mermer tarafından yapılmıştır. Desteklerinden dolayı teşekkürlerimizi sunarız.

6. KAYNAKLAR

1. Aubert, J.E., Husson, B., Sarramone, N., 2006. Utilization of Municipal Solid Waste Incineration (MSWI) Fly Ash in Blended Cement Part 1: Processing and Characterization of MSWI Fly Ash. Journal of Hazardous Materials, B136, 624-631.

2. Karaşahin, M., Terzi, M., 2006. Evaluation of Marble Waste Dust in the Mixture of Asphaltic Concrete. *Construction and Building Materials*, 21(3), 616–620.
3. Dosho, Y., 2007. Development of a Sustainable Concrete Waste Recycling System. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 5(1), 27-42.
4. Akbulut, H., Güner, C., 2006. Atık Mermerlerin Asfalt Kaplamalarda Agregata Olarak Değerlendirilmesi. *İMO Teknik Dergi*, 17(4), 3943-3960.
5. Ceylan, H., Mança, S., 2013. Mermer Parça Atıklarının Beton Agregası Olarak Değerlendirilmesi. *SDU Teknik Bilimler Dergisi*, 3(2), 21-25.
6. Ahmadinia, E., Zargar, M., Karim, M.R., Abdelaziz, M., Shafiqh, P., 2011. Using Waste Plastic Bottles as Additive for Stone Mastic Asphalt. *Materials and Design*, 32, 4844-4849.
7. Gürü, M., Çubuk, M.K., Arslan, D., Farzanian, A.S., Bilici, İ., 2014. An Approach to the Usage of Polyethylene Terephthalate (PET) Waste as Roadway Pavement Material. *Journal of Hazardous Materials*, 279, 302–310.
8. Keskin, M., Karacasu, M., 2018. Atık Bor İçeren Asfalt Betonlarının Performanslarının Değerlendirilmesi. *Fırat Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30(2), 185-192.
9. Karacasu, M., Bilgiç, Ş., 2009. Atık Lastik Katkısının Sıcak Asfalt Özelliklerine Etkisi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22(2), 46-64.
10. Yıldırım, B.Z., Karacasu, M., Okur, V.D., 2018. Atık Lastik ve Cam Lif ile Modifiye Edilmiş Bitümün Asfalt Betonu Performansına Etkileri. *Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18(3), 1019-1027.
11. Moghaddam, T.B., Karim, M.R., Syammaun, T., 2012. Dynamic Properties of Stone Mastic Asphalt Mixtures Containing Waste Plastic Bottles. *Construction and Building Materials*, 34, 236-242.
12. Karakuş, A., 2011. Investigating on Possible use of Diyarbakir Basalt Waste in Stone Mastic Asphalt. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3502-3507.
13. İzol, E., 2020. Taş Mastik Asfalt Yapımında Mineral Filler Olarak Mermer Tozunun Kullanılması. Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Şanlıurfa, 93.
14. Coğrafya Harita, Türkiye Maden Haritaları, <http://cografyaharita.com/haritalarim/4fturkiyemermer-madeni-haritasi.png>, Erişim Tarihi: 25.10.2021
15. Erkek, F., Özdemir S., 2011. Mermer ve Traverten Sektörüne Küresel ve Bölgesel Yaklaşım, 41.
16. Karayolları Genel Müdürlüğü, 2013. Karayolu Teknik Şartnamesi, Ankara, 431.
17. Sağlam, Çitoğlu G., Bayraktar, O.Y., 2018. Atık Mermer Tozu ve İnşaat Sektöründeki Kullanımı ile İlgili Çalışmalar. Conference: 2nd International Symposium on Innovative.
18. Kaya, D., Topal, A., 2016. Marshall ve Superpave Tasarım Yöntemleri Arasındaki Farklılıkların Ilık Karışım Asfaltlar Açısından İncelenmesi. *CBÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 12(2), 289-302.
19. KGM, 2000. Bitümlü Karışımlar Laboratuvar El Kitabı, Ankara.

Çeşitli Örme Kumaşlarda Farklı Tekniklerle Gözenekliliğin Belirlenmesi ve Hava Geçirgenliği için Optimum Tekniğin Tespiti Üzerine Bir Çalışma

Seval UYANIK*¹ ORCID 0000-0002-9513-5746

Mehmet MERKEPÇİ² ORCID 0000-0003-1536-1776

¹Adıyaman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Adıyaman

²Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Gaziantep

Geliş tarihi: 05.01.2021

Kabul tarihi: 21.03.2022

Atıf şekli/ How to cite: UYANIK, S., MERKEPÇİ, M., (2022). Çeşitli Örme Kumaşlarda Farklı Tekniklerle Gözenekliliğin Belirlenmesi ve Hava Geçirgenliği için Optimum Tekniğin Tespiti Üzerine Bir Çalışma. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37(1), 13-22.

Öz

Geçirgenlik özellikleri kumaş gözenekliliğinden doğrudan etkilenir. Tekstil malzemelerinin gözenekliliğini belirlemek için teorik ve deneysel birçok yöntem vardır. Bu çalışma, görüntü işleme tekniği ve geometri modelleme kullanarak askılı örme kumaşların gözenekliliğini belirlemeyi ve hava geçirgenliği açısından kumaş gözenekliliğini belirlemek için hangi tekniğin daha uygun olduğunu ortaya koymayı amaçlamaktadır. Çalışma sonuçları, optik gözenekliliği belirleyen görüntü analizinin, bu yöntem sadece gözenek boyutuna odaklandığından geometri modellemeye göre daha uygun olduğunu kanıtlamıştır. Ayrıca örme kumaşlarda ilmeklerin konumuna göre gözenek boyutları değiştiği için hava geçirgenlik değerleri beklenmedik bir şekilde ilmek sayısı ile paralel değildir.

Anahtar Kelimeler: Bilgisayarlı görüntü analizi, Geometrik modelleme, Gözeneklilik, Hava geçirgenliği, Askılı örgü yapısı

A Study on Determining Porosity with Different Techniques and Revealing Optimum Technique for Air Permeability in Various Knitted Fabrics

Abstract

The permeability properties are directly affected by fabric porosity. There are several methods which are theoretical and experimental to determine the porosity of textile materials. This study aims to determine the porosity of knitted fabrics with tuck stitches and plain knit fabric by using image analysis technique and geometry modeling and to reveal which technique is more suitable to determine fabric porosity in

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Seval UYANIK, suyanik@adiyaman.edu.tr

terms of air permeability. The study results proved that image analysis determining optical porosity are more suitable compared to geometry modeling since this method only focused on pore size. Besides, air permeability values are not parallel with the number of the tuck stitches unexpectedly since pore sizes change based on the location of tuck stitches in the knitted fabrics.

Keywords: Computer image analysis, Geometrical modeling, Porosity, Air permeability, Knit structure with tuck stitch

1. GİRİŞ

Yüksek giysi konforuna sahip örme kumaşların desenleri ilmek, askı, atlama ve bunların kombinasyonları ile tasarlanır. Askı, ters U şeklinde bir konfigürasyona sahip olup kumaşın ağırlığını, kalınlığını ve genişliğini artırır ve kumaşı diğer kumaşlara göre daha gözenekli hale getirir [1].

Ertekin ve Marmaralı [2], kumaşın hava geçirgenliğini etkileyen en önemli parametrenin lifler ile iplikler arasındaki boşluklar yani kumaş gözenekliliği olduğunu ve askının kumaşın gözenekliliğini arttırdığını belirtmişlerdir. Bu nedenle askılı örme kumaşların hava geçirgenlik değerleri düz örme kumaşlara göre daha yüksek çıktığını ve aynı iğnede yapılan askı sayısı arttıkça gözeneklilik ve dolayısıyla hava geçirgenliğinin arttığını ortaya koymuşlardır.

Uyanık ve Duru Baykal [3]'da çalışmalarında örme kumaşların hava geçirgenliği üzerine etkili faktörün kumaşların gözenekliliği olduğunu, ilmek iplik uzunluğu ve buna bağlı olarak değişim gösteren ilmek yoğunluğu azaldığında da kumaşta gözenek yoğunluğunun arttığını ve kumaşta gözenekliliğin artmasıyla da havanın kumaşta geçebileceği boşluklar arttığı için hava geçirgenliğinin arttığını belirtmişlerdir. Gözeneklilik, boşluk hacminin toplam malzeme hacmine oranıdır. Gözeneklilik, jeolojik malzemenin depolama kapasitesini sembolize eder. Kumaş gözenekliliği, geçirgenlik özelliklerini doğrudan etkiler. Gözeneklilik, sıklık, kumaş tipi, iplik yapısı gibi diğer yapısal parametrelerden etkilenir [4].

Yüksek hava geçirgenliği, kumaşın içinden yüksek oranda hava geçtiğinin bir göstergesidir. Hava

geçirgenliği, 10 mm su basma basıncında kumaşın 100 mm²'sinden bir saniyede geçen havanın mililitre cinsinden hacmi olarak tanımlanır.

Hava geçirgenliği ve kumaş gözenekliliğinin hava geçirgenliği ve diğer kumaş özellikleri üzerindeki önemi ve etkisi birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Oinuma [5] kuru relakse olmuş 1x1 ribana örme kumaşlarda ilmek uzunluğunun gözeneklilik, hava geçirgenliği ve bazı fiziksel performanslar üzerindeki etkisini incelemiş ve ilmek uzunluğunun artışının kumaşların gözeneklilik ve hava geçirgenlik değerlerini arttırdığını belirtmiştir. Okur [4], hava geçirgen kumaşların genellikle suyu buhar ve sıvı fazda geçirebilmesi nedeniyle hava geçirgenliğinin özellikle kumaşın konfor özelliğini etkileme hususunda ön plana çıktığını ve bir giysinin rahat giyilebilmesi için giysi içindeki hava ve su buharının hareketinin en önemli faktörler olduğunu ifade etmiştir.

Bazı araştırmacılar (Dubrovski [6], Mohammadi ve arkadaşları [7]), kumaştaki gözeneklerin hem lifler arasında hem de iplikler arasında olduğunu ve tekstil malzemelerinin geçirgenliği üzerinde gözenek boyutu ve dağılımının büyük önem taşıdığına dikkat çekerek küçük gözenekli kumaşlarda sıvı ve hava geçirgenliğinin düşük olmasının bu fikri desteklediğini işaret etmişlerdir. Ayrıca Bhattacharjee ve arkadaşları [8] kumaşların hava ve sıvı geçirgenliğinin belirlenmesinin tam olarak gözeneklilik ölçümlerine bağlı olduğunu; Çay ve arkadaşları [9], çözgü ve atkı yoğunluğunun ve kumaş gözenekliliğinin renk verimliliği üzerinde "ilk seferde doğru" boyama için büyük önem taşıdığını; Havlova [10] hava geçirgenliğinin aslında malzemenin gözenekliliğinin bir fonksiyonu olduğunu ve tekstil

ürününün konforunu etkileyen önemli bir faktör olduğunu belirtmişlerdir.

Ayrıca kumaş gözenekliliğinin farklı yöntemlerle belirlenmesine yönelik birçok çalışma yapılmıştır. Militký ve Havrdová [11] kumaşların gözeneklilik değerlerini hesaplamak için yoğunluğa, hidrolik gözenek tanımına ve örtü faktörüne bağlı olarak üç temel teknik olduğunu belirtmişlerdir. Çay ve arkadaşları [12], gözenekliliğin açıkça kumaş geometrisinin bir fonksiyonu olduğunu açıklamış ve görüntü analiz sistemini kullanarak dokuma kumaşların gözenekliliğini tahmin etmeye çalışmış ve deneysel çalışma sonuçlarına göre parlaklık yüzdesi ile hava geçirgenliği arasında yaklaşık olarak doğrusal bir ilişki bularak tekstillerin gözenekliliğinin iplik çapı, yüzey oluşturma teknikleri ve birim alandaki iplik sayısı gibi faktörlerden etkilendiğini ortaya koymuşlardır. Wilbik-Halgas ve arkadaşları [13], bilgisayar görüntüsü temelinde düz çift katlı ve astarlı örme kumaşların yüzey gözenekliliğini değerlendirmişler ve hava geçirgenliğinin, su buharı geçirgenliğinin aksine örme kumaşların kalınlığının ve yüzey gözenekliliğinin bir fonksiyonu olduğunu bulmuşlardır. Benltoufa ve arkadaşları [14], kumaşın gözenekliliğini tahmin etmenin en uygun ve en kolay yöntemini ve çeşitli örgü parametrelerinin süprem kumaşların gözenekliliği üzerindeki etkisini belirlemek için çalışmışlardır. Gözenekliliği belirlemede geometrik modellemenin en uygun ve en kolay yöntem olduğunu ve herhangi bir doğrulama için genelleştirilebileceğini ve ilmek uzunluğunun gözeneklilik üzerindeki etkisinin, ilmek yoğunluğu ve kumaş kalınlığından daha fazla olduğunu ve ayrıca iplik numarasının gözenekliliği etkilediğini kanıtlamışlardır. Öner ve Okur [15] da bazı araştırmacıların gözeneklilik ve geçirgenlik özelliklerini tahmin etmek için istatistiksel yöntemler, bulanık mantık, görüntü analizi ve yapay sinir ağı (ANN) vb. yeni yöntemleri kullandıklarına dikkat çekmişlerdir.

Halen tekstil malzemelerinin gözenekliliğini belirlemek için kullanılan deneysel yöntemler arasında SEM, gaz adsorpsiyonu [16], görüntü

analiz sistemi [17-18] ve son olarak μ CT [16] kullanılarak gözeneklilik ölçüm yöntemleri yer almaktadır. X-ışınlı bilgisayarlı mikrotomografi (μ CT), tekstil malzemelerinde gözeneklilik tespitinin en yeni yöntemini temsil eder. Tekstil yapısının analizi [19], 3D tekstil mimarisindeki değişkenliğin karakterizasyonu [7] veya tekstillerde nemin dağılımı ve taşınmasıyla ilgili çeşitli çalışmalar [20] söz konusu olduğunda, μ CT yaklaşımı ileri ve doğru bir teknik olarak ifade edilmektedir. Bu çalışmalardan birinde Doczyova ve arkadaşları [21] tekstil metrolojisinde μ CT uygulanarak elde edilen tekstil yapısının 3 boyutlu görüntüsünün kullanımını tartışmışlar ve μ CT sisteminin 3 boyutlu gözeneklilik ölçümü için uygun bir alternatif yöntem olduğunu ve örgü yapılarında hava geçirgenliği ile ölçülen gözenekliliği arasındaki inceleme neticesinde önerilen 3 boyutlu gözeneklilik ölçüm sürecinin doğruluğunu ortaya koymuşlardır.

Son yıllarda görüntü işleme tekniklerinin gelişmesiyle birlikte optoelektronik aletler ve optik yöntemler kumaş üretiminin kalite kontrolünde kullanılmaya başlanmış [22] ve optik sensörler ve bunların sinyal analizi tekstil alt katmanlarının basınç altında büyük ölçüde yeniden düzenlenmesinde mevcuttur [23]. Görüntü analiz teknikleri ile hava geçirgenliğinin hesaplanması için geliştirilen yeni yöntemler, kumaşın gözeneklerinden geçen ışığın özelliklerinin kullanılmasına ve bu sinyalin analizine [24] ve ayrıca sinir ağlarının kullanımına [12] dayanmaktadır.

Özellikle kumaş gözenekliliğinin belirlenmesinde optik yöntem en çok kullanılan yöntem olmaya başlamıştır. Wardining [25] yaptığı çalışmada optik yöntem kullanarak kumaş gözeneklilik değerlerini bulmuştur. Çalışma ile optik gözenekliliğin, görünür ışığın kumaştan geçirgenliği (%) anlamına geldiği ve optik gözenekliliğin kumaştaki iplikler arasındaki boşluklarla temsil edildiği belirtilmiştir. Buna göre mikroskoptan gelen ışık boşluklardan yakalanır ve beyaz piksellere dönüştürülürken ışığı engelleyen iplik siyah piksellere dönüştürülür ve nihai olarak beyaz piksellerin tüm alana oranı ile gözeneklilik ölçülmüş olur. Uyanık ve Merkepçi [26] farklı ilmek uzunluklarına sahip süprem örme

kumaşların gözenek yoğunluklarını geometrik model ve görüntü işleme tekniği ile belirleyerek söz konusu kumaşların hava geçirgenliğini tahmin etmede optik yöntemin daha uygun olduğunu ifade etmişlerdir.

Yukarıda bahsi geçen çalışmalarda ortaya konulduğu üzere gözenekli bir kumaş olarak bilinen askılı örme kumaşlar yüksek hava geçirgenlikleri ile konforu yüksek giysiler sınıfına girmektedir ve bu kumaşlarda tahminleme ile hava geçirgenliğinin tespiti ve sonrasında istenilen geçirgenliğe uygun askılı kumaş tasarımı önem arz etmektedir. Tahminlemenin başarısı için hava geçirgenliği test cihazlarıyla elde edilen sonuçlara en yakın sonucu veren ve kolay yöntemlerin tespit edilmesi bu çalışma ile amaçlanmıştır. Diğer bir ifadeyle mevcut çalışma, görüntü işleme tekniği ve geometrik modelleme kullanılarak askılı örme kumaşların gözenekliliğini belirlemeyi ve gözeneklilik ile hava geçirgenliği arasındaki ilişkiyi ortaya koymayı ve son olarak hangi tekniğin kumaş gözenekliliğini belirlemeye daha uygun olduğunu ortaya koymayı hedeflemektedir. Çalışma neticesinde test cihazı kullanmaksızın askılı örme kumaşlarda gözenekliliğin ve buna paralel olarak hava geçirgenliğinin doğru bir şekilde tahminlemesinin tekstil sektöründe teknik tasarım aşamalarını kolaylaştıracağı ve böylece giysi konforu açısından ideal askı sayısı ve yerleşimine sahip örme kumaş tiplerinin ortaya konulması beklenmektedir.

2. MATERYAL ve METOT

Bu çalışmada 30 inç çapında E-28 incelikte olan yuvarlak örgü makinesinde 19,7 tex ring iplikler kullanılarak aynı ilmek uzunluğunda düz örgü (süprem) ve askılı örme kumaşlar elde edilmiştir. Daha sonra bu kumaşlara terbiye ve boyama işlemleri uygulanmıştır. Kumaş numunelerinin ilmek uzunluğu, sıra sıklığı/cm (may sayısı-cpc), çubuk sıklığı/cm (wpc), ilmek yoğunluğu, gramaj, kalınlık gibi yapısal özellikleri ve hava geçirgenliği ilgili standartlarla ölçülmüştür [27-30]. Gözeneklilik ölçümleri, geometrik modelleme ve görüntü analizine dayalı olarak yapılmıştır. Geometrik modellemede verilen

Eşitlik 1 ve 2'ye göre porozite değerleri hesaplanmıştır [31].

$$\varepsilon = 1 - \frac{\pi d^2 l e w}{2t} \quad (1)$$

$$r = \sqrt{\frac{T}{\pi \rho 10^5}} \quad (2)$$

Burada ε -gözeneklilik, d -iplik çapı, l -ilmek uzunluğu, c -may sayısı, w -çubuk sıklığı, t -kalınlık, r -iplik yarıçapı, T -iplik numarası (tex), ρ -iplik yoğunluğu (g/cm^3). İplik yoğunluğu olarak Pierce tarafından belirlenen $0,909 \text{ g/cm}^3$ değeri kullanılmıştır [32].

Görüntü analizinde ise örneklerin görüntüleri dijital kamera ile alınmıştır. Görüntüyü işlemek ve elde edilen görüntülerin optik gözenekliliğini belirlemek için Matlab yazılımı kullanılmıştır. Bu amaçla görüntü dosyası açılarak geliştirilerek gri tonlamalı bir görüntü elde edilmiştir. Daha sonra gri tonlamalı görüntü binarize yöntemi kullanılarak siyah beyaz görüntüye dönüştürülmüştür. Elde edilen görüntü, yazılım penceresinde eşiklenmiştir. Son olarak görüntüdeki siyah beyaz pikseller sayılmış ve optik gözeneklilik Eşitlik 3'e göre hesaplanmıştır [25]:

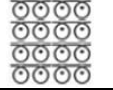
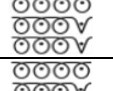
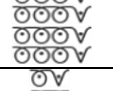
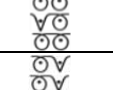
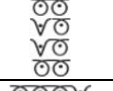
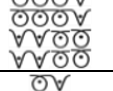
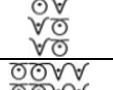
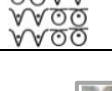
$$\text{Optik gözeneklilik (\%)} = \frac{\text{beyaz piksel}}{\text{siyah piksel} + \text{beyaz piksel}} \times 100 \quad (3)$$

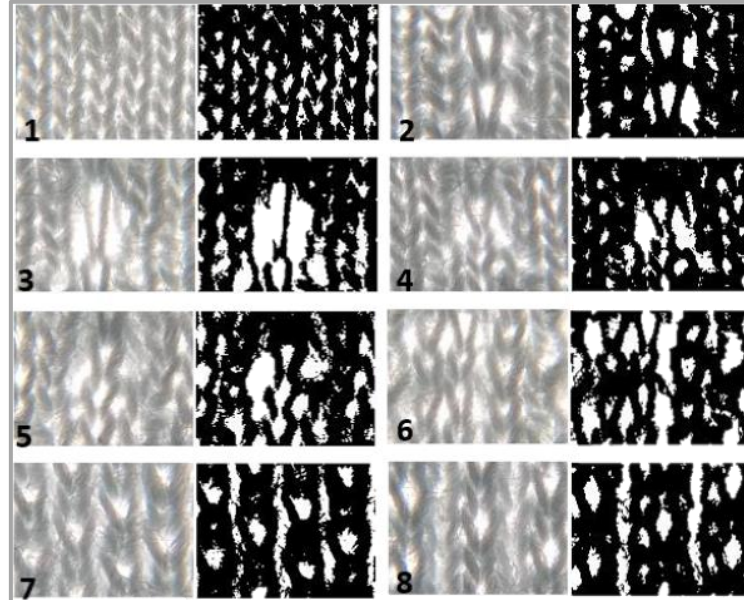
Hava geçirgenlik testleri, Prowhite HG-01 test cihazında TS 391 EN ISO 9237 standardına göre yapılmıştır. Gözeneklilik ve hava geçirgenliği arasındaki ilişkinin yönünü ve kuvvetini belirlemek için SPSS 21 istatistik yazılım paketi kullanılarak regresyon ve Pearson korelasyon testleri yapılmıştır.

Örme kumaşların yapısal özellikleri ve iğne diyagramları Çizelge 1'de verilmiştir. Örme kumaş numunelerinin askı sayıları bütün kumaşlar için ilmek yoğunluğu 48 ilmek sabit alınarak belirlenmiştir.

Numunelerin orijinal görüntüleri ve binarize edilmiş görüntüleri Şekil 1'de gösterilmiştir. Aynı örnek için soldaki görüntü orijinali, sağdaki görüntü ise binarize edilmiş olanı göstermektedir.

Çizelge 1. Örme kumaşların yapısal ve fiziksel özellikleri

Kumaş Kodu	İğne Diyagramı	Askı Sayısı	İlmeğin Uzunluğu (mm)	cpc	wpc	İlmeğin Yoğunluğu /cm ²	Gramaj (g/m ²)	Kalınlık (mm)	Geometrik Gözeneklilik (%)	Optik Gözeneklilik (%)
1		0	2,7	20	15	300	153	0,44	19,92	21,48
2		8	2,7	24	12	288	159	0,51	33,68	21,97
3		9,6	2,7	22	12	264	152	0,52	40,37	27,01
4		12	2,7	22	12	264	180	0,56	44,63	21,09
5		16	2,7	22	11,5	253	184	0,64	53,57	24,12
6		18	2,7	14	12	168	161	0,61	67,65	26,52
7		24	2,7	16	11	176	174	0,63	67,19	24,62
8		24	2,7	14	14	196	166	0,65	64,58	25,11



Şekil 1. Numunelerin orijinal ve binarize görüntüleri

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

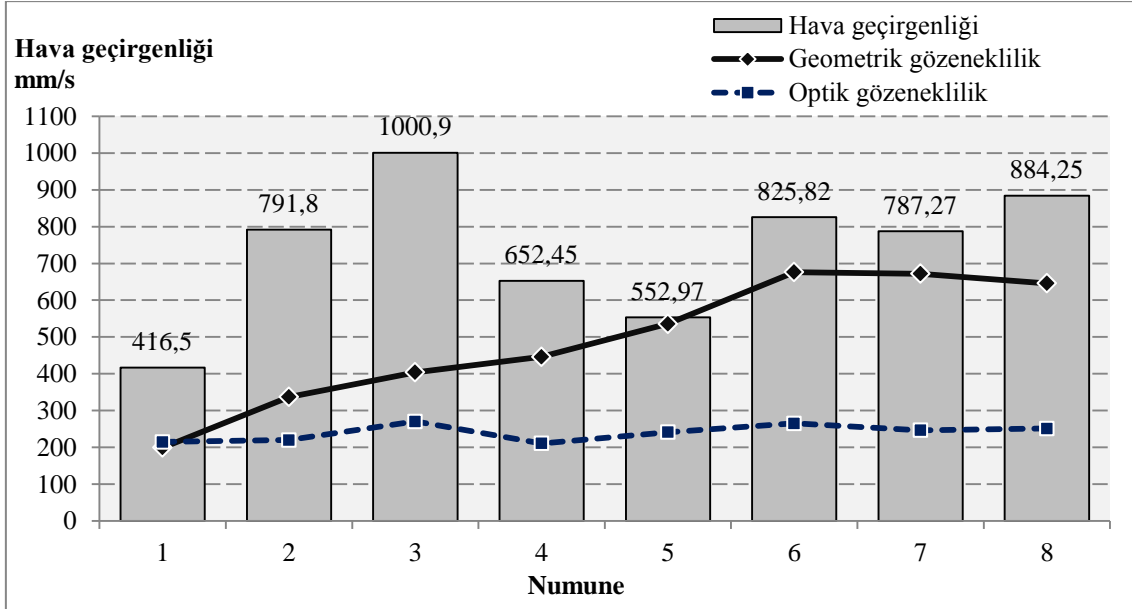
Numunelerin hava geçirgenliği ve gözeneklilik değerleri arasındaki ilişkiyi gösteren grafik Şekil 2’de verilmiştir. Gözeneklilik değerlerinin etkisini tam olarak görebilmek için gerçek değerler çok düşük ve yatay eksene çok yakın olduğundan grafikte kullanılan değerler 10 ile çarpılarak katlı gösterilmiştir. Verilen şekil içinde numuneler, askı sayısına göre düşükten yükseğe doğru düzenlenmiştir.

Bilindiği gibi askı, örgü kumaşlara gözeneklilik kazandırmaktadır ve bu durum askı içeren kumaşların hava geçirgenlik değerlerinin askı içermeyen süprem kumaşa göre daha yüksek hava geçirgenlik değerine sahip olduğunu gösteren Şekil 2 ile desteklenmektedir. Şekilden geometrik ve optik gözeneklilik değerlerinin genel olarak askı yerleşim şekli benzer kumaşlarda numunelerin askı sayısı ile uyumlu olarak arttığı görülmektedir. Daha açık bir şekilde ifade etmek gerekirse, 2 ve 3 nolu numuneler enine raporu 4 iğne olan ve aynı iğnede askı yapılan kumaş tipleri olup 3 nolu kumaş 2 nolu kumaşa göre daha fazla askı sayısına sahiptir ve böylece gözeneklilik ile hava geçirgenliği beklendiği gibi daha yüksektir. 4, 5 ve 7 nolu numuneler ise lakost (enine raporu 2 iğne, boyuna raporu aynı iğnedeki askı sayısına göre değişen ve askısı farklı iğnelerde olan zikzan tip) tipi kumaşlar olup geometrik gözeneklilik değerleri askı sayısı ile uyumlu olarak artarken optik gözeneklilik açısından beklenen uyum 4 ve 5 nolu numuneler için gözlenirken 7 nolu numunede gözeneklilik değeri hemen hemen 5 nolu numune ile aynı olup beklenenden düşük olarak görülmektedir. Bunun nedeni, geometrik gözeneklilik ölçümünde iplik çapı, ilmek uzunluğu, ilmek yoğunluğu ve kumaş kalınlığı gibi iplik ve kumaş yapısal parametrelerinin dikkate alınması, optik gözeneklilik tespitinde ise sadece gözenek boyutu olan gözenek alanının dikkate alınmasıdır. Diğer bir ifadeyle kumaşta geometrik gözeneklilik tespitinde özellikle iplik ve kumaş kalınlığının dikkate alınmasıyla 3 boyutlu bir yaklaşım sergilenirken optik gözeneklilik tespitinde 2 boyutlu yaklaşım olmasının bu sonucu verdiği düşünülmektedir. 6 ve 8 nolu kumaşlar ise

enine raporu 4 iğne, boyuna raporu 4 sıra olan ve diğer kumaş numunelerinden farklı olarak aynı sırada yanyana askı içeren zikzak tip kumaşlardır ve hem geometrik hem de optik gözeneklilik değerleri ile askı sayıları arasında beklenen paralellik gözlenmemiş ve hatta askı sayısı daha fazla olmasına rağmen 8 nolu numunede gözeneklilik değeri daha düşük elde edilmiştir. Bu durumun 8 nolu numunede tüm örgü sıralarında yanyana olan çift askıların atlamaya dönüşmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Çünkü, atlama yapan iplikler kumaşın arka kısmında yatırılmış bir şekilde yer alarak ilmeklerin arkasında ikinci bir kat etkisi verirler ve kumaşın enini daraltıp ilmek çubuk sayısını ve paralelinde ilmek yoğunluğunu artırır ki tüm bu etkiler neticesinde kumaşın gözenekliliği azalır.

Dolayısıyla 6 nolu numuneye göre ilmek yoğunluğu fazla olan 8 nolu numunenin geometrik gözeneklilik değerinde bu düşüş gözlenmiştir. 6 nolu numunede ilmek yoğunluğu daha az olmasına rağmen 8 nolu numunede gözenek alanının büyümesini sağlayan askı sayısı daha fazla olduğu için optik gözeneklilik değerleri hemen hemen aynı ölçülmüştür. Diğer önemli bir husus olarak ise sadece düz örgü olan 1 nolu numune için hem geometrik gözeneklilik hem de optik gözeneklilik değerlerinin hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. Diğer numunelerde yer alan askı, kumaşın toplanmasına ve kalınlaşmasına sebep olarak gözenek alanını değiştirdiği için geometrik gözeneklilik değerlerine göre optik gözeneklilik değerleri çok daha düşüktür. Söz konusu durum askı içermeyen 1 nolu numunede ise gözlenmemiştir.

Şekil 2’den de görüldüğü üzere beklendiği gibi, gözeneklilik değerleri en düşük olduğu için 1 nolu numune olan düz örgü en düşük hava geçirgenliğine sahiptir. En yüksek optik gözeneklilik değerine sahip olan 3 nolu numune, en yüksek hava geçirgenlik değerini göstermektedir. Ancak en yüksek geometrik gözeneklilik değerine sahip olan numune 6, en yüksek hava geçirgenlik değerine sahip değildir. Diğer numunelerin hava geçirgenlik değerleri genel olarak optik gözeneklilik değerleriyle uyumludur.



Şekil 2. Örme kumaşların gözeneklilik ve hava geçirgenliği sonuçları

Regresyon modeli, regresyon ve korelasyon test sonuçlarını içeren istatistiksel analizler izleyen çizelgelerde verilmiştir. Çizelge 2’de verilen regresyon modelinde R^2 (0,984) ve ayarlı R^2 (0,958) değerlerinin 1’e yakın şekilde oldukça yüksek olması, modelin tahmin gücünün yüksek olduğunu ve bağımlı değişken olan hava geçirgenliği ile bağımsız değişkenler olan gözeneklilik arasında ilişkilerin güçlü olduğunu göstermektedir.

Çizelge 3’te verilen regresyon test sonuçları incelendiğinde, Sig. $0,019 \leq 0,05$ değeri optik gözeneklilik bağımsız değişkeninin hava geçirgenliği üzerinde etkili olduğunu, Sig. $0,608 \geq 0,05$ değeri ise geometrik gözeneklilik bağımsız değişkeninin hava geçirgenliği üzerinde etkili olmadığını istatistiksel olarak ortaya koymuştur.

Çizelge 2. Regresyon modeli

Model Özeti				
Model	R	R^2	Ayarlı R^2	Tahminin Std. Hatası
1	,984 ^a	,969 ^b	,958	154,86913
^a Tahminleyiciler: Optik gözeneklilik, geometrik gözeneklilik				
^b Orijininden regresyon için				

Çizelge 3. Regresyon test sonuçları

Katsayılar ^{a,b}						
Model		Standart olmayan katsayılar		Standart katsayılar	t	Sig.
		B	St. Hata	Beta		
1	Geometrik gözeneklilik	2,108	3,894	,143	,541	,608
	Optik gözeneklilik	26,682	8,340	,846	3,199	,019
a. Bağımlı değişken: Hava geçirgenliği						
b. Orijininden doğrusal regresyon						

Çizelge 4. Korelasyon test sonuçları

		Hava geçirgenliği
Geometrik gözeneklilik	Pearson korelasyon katsayısı	,462
	Sig. (2-uçlu)	,249
Optik gözeneklilik	Pearson korelasyon katsayısı	,714*
	Sig. (2-uçlu)	,047

*Korelasyon 0,05 düzeyinde anlamlıdır (2 uçlu)

Pearson korelasyon test sonuçlarının verildiği Çizelge 4'ten görüldüğü üzere 0,714* katsayı değeri de optik gözeneklilik ile hava geçirgenliği arasında doğrusal bir ilişki olduğunu ve bu ilişkinin kuvvetli olduğunu gösterirken 0,462 katsayı değeri ise geometrik gözeneklilik ile hava geçirgenliği arasında bir ilişki olmadığını bir kez daha istatistiksel olarak göstermiştir.

Daha önce de belirtildiği gibi kumaşlarda geometrik gözeneklilik değerleri çoğunlukla ilmek ve askı sayısına göre değişmekle birlikte, hava geçirgenlik değerlerinde aynı eğilim gözlenmemiştir. Bu fark, numunelerdeki ilmeklerin konumuna göre değişen gözenek boyutlarından kaynaklanmaktadır. Örneğin; 2 ve 3 nolu numuneler için, askılar aynı iğnelerdir, başka bir ifadeyle kumaşta askılar yer değiştirmeyip sabittir ve bundan dolayı bu numuneler zikzak desenli değildir. Diğer numuneler için, askılar her zaman aynı iğnelere üzerinde olmayıp desene göre farklı iğnelere üzerindedir. Numune 6 dışındaki askı içeren numunelerde askılar eşit bir şekilde yanyana iğnelere üzerine yerleştiği için bu numuneler tam zikzak desenlidir. Bu zikzak yapılar, kumaşta boyuna büzülme neden olur ve böylece gözenek boyutları küçülür. Diğer yandan, gözenek boyutu tam zikzak yapıdan uzaklaşmaya ve ardından kumaşın daha az büzülmesine paralel olarak artar ki 6 nolu numunede bu durum gözlenmiştir. Söz konusu etki sonucunda 6 nolu numune, daha az askı içermesine rağmen 7 nolu numuneden daha yüksek hava geçirgenlik değerine sahiptir. Aynı eğilim 4 ve 5 nolu numuneler için de gözlenmektedir. 5 nolu numunenin geometrik gözeneklilik değeri daha yüksek olmasına rağmen gözenekleri daha küçük olduğu için daha düşük hava geçirgenlik değerine sahiptir. Çünkü, 5 nolu numunede aynı iğnedeki askı sayısı 4 nolu numuneye göre daha fazladır ve bunun sonucunda

üst üste yer alan askılar kumaşın daha fazla çekmesine neden olmuştur. Dikkat çeken diğer bir husus ise askı sayıları aynı olan 7 ve 8 nolu numuneler için hem gözeneklilik değerlerinin hem de hava geçirgenlik değerlerinin farklı olmasıdır. Bu durumun zikzak desen alanı açısından 7 nolu numuneye göre 8 nolu numunede enine raporun daha geniş olması ve dolayısıyla kumaşın daha az çekmesine bağlı olarak gözeneklerin daha büyük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

4. SONUÇLAR

Çalışmanın tüm sonuçları değerlendirildiğinde, optik yöntem sadece gözenek boyutuna odaklandığından askılı örme kumaşların hava geçirgenliğini tahmin etmede optik gözenekliliği belirleyen görüntü analizinin, geometrik modellemeye göre daha uygun olduğu söylenebilir.

Askı, örme kumaşlara gözeneklilik kazandırsa da çalışma, hava geçirgenlik değerlerinin beklenenden farklı olarak tamamen askı sayısı ile paralel olmadığını ortaya koymuştur. Bunun nedeni, askıların kumaş içindeki yani iğnelere üzerindeki konumuna göre gözenek boyutlarının değişmesidir ki yüksek sayıda askı içeren zikzak kumaşların daha az hava geçirgenliğine sahip olması bu sonucu kuvvetli şekilde desteklemektedir.

5. KAYNAKLAR

1. Uyanık, S., Topalbekiroğlu, M., 2017. The Effect of Knit Structures with Tuck Stitches on Fabric Properties and Pilling Resistance. J. Text. Inst., 108(9), 1584-1589.
2. Ertekin, G., Marmaralı, A., 2011. Askı ve Atlamanın Düz Örgü Kumaşların Isıl Konfor

- Özelliklerine Etkileri. *Tekst. ve Muhendis*, 18(83), 21-26.
3. Uyanık, S., Duru Baykal, P., 2018. Vortex Örme Kumaşların Hava Geçirgenliği Üzerine Lif Cinsi, Karışım Oranı ve Kumaş Sıklığının Etkileri. 4. Uluslararası Lif ve Polimer Araştırmaları Sempozyumu (4.ULPAS), 4-5 Ekim 2018, UÜ, Bursa.
 4. Okur, A., 1993. Pamuklu Kumaşlarda Hava Geçirgenliği ile Kumaşın Bazı Yapısal Özellikleri Arasındaki İlişkiler Üzerine Bir Araştırma. *Tekst. ve Konfeksiyon*, 4, 292-299.
 5. Oinuma, R., 1988. Effect of Stitch Length on Some Properties of Cotton 1x1 Rib Knitted Fabrics. *J. Text. Machinery Soc. Jpn.*, 41(10), 543-548.
 6. Dubrovski, P.D., 2000. Volume Porosity of Woven Fabrics. *Text. Res. J.*, 70(10), 915-919.
 7. Mohammadi, M., Banks-Lee, P., 2002. Air Permeability of Multilayered Nonwoven Fabrics: Comparison of Experimental and Theoretical Results. *Text. Res. J.*, 72(7), 613-617.
 8. Bhattacharjee, D., Ray, A., Kothari, V.K., 2004. Air and Water Permeability Characteristics of Nonwoven Fabrics. *Indian J. Fibre Text. Res.*, 29, 122-128.
 9. Çay, A., Atav, R., Duran, K., 2007. Effects of Warp-weft Density Variation and Fabric Porosity of the Cotton Fabrics on Their Colour in Reactive Dyeing. *Fibres Text. East. Eur.*, 15 (1), 91-94.
 10. Havlová, M., 2013. Air Permeability and Constructional Parameters of Woven Fabrics. *Fibres Text. East. Eur.*, 98(2), 84-89.
 11. Militký, J., Havrdová, M., 2001. Porosity and Air Permeability of Composite Clean Room Textiles. *Int. J. Cloth. Sci.*, 13(3/4), 280-289.
 12. Çay, A., Vassiliadis, S., Rangoussi, M., Tarakçioğlu, I., 2004. On the Use of Image Processing Techniques for the Estimation of the Porosity of Textile Fabrics. *International Conference on Signal Processing, Istanbul-Turkey December 17-19*.
 13. Wilbik-Halgas, B., Danych, R., Wiecek, B., Kowalski, K., 2006. Air, and Water Vapour Permeability in Double-layered Knitted Fabrics with Different Raw Materials. *Fibres Text. East. Eur.*, 14(3), 77-80.
 14. Benltoufa, S., Fayala, F., Cheikhrouhou, M., Ben Nasrallah, S., 2007. Porosity Determination of Jersey Structure. *Autex Res. J.*, 7(1), 63-69.
 15. Öner, E., Okur, A., 2011. Materyal, Üretim Teknolojisi ve Kumaş Yapısının Termal Konfora Etkileri. *Tekst. ve Muhendis*, 17(80), 20-29.
 16. Ho, S.T, Hutmacher, D.W., 2006. A Comparison of Micro CT with Other Techniques Used in The Characterization of Scaffolds. *Biomaterials*, 27(8), 1362-1376.
 17. Mccanney, B., Mays, T.J., 1994. Characterization of Macropores Using Quantitative Microscopy. *Stud. Surf. Sci. Catal.*, 87, 327-337.
 18. Ramaswamy, S., Gupta, M., Goel, A., Aaltosalmi, U., Kataja, M., Koponen, A., Ramarao, B.V., 2004. The 3D Structure of Fabric and its Relationship to Liquid and Vapor Transport. *Colloids Surf., A Physicochem. Eng. Asp.*, 241, 323-333.
 19. Shinohara, T., 2011. Expression of Individual Woven Yarn for Structure Analysis of Textile Fabric Based on Fuzzy Clustering of Three-dimensional CT Image. *IECON 2011-37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2206-2211, Japan, Nov.*
 20. Desplentere, F., Lomov, S., Woerdeman, D., Verpoest, I., Wevers, M., Bogdanovich, A., 2005. Micro-CT Characterization of Variability in 3D Textile Architecture. *Compos. Sci. Technol.*, 65(13), 1920-1930.
 21. Doczyova, K., Glombikova, V., Komarkova, P., 2014. Application of Microtomography in Textile Metrology. *Tekstilec*, 57(1), 4-11.
 22. Castellini, C., Francini, F., Longebardi, G., Tribilli, B., Sansoni, P., 1996. On-Line Textile Quality Control Using Optical Fourier Transforms. *Opt. Lasers Eng.*, 24, 19-32.
 23. Thorr, F., Adolphe, D., Drean, J.Y., 1997. Study of Nonwovens Mass Reorganization Under Tensile Stress Thanks to a New Optical Sensor and Image Analysis. *Sens. Actuator.*, 62, 565-570.
 24. Çay, A., Vassiliadis, S., Rangoussi, M., Tarakçioğlu, I., 2007. Prediction of the Air Permeability of Woven Fabrics Using Neural Networks. *Int. J. Cloth. Sci.*, 19(1), 18-35.

25. Wardiningsih, W., 2009. Study of Comfort Properties of Natural and Synthetic Knitted Fabrics in Different Blend Ratios for Winter Active Sportswear. Master Thesis, RMIT University, Melbourne, June 2009, 187.
26. Uyanık, S., Merkepçi, M., 2019. An Experimental Study on Determination of Air Permeability in Knitted Fabrics by Image Processing Technique. III. Uluslararası AVRASYA Multidisipliner Çalışmalar Kongresi, Gaziantep-Türkiye, 4-7 Nisan 2019.
27. TS EN 14971, 2013. Tekstil-örülmüş kumaşlar-birim Uzunluk ve Birim Alan Başına Örgü İlmeği Sayısının Tayini.
28. TS EN 12127, 1999. Tekstil-kumaşlar-küçük Numuneler Kullanarak Birim Alan Başına Kütlenin Tayini.
29. TS 7128 EN ISO 5084, 1998. Tekstil-tekstil ve Tekstil Mamullerinin Kalınlık Tayini.
30. TS 391 EN ISO 9237, 1999. Tekstil-kumaşlarda Hava Geçirgenliğinin Tayini.
31. Ogulata, R.T., Mavruz, S., 2010. Investigation of Porosity and Air Permeability Values of Plain Knitted Fabrics, Fibres Text. East. Eur., 18(82), 71-75.
32. Pierce, F.T., 1947. Geometrical Principles Applicable to the Design of Functional Fabrics, Text. Res. J., 17, 123-147.

Optimization of Water Distribution System within Tented Camps

Abdullah ALHAMAD*¹ ORCID 0000-0003-1876-6285
Ayşe Yeter GÜNAL² ORCID 0000-0002-4866-2914

¹ Gaziantep University, Faculty of Engineering, Civil Engineering Department, Gaziantep

Geliş tarihi: 02.06.2021

Kabul tarihi: 21.03.2022

Atıf şekli/ How to cite: ALMAHAD, A., GÜNAL, A.Y., (2022). Optimization of Water Distribution System within Tented Camps. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37(1), 23-31.

Abstract

This paper proposes an optimized, gravity-looped water network for tented camps as a replacement of the water trucking method, which depends on conveying water from resource to water tanks set up within camps by trucks, allowing people to carry water through containers to their tent; this method is used to supply people live in tented camps with water when providing water cannot be met in other ways. The cost of installing the gravity-looped network is minimized using Linear Programming to select pipe diameters from commercially available pipes. The method proposed was developed by Alperovits and Shamir (1977) and modified by Goulter and Coal (1986); linear formulations were solved by MATLAB, builds upon results obtained from EPANET. Tulol camp, located in Syria, was chosen as a case study, being supplied with water by trucking. Diameter changes, after optimization, are observed where the total cost of pipes decreased by 9.75%.

Keywords: Linear programming, Gravity-looped networks, Tented camps, Water trucking, Water supplying

Çadır Kamplar İçerisinde Su Dağıtım Sisteminin Optimizasyonu

Öz

Bu makale, suyun kaynaktan kamplarda kurulan su tanklarına tankerlerle taşınmasına dayanan ve insanların çadırlarına su taşınmasına izin veren su taşıma yönteminin yerine, çadır kampları için optimize edilmiş cazibeli bir su şebeke ağı önermektedir; bu yöntem, başka yollarla su temini mümkün olmadığına, çadır kamplarında yaşayan insanlara su temin etmek için kullanılmaktadır. Cazibeli su şebeke ağının kurulum maliyeti, Doğrusal Programlama kullanılarak piyasada bulunan boru çapları seçilerek en aza indirilmiştir. Önerilen yöntem, Alperovits ve Shamir (1977) tarafından geliştirilmiş ve Goulter ve Coal (1986) tarafından modifiye edilmiştir; MATLAB tarafından çözülen lineer denklemler,

*Corresponding author (Sorumlu yazar): Abdullah ALHAMAD, alhamad.abdullah92@gmail.com

EPANET'ten elde edilen sonuçlara dayanmaktadır. Suyun tankerlerle sağlandığı Suriye'deki Tulol kampı vaka çalışması olarak seçilmiş ve toplam boru maliyetinin %9,75 azaldığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Doğrusal programlama, Yerçekimi döngülü ağlar, Çadır kampları, Su taşıma, Su temini

1. INTRODUCTION

Natural and human-made crises enforce people, in many cases, to leave their homes and lands, seeking safer places until they become able to return safely. Those people, who flee to other areas, may not find any place to live or settle in; hence, they live in tents within camps temporarily or maybe for prolonged times such as, Syria crisis, that entered its 9th year. Tents might be provided by governments, donors, or any civil organizations and supplied, in many situations, with water by trucks as a water distribution network is usually not in place. In Syria, for example, at most tented camps, water is provided by water trucking; the allocated amount ranges between 20 and 50 liters per capita per day. In this paper, supplying water at tented camps is improved by installing a water distribution network and using Linear Programming (LP) optimization to minimize capital cost by ensuring that hydraulic conditions are satisfied. The objective function of LP does not consider pump or operation cost, where the high tank is installed and supplies network with water, based on pressure and level water head differences. LP, employed in this study is derived from a model developed by Goulter and Coals [1] which is originated earlier by Alperovits and Shamir [2] with neglecting reliability constraint, that considers the number of breaks, as there is no historical data available of breaks rate occurred in past years [3-4]. Instead, to ensure the reliability of the network and maintain the provision of water to the consumer in case of any pipe's failure, a looped network was selected to be installed [5], as looped configuration provides alternative paths, connecting nodes with the resource. Linear Programming formulations are solved by using MATLAB [6,7], where inputs are obtained from EPANET [8], which is employed

to solve network, that uses basic hydraulic principal to analysis networks.

1.1. Water Supply in Camps

1.1.1. Water Needs in Emergencies

Sphere (Humanitarian Charter and Minimum Standards in Humanitarian Response) [9] mentions that all people in emergencies should have safe access to a sufficient amount of water for their basic needs for drinking, cooking, and hygiene, and according to its standards, minimum needs of water per person per day in emergency responses for people affected, should be 15 liters, as depicted in Table 1.

Table 1. Minimum needs of water per person per day [9].

Needs	Quantity (liters/person/day)	Adapt to context based on
Survival: water intake (drinking and food)	2.5–3	Climate and individual physiology
Hygiene practices	2–6	Social and cultural norms
Basic cooking	3–6	Food type and social and cultural norms
Total basic water	7.5-15	

The minimum amount of safe water (short-term survival level) that is required for drinking and implementation of basic hygiene such as cooking for an individual is 20 liters per day [10] (Figure 1).

Figure 1 shows the hierarchy of water requirements following Maslow's hierarchy of needs. The most important water needed is at the top of the hierarchy; in the short-term survival,

water required for drinking and cooking is more important than water, for example, for washing clothes. However, in the medium- and longer-term periods more water is needed for better meeting the health and other benefits.

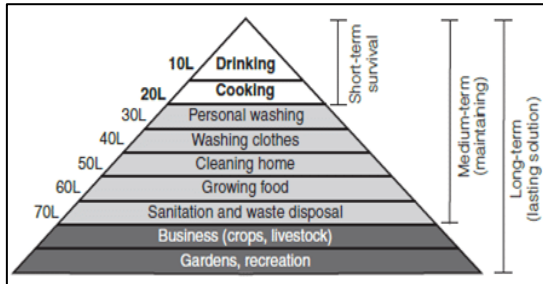


Figure 1. Hierarchy of water requirements (after Maslow’s hierarchy of needs) [10]

1.1.2. Water Trucking in Tented Camps

In UNHCR’s [11] paper; “water trucking can be a very quick method of providing a refugee population with access to life-saving quantities of safe drinking water. However, water trucking operations can be inefficient, expensive, time-consuming to administer, hard to monitor, and difficult to get out of once started. If a decision is made to start water trucking it must be carried out in a sanitary manner to ensure that water does not become contaminated and pose a risk to public health”. The amount of water provided to support life and health during disasters varies with the availability of water, disaster or crisis period, location of camps, funding (money donated to supply water). A dedicated person observes and monitors water points (water tanks) during supplying water to ensure that each family takes their allocated amount of water. Adopting the water trucking modality, to provide tented camps, has some negative implications, such as, in some cases, children help their parent collect water and carry the containers from tanks to their tent even for some times for long distance which causes a burden on both parents and children. FRC (Free Residual Chlorine), which is one of the water quality standards, should range between 0.2 to 0.5 mg/l [8] to maintain public safety and destroy pathogenic organisms, and exceeding these

values may cause various types of water-borne diseases. These values sometimes are not observed well and trucks, which provide camps with water, don’t consider these values during conveying from resource to consumers. FRC should be monitored to ensure that amount in water is ranged in its allowable values.

This paper proposes installing a gravity-looped network, consisting of a high tank, which is used to store water and feed network, pipes, and smart water meters. This system was selected instead of the pumping system, due to the operation cost of pumps, as at most tented camps in Syria, for instance, supplying water is based on donations. This network supplies water to each tent through pipes, and there is no need to carry out water by container to the tent from water tanks. To monitor that each family takes their allocated amount of water, each tent will be provided with a smart water meter set up on a pipe laid out inside their tent. The smart water meter is to limit the amount of water taken by each family by providing each family with a card, and this card will be charged weekly by the administration of the camp, determining the weekly amount of each family based on the number of members.

1.2. Minimum Pressure in Network

In any network, the pressure, which is one of the hydraulic conditions that should be satisfied, is expected to be kept between the minimum and maximum standards for safe, reliable, and economic operation.

The recommend values of pressure within water distribution system are [12]: above 0 m during emergencies, such as main breaks and power outages; more than 14 m (20 psi) under maximum day demand and fire flow conditions; more than 25 m (35 psi) under normal conditions; less than 70 m (100 psi) under normal conditions; within ± 7 m (± 10 psi) of average pressure greater than 95% of the time) to optimize WDS in regarding of reducing unnecessary water losses, main breaks, and/or energy usage.

Some countries [13] have their minimum standards under different conditions, their standards range between 10 m (14 psi) and 14 m (20 psi) at most to satisfy fire flow, or at some to satisfy normal conditions.

In camps, achieving these standards has no feasibility, where there is no sewer system, fire hydrants, multi-story buildings and the usage of water is limited to water their basic needs such as drinking and cleaning of clothes, where each tent has one faucet installed. Not to mention that to achieve high-pressure value in the network, pumps are required, or water tanks should be installed at a high level and in both more costs added to capital and operational costs.

Minimum pressure value should be determined during the design of the network, ensuring that the water supply is maintained and delivered to all consumers in all tents within camps.

2. METHODOLOGY

2.1. Analysis Tool

EPANET [7] software is employed to analyze the network, which uses basic hydraulic principles to solve and analyze the water distribution network, where the results obtained by this solver are prepared as an input file for MATLAB to start optimization. For this study MATLAB [8], was used to solve LP. It has varied built-in functions to solve different types of optimization problems algorithms; such as, Linear programming, Non-linear programming, Genetic Programming...etc.

2.2. Optimization by Using Linear Programming and MATLAB

This approach [1, 6, 14], which seeks to determine the pipe diameters and associated lengths to minimize the cost of the network with maintaining and satisfying initial hydraulic criteria and reliability requirements, is originated from a model developed by Alperovits [2] and Shamir, which in turn developed by Goulter and Coals [1] with modification related to reliability consideration, as follows:

1. Objective Function:

Minimization of network Cost (Equation 1).

$$\text{Cost (c)} = \sum_{j=1}^{NI} \sum_{k=1}^{n(j)} C_{jk} X_{jk} \quad (1)$$

Where;

C: total cost of the network (\$)

C_{jk} : cost of pipe of diameter k in link j (\$/m)

X_{jk} : associated length of pipe of diameter k in link j (m)

NI: total number of links within the system

n(j): number of different pipe diameters in link j

j: link index

k: diameter type index

Subjected to the following constraints

2. Constraints:

1. Length: the sum of the lengths of link j in each link equals the total link's length j, where a link represents a pipe connecting two nodes directly (Equation 2).

$$L = \sum_{k=1}^{n_j} L_{oj} \quad (2)$$

Where; L_{oj} : equals the total length of link j

2. Head loss: minimum permissible head at each node must be satisfied (Equation 3).

$$H_0 - \sum_{j=1}^{NI} \sum_{k=1}^{n(j)} J_{jk} X_{jk} \geq H_{\min} \quad (3)$$

For all nodes

Where; J_{jk} : Stands for the hydraulic gradient of link J

H_{\min} : Minimum permissible head at any node.

3. Loop: for a looped system, the total head loss around a loop must equal zero (Equation 4).

$$\sum_{j=p'(b)}^{NI} \sum_{k=1}^{n(j)} J_{jk} X_{jk} = B_p \quad (4)$$

Where; $p'(b)$ = links in the path associated with net head loss B_p , in looped network B_p equals 0.

4. non-negativity: which assumes that all pipe length is positive (Equation 5.)

$$X_{jk} \geq 0 \quad (5)$$

5. Reliability: an estimate of reliability is embedded into this constraint which limits the expected (average) number of leakages or breaks in a given period in any link within the network (Equation 6).

$$X_{jk} r_{jk} \leq R_j \quad (6)$$

r_{jk} : number of the expected number of break /m/yr for diameter k in link j

R_j : maximum allowable number of failures per year in link j.

However, due to the unavailability of historical data [3-4] on the number of breaks rate, this constraint will be neglected during preparing this study. This type of data might not be available, particularly in countries that have conflict, displacement, missing, or losing documents at the municipality which keeps records.

To analyze and minimize the total cost of water distribution network, the following steps of the algorithm are considered:

Step 1 of the algorithm: Analysis of network by EPANET

Hydraulic properties and components of network are defined in EPANET, which include pipes' diameters, lengths, node demand, coefficients, elevations, and hydraulic analysis options.

Step 2 of the algorithm: Obtain results from EPANET.

The analysis is run and obtained results, which are flows' rates and directions, are prepared to be used in optimization formulations.

Step 3 of the algorithm: Prepare inputs of Linear programming

The required inputs for Linear Programming are links' (pipes) lengths and the outputs of the analysis, which are the flow rate for each pipe in between two nodes.

The Linear Programming uses the Hazen William equation to determine the unit head loss that is used in constraints of alternative diameters in each link.

Step 4 of the algorithm: Analysis Using Linear Programming (LP) by MATLAB.

LP optimization, by utilizing objective function and constraints, tries to find the best optimal diameter, satisfying hydraulic conditions.

MATLAB program solves any linear program by defining matrices for inequalities, equalities, low bound, upper bound, and objective function; where unknown variables are associated lengths of diameters at any link, not pipe diameters.

The predefined available diameters for any link of the network are 16, 20, 25, 32, 40, and 50; and associated cost and lengths for these diameter types are C1, C2, C3, C4, C5, C6 and X1, X2, X3, X4, X5, X6

The objective function for any sample link is:

$$F = C_1 * X_1 + C_2 * X_2 + C_3 * X_3 + C_4 * X_4 + C_5 * X_5 + C_6 * X_6$$

These variables are subject to constraints in Equations (2, 3, 4, and 5)

After preparing all matrices of objective function and constraints in MATLAB, optimization started by writing in commend window, as follows:

$[X, Z] = \text{linprog}(f, A, b, A_{eq}, b_{eq}, lb, ub)$

As,

X: Variable Vector;

Z: Objective function Value;

f: Object function;

A, b: Inequality matrices;

Aeq, beq Inequality matrices;

lb, ub: Lower bounds and upper bounds of values of variables X

Optimization, then, is terminated, and results obtained.

Step 5 of the algorithm: Output of Linear Programming Optimization

After the results are obtained, the respective diameters of each link j are observed and the diameter with higher length is chosen for each link [6-14], as EPANET cannot split a link to more than one pipe. The chosen diameters to all links are prepared as input for EPANET and the solver is re-run again. The results obtained are used to

compare if the following conditions are stratified or not.

1. Are the design conditions satisfied?
2. Is the flow direction constant?

If the answer is yes; then results are maintained, and the algorithm is terminated.

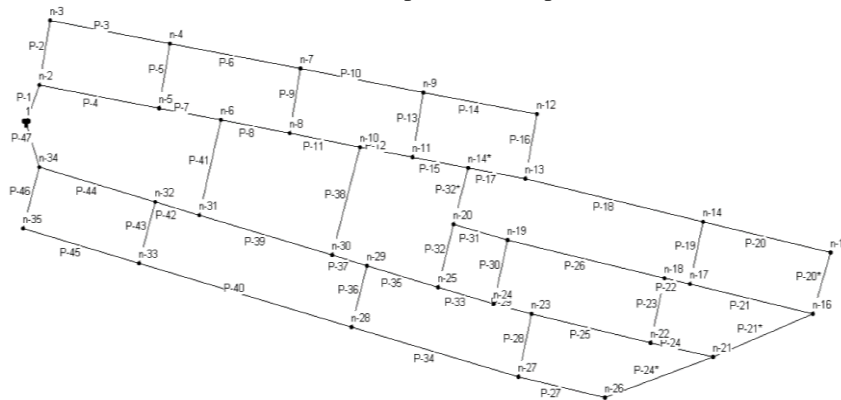
If the answer is no, the procedures followed are maintained for all the links with updated results until all conditions are satisfied [6-14].

2.3. Description of Case Study Area

Tulol camp is located in Tulol in the Northwest of Syria in Idleb governorate. It extends on an area of 19500 m² and hosts approximately 1,020 Internally Displace Persons (IDPs), living in 170 tents. (Figure 2)



A. Aerial photo of camp



B. Drawing of pipes and nodes (EPANET).

Figure 2. Tulol camp layout

2.4. Water Supplying in Tulol Camp

Tulol camp is provided by water trucking; the water amount per person per day is 35 liters. Gravity-looped water distribution network will be installed with a high tank to store water and feed network, pipes and a smart water meter, to deliver water to each tent, considering water amount per person per day is 50 liters. Five different diameters were used in the analysis of design, which are 16, 20, 25, 32, and 40 mm, satisfying hydraulic conditions.

The 3-meter head pressure was selected in the network as minimum pressure at all points (i.e

pressure at each point should be equal to or more than 3 meters).

3. RESULT AND DISCUSSION

The proposed network is analyzed by EPANET, and outputs (results) obtained were used in MATLAB, which in turn, solved LP formulations. The results obtained accordingly shows an additional 50mm diameter in the network added and it has 6 different diameters (layout of the camp is updated as shown in Figure 3, comparing layout before and after optimization)

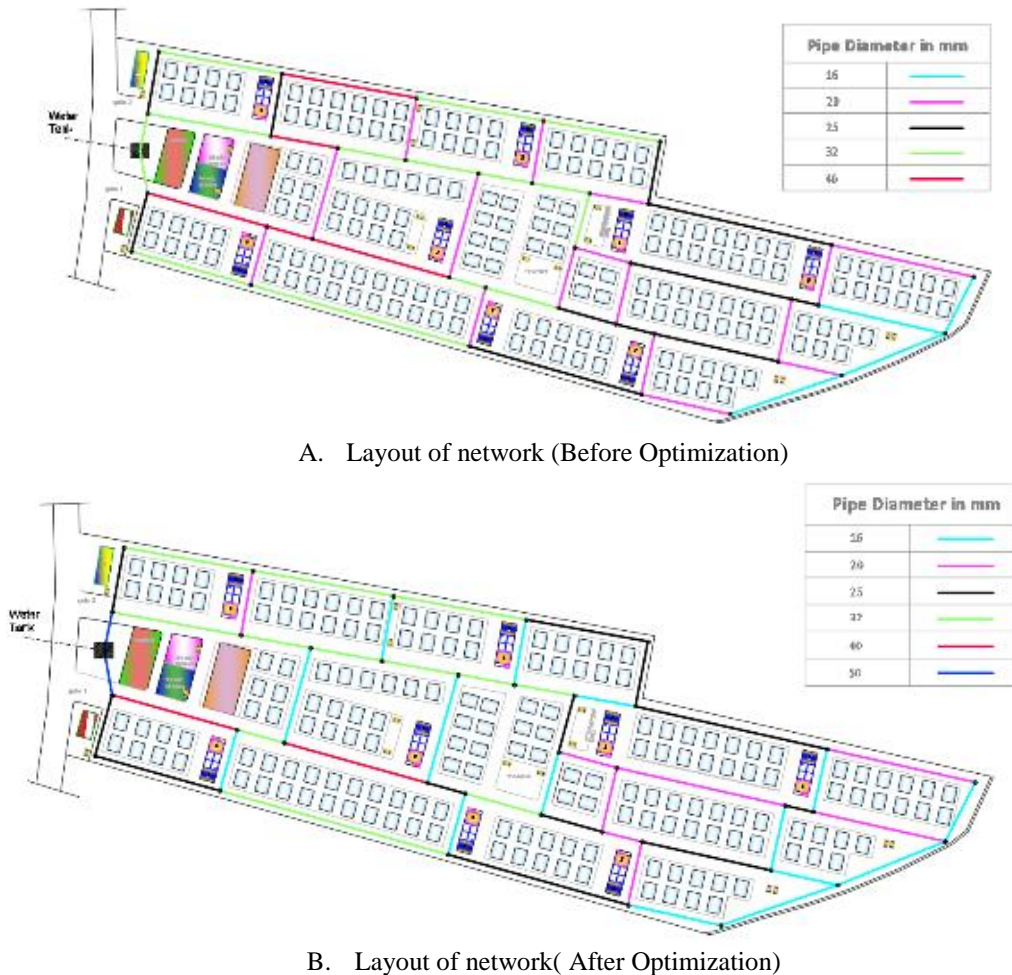


Figure 3. Comparison before and after optimization

Analysis of network with regards to;

1. Cost: A comparison of the cost of pipes before and after optimization indicates that solving the Linear Programming optimization equations by MATLAB, led to a decrease in capital cost of pipes in the water distribution network by 9,75% with satisfying hydraulic conditions.

2. Pressure: One can notice that the pressures after optimization increased comparing to pre-optimization analysis, as the two main pipe feeding system, which are p-1 and p-47 have larger diameter after optimization. This indicates that the pressure increases with in flow rate and increase in pipe diameters within the nodes. The maximum pressure in initial proposed system is at node 2 of value 8.32m while the same node has the maximum pressure of value 9.82m after optimization.

3. Consumption Controlling: Setting up a smart water meter will guarantee that each family draws its allocated amount of water from the network without exceeding or drawing an extra amount allocated to other families.

4. Quality of Water: Free Residual Chlorine (FRC) will be monitored effectively and closely to ensure 0.2 and 0.5 mg/l would be in this range without any violation, as camp administration will take a sample of water before running water into the network to monitor FRC range.

5. Reliability: Experience has shown that when a network is designed for a single loading unless a minimum diameter is specified for all pipes, the optimal network will have a branching configuration [2]. So, to maintain looped network configuration after optimization, a minimum diameter was predefined for each link.

4. CONCLUSION

As a conclusion of this study, installation of an optimized water distribution system at tented camps would play the main role in enhancing access to water service during crises and disasters, particularly in situations and circumstances where

people would have to live for a prolonged duration at tented camps and water trucking is the only available method. Besides, installed system would maintain lives of affected persons against water-borne diseases through observing water's quality. The capital cost of a water distribution system is enormous relatively. As a result, engineers and acting organizations who intervene during emergencies are looking for new method of designing water distribution systems with a minimum cost that satisfies affected people's demands. In this research, the methodology of ensuring minimization of objective function is Linear Programming that uses linear objective function and constraints with considering lengths and associated diameter as variables.

5. RECOMMENDATIONS

This study gives a crucial and initial step to promote resilience of affected people and enhance water supplying in tented camps with improving accessibility to water services. Future works may focus more on including all system components in objectives; such as, high tank's location and sizing to reach low-cost objective. Moreover, other studies about installation of an optimized sewer and treatment of water system may be associated with the design of a water network to bring about a greater impact.

6. REFERENCES

1. Goulter, I.C., Coals, A.V., 1986. Quantitative Approaches to Reliability Assessment in Pipe Networks. *Journal of Transportation Engineering*. 112(3), 287-301.
2. Alperovits, E., Shamir, U., 1977. Design of Optimal Water Distribution Systems. *Water Resources Research*. 13(6), 885-900.
3. Ghorbanian, V., Guo, Y., Karney, B., 2016. Field Data-based Methodology for Estimating the Expected Pipe Break Rates of Water Distribution Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142(10). 04016040-1- 04016040-11.
4. Wang, Y., Zayed, T., Moselhi, O., 2009. Prediction Models for Annual Break Rates of

- Water Mains. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 23(1), 47-54.
5. Martínez, R., José, Bi., 2010. Cost and Reliability Comparison Between Branched and Looped Water Supply Networks. *Journal of Hydro informatics*, 12(2), 150-160.
 6. Danladi, B., Alayande, W., Otun, J., Ismail, A., 2015. Optimization of the Designed Water Distribution System Using MATLAB. *International Journal of Hydraulic Engineering*, 4(2), 37-44.
 7. Gilat, A., 2004. *MATLAB: An Introduction with Applications*. 2nd Edition, John Wiley & Sons.
 8. Rossman, L., 2000. *EPANET User's Manual*. Cincinnati: Environmental Protection Agency.
 9. Sphere Association, 2018. *The Sphere Handbook: Humanitarian Charter and Minimum Standards in Humanitarian Response*. Fourth edition, Geneva, Switzerland.
 10. WHO (World Health Organization). Website: www.who.int/water_sanitation_health/emergencies/WHO_TN_09_How_much_water_is_needed.pdf?ua=1, 2009.
 11. UNHCR (United Nations High Commissioner for Refugees). Website: <http://wash.unhcr.org/wpcontent/uploads/2019/06/1.-Briefing-Note-on-Water-Trucking-in-Refugee-Settings-UNHCR-2018.pdf>, 2018.
 12. Friedman, M., Kirmeyer, G., Lemieux, J., LeChevallier, M., Seidl, S., Routt, J., 2020. Criteria for optimized distribution systems. *Water Research Foundation*, 106(11), 503-514.
 13. Ghorbanian, V., Karney, B., Guo, Yi., 2016. Pressure Standards in Water Distribution Systems: Reflection on Current Practice with Consideration of Some Unresolved Issues. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142(8), 04016023-1-04016023-8.
 14. Akdoğan, T., 2005. *Design of Water Distribution System by Optimization Using Reliability Considerations*, Doctoral Dissertation, Middle East Technical University, 104.

Enhancement of Surface Area of Cordierite Structure by Oxalic Acid Treatment for SCR Applications

Himmet ÖZARSLAN*¹ ORCID 0000-0002-1614-3343
Ali KESKİN¹ ORCID 0000-0002-1089-3952

¹Çukurova University, Faculty of Engineering, Department of Automotive Engineering, Adana

Geliş tarihi: 19.01.2022

Kabul tarihi: 21.03.2022

Atıf şekli/ How to cite: ÖZARSLAN, H., KESKİN, A., (2022). Enhancement of Surface Area of Cordierite Structure by Oxalic Acid Treatment for SCR Applications. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37(1), 33-41.

Abstract

Cordierite ($2Al_2O_3-5SiO_2-2MgO$) is the main carrier structure that enables the positioning of catalytic nanoparticles on the exhaust pipe in the selective catalytic reduction (SCR) applications. In order to be loaded more catalytic nanoparticles into this structure, it must be modified by acid treatment. In our study, these structures were treated with the different oxalic acid ratios for 2 and 4 hours. Brunauer, Emmet and Teller (BET) analysis were employed to measure the surface areas of acid-treated cordierite structures and scanning electron microscope-energy dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDS) analysis was used to examine morphological structures of them. In consideration of BET analysis result, the surface area measurements of these structures reached up to $163.601 \text{ m}^2/\text{g}$. The obtained value was about 327 times greater than the surface area of no treatment cordierite. In result of the SEM analysis, while the percentage of aluminum (Al) and magnesium (Mg) elements on the surface of these structures decreased, that of silicon (Si) increased. The reason of the high surface area is the formation of the pure amorphous silica due to the removal of Al and Mg ions from the surface of the cordierite. Thus, further coating of the catalytic nanoparticles on the cordierite surface could be allowed. As a result of this study, it could be said that the acid amount of the solution and the acid treatment duration enhances the surface area of the cordierite.

Keywords: Cordierite, Oxalic acid, Chemical etching process, BET, SEM

SCR Uygulamaları için Oksalik Asit İşlemi ile Kordiyerit Yapının Yüzey Alanının İyileştirilmesi

Öz

Kordiyerit ($2Al_2O_3-5SiO_2-2MgO$) seçici katalitik indirgeyici (SCR) uygulamalarında katalitik nanopartiküllerin egzoz borusu üzerinde konumlandırılmasını sağlayan ana taşıyıcı yapıdır. Bu yapıya daha fazla katalitik nanopartikül yüklenebilmesi için asit işlemi ile modifiye edilmesi gerekmektedir.

*Corresponding author (Sorumlu yazar): Himmet ÖZARSLAN, hozarслан@cu.edu.tr

Çalışmamızda bu yapılar 2 ve 4 saatlik sürelerde farklı oksalik asit oranları ile muamele edilmiştir. Asitle muamele edilmiş kordiyerit yapıların yüzey alanları Brunauer, Emmet ve Teller (BET) analizi ile ölçülmüş ve taramalı elektron mikroskopu-enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (SEM-EDS) analizi ile morfolojik olarak incelenmiştir. BET analiz sonucuna göre bu yapıların yüzey alanı ölçümleri $163,601 \text{ m}^2/\text{g}$ 'a ulaşmıştır. Elde edilen bu değer, işlem görmemiş kordiyeritin yüzey alanından yaklaşık 327 kat daha fazladır. SEM analizi sonucunda bu yapıların yüzeyindeki alüminyum (Al) ve magnezyum (Mg) elementlerinin yüzdesi azalırken, silikonun (Si) yüzdesi artmıştır. Yüksek yüzey alanının nedeni, kordiyerit yüzeyinden Al ve Mg iyonlarının uzaklaştırılması nedeniyle saf amorf silikanın oluşmasıdır. Böylece, kordiyerit yüzeyi üzerinde katalitik nanoparçacıkların daha fazla kaplanmasına izin verilebilir. Bu çalışmanın sonucunda çözeltinin asit miktarının ve asitle muamele süresinin kordiyerit yüzey alanını arttırdığı söylenebilir.

Anahtar Kelimeler: Kordiyerit, Oksalik asit, Kimyasal aşındırma işlemi, BET, SEM

1. INTRODUCTION

SCR procedure is an effective emission control system aiming to reduce NO_x emissions from diesel engines. The main components of this procedure are reductant and catalyst. A variety of reductants such as ammonia (NH_3) [1,2], carbon monoxide (CO) [3], hydrogen (H_2) [4], and hydrocarbons (HC) [5,6] have been investigated for removing of NO_x emissions in the SCR systems.

Catalyst structures used in SCR applications consist of washcoat, active metal components, and substrate material. The basic function of the washcoat materials contributes to increase of surface area required for the dissipation and storing of catalytic metal components. Inorganic base metal oxides such as Al_2O_3 (alumina), SiO_2 (silica), TiO_2 (titanium oxide), CeO_2 (ceric oxide), ZrO_2 (zirconia), V_2O_5 (vanadium pentoxide), La_2O_3 (lanthanum oxide), ZnO (zinc oxide), and zeolites are used as the washcoat materials [7–12]. Some washcoat materials serve as secondary carrier support materials and others display catalytic activity. Active metal components display catalytic activity and consist of various precious metals (such as silver, copper, platinum, and palladium etc.), and oxides of base metals (such as vanadium, molybdenum, cerium, and tungsten etc.). Substrate materials are used as the main carrier structure in SCR applications. Cordierite ($2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$) is preferred as a widespread carrier structure material, because of

high heat resistance based on low thermal expansion property, adequate refractoriness property based on exceeding 1450°C of the melting point, pore size distribution and porosity which are facilitated both washcoat application and successful washcoat adhesion [9,13]. Monolith cordierite substrate is also widely used as the main carrier structure in other emission control systems such as diesel oxidation catalyst (DOC), lean NO_x trap (LNT), diesel particulate filter (DPF), and three way catalytic converter (TWC) applications [14–17].

In catalyst production, the cordierite coated with large amounts of the active catalytic metal components can be a significant parameter for its catalytic efficiency [18–20]. The increasing the surface areas of cordierite structures will allow more catalytic material to be coated on the surface [21]. The specific surface area of the cordierite is less than $1 \text{ m}^2/\text{g}$. Therefore, it is impossible to acquire highly dispersed and quite active catalysts by coating of the active catalyst components directly on the cordierite [22].

Researchers have conducted various studies on the modification of the cordierite. Table 1 summarizes the studies about increasing the surface area of the cordierite structure in the literature. All samples were immersed in different acid solutions at various durations. The surface areas of the cordierite increased from $0.5 \text{ m}^2/\text{g}$ to $255 \text{ m}^2/\text{g}$ in the study of Shigapov et. al. The surface area of the original cordierite was increased by 500 times due to acid treatment process [22].

Table 1. Summary of studies on the pretreatment of cordierite with various acids

Type of cpsi	Chemical etching conditions	BET area (m ² /g)	Ref.
400	No treatment (Blank cordierite)	0.5	[22]
400	10% Oxalic acid, boiling for 2h	38	
400	50% Oxalic acid, boiling for 2h	104	
400	50% Oxalic acid, boiling for 7h	255	
400	50% Oxalic acid, boiling for 1h	59	
400	8% EDTA, boiling for 1h	0.6	
400	50% Citric acid, boiling for 1h	11	
400	26% HNO ₃ , boiling for 2h	45	
400	1.25% HCl, at RT** for 18h	0.9	
400	37% HCl, at RT** for 24h	4.3	
400	10% HCl, at RT** for 24h and boiling for 1h	57	
400	37% HCl, boiling for 35 min.	28	
400	37% HCl, boiling for 2h	96	
400	37% HCl, boiling for 2h*	121	
400	37% HCl, boiling for 3h*	185	
400	37% HCl, boiling for 4h*	223	
400	37% HCl, boiling for 6h*	241	
400	37% HCl, boiling for 8h*	218	
300	20% HCl, boiling for 3h*	187	
300	20% HCl, boiling for 5h*	222	
400	No treatment (Blank cordierite)	0.5	[23]
400	20% H ₂ SO ₄ at 90°C for 3h	81	
400	20% H ₂ SO ₄ at 90°C for 6h	227	
400	No treatment (Blank cordierite)	0.17	[24]
400	65% HNO ₃ , boiling for 3h	116.88	
200	No treatment (Blank cordierite)	0.7	[25]
200	20% Oxalic acid for 6h	107.7	
200	35% Oxalic acid for 6h	148.2	
200	50% Oxalic acid for 6h	199.6	
400	No treatment (Blank cordierite)	1.25	[26]
400	68% HNO ₃ at 110°C for 3h	7.88	
400	68% HNO ₃ at 110°C for 6h	14.65	
400	68% HNO ₃ at 110°C for 9h	23.69	
400	68% HNO ₃ at 110°C for 12h	41.95	
200	No treatment (Blank cordierite)	0.7	[27]
200	50% Oxalic acid, boiling	200	
400	No treatment (Blank cordierite)	0.05	[28]
400	26% HNO ₃ , boiling for 2h	82.59	
400	No treatment (Blank cordierite)	0.5	[29]
400	50% Oxalic acid - 100°C for 3h	104.72	

*The solution was refreshed with new solution per every hour.

**RT is the abbreviation for room temperature.

In this study, it was aimed to enhance the cordierite surface area and to create a suitable surface for the positioning of catalyst nanoparticles before coating. The cordierite structure was pretreated by using different ratios of oxalic acid

under various conditions. The surface areas of acid-treated cordierite structures were measured by BET analysis and morphologically examined by SEM-EDS analysis.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1. Acid Treatment and Characterization

Ceramic cordierite having a cell density of 400 cpsi (cells per square inch) and a length of 100 mm, diameter of 130 mm was used in this study. Cordierite test specimens were cut from blank cordierite with the same dimensions as seen in Figure 1. These structures were pretreated at different durations and at various oxalic acid ($C_2H_2O_4 \cdot 2H_2O$) ratios in order to enhance the specific surface area at the first stage of catalyst production. The properties of oxalic acid are shown in Table 2. The conditions of experiments carried out with oxalic acid are summarized in Table 3.

Table 2. Oxalic acid specifications

Formula	= $C_2H_2O_4 \cdot 2H_2O$
Molar	= 126.07 g/mol
Assay (manganometric)	≥ 99.0%
Chloride (Cl)	≤ 0.002%
Sulfate (SO_4)	≤ 0.02%
Heavy metals (as Pb)	≤ 0.002%
Total nitrogen (N)	≤ 0.005%
Iron (Fe)	≤ 0.001%
Residue on ignition (800 °C as sulfate)	≤ 0.05%

Table 3. Conditions of oxalic acid treatment

Sample	Chemical etching conditions
S1	10% Oxalic Acid + 90% H_2O - 100°C for 2h
S2	10% Oxalic Acid + 90% H_2O - 100°C for 4h
S3	20% Oxalic Acid + %80 H_2O - 100°C for 2h
S4	20% Oxalic Acid + %80 H_2O - 100°C for 4h
S5	30% Oxalic Acid + 70% H_2O - 100°C for 2h
S6	30% Oxalic Acid + 70% H_2O - 100°C for 4h
S7	40% Oxalic Acid+ 60% H_2O - 100°C for 2h
S8	40% Oxalic Acid + 60% H_2O - 100°C for 4h
S9	50% Oxalic Acid + 50% H_2O - 100°C for 2h
S10	50% Oxalic Acid + 50% H_2O - 100°C for 4h

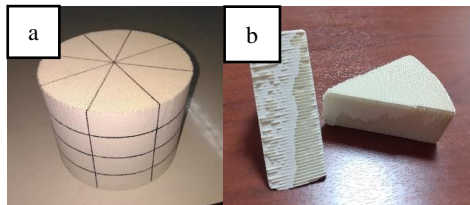


Figure 1. a) Determining appropriate dimensions, b) The cut cordierite structures

The cordierite structure was cut to appropriate dimensions for experiments as seen in Figure 1. All samples were treated with oxalic acid under specified conditions. Acid treatments were done by heater with the magnetic stirrer at 100°C as shown in Figure 2. After acid treatment, they were washed with pure water until the pH was neutral. The pretreated pieces were baked at 110°C for 1 hour to dry. Finally, they were then calcined at 550°C for 3 hours to remove impurities as shown in Figure 3.



Figure 2. Acid treatment of the samples



Figure 3. Calcination

After acid treatment, the surface areas of all samples were measured based on the nitrogen (N_2) gas adsorption technique at 77 K liquid nitrogen environment by BET method. The FEI Quante 650 FEG SEM was used to have information about the morphological structures of the samples. The samples coated with a conductive material (gold) of 2 Å/s were examined at an acceleration voltage of 20 kV. EDS detector was used to examine elemental analysis of the surfaces of the samples

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1. BET Surface Area Results

The BET analysis results of 10 samples were presented in Table 4. The cordierite structures consist of mostly SiO_2 , MgO and Al_2O_3 structures. SiO_2 is acid, MgO is alkali and Al_2O_3 exhibits amphoteric. Therefore, when cordierite was treated

with acid, the pure amorphous silica on the cordierite surface formed because of the removal of Mg ions and Al ions on the cordierite surface. This situation causes an increment in the cordierite surface area [21,22]. A surface area of 64.245 m^2/g was obtained for the S1 sample. When the amount of oxalic acid and the applied time were increased at the same temperature, the surface area value of the S10 sample was obtained as 163.601 m^2/g . This value is about 327 times higher than the surface area of the blank cordierite as seen from results in Table 4. In the literature, it was observed that increasing the duration applied at a constant acid rate increases the surface area of the cordierite [22,23,26]. Also, at a given duration in acid treatment process, the surface area can be increased as the acid content of the solution increases [22,25]. The duration applied and the change in acid content of the solution in this study are similar to the studies in the literature.

Table 4. BET analysis results of acid treated cordierite

Sample	Chemical etching conditions	BET surface area (m^2/g)
S1	10% Oxalic Acid + 90% H_2O - 100°C for 2h	64.245
S2	10% Oxalic Acid + 90% H_2O - 100°C for 4h	67.10
S3	20% Oxalic Acid + %80 H_2O - 100°C for 2h	70.536
S4	20% Oxalic Acid + %80 H_2O - 100°C for 4h	120.511
S5	30% Oxalic Acid + 70% H_2O - 100°C for 2h	71.061
S6	30% Oxalic Acid + 70% H_2O - 100°C for 4h	123.566
S7	40% Oxalic Acid + 60% H_2O - 100°C for 2h	74.633
S8	40% Oxalic Acid + 60% H_2O - 100°C for 4h	157.604
S9	50% Oxalic Acid + 50% H_2O - 100°C for 2h	85.235
S10	50% Oxalic Acid + 50% H_2O - 100°C for 4h	163.601

3.2. SEM-EDS Analysis Results

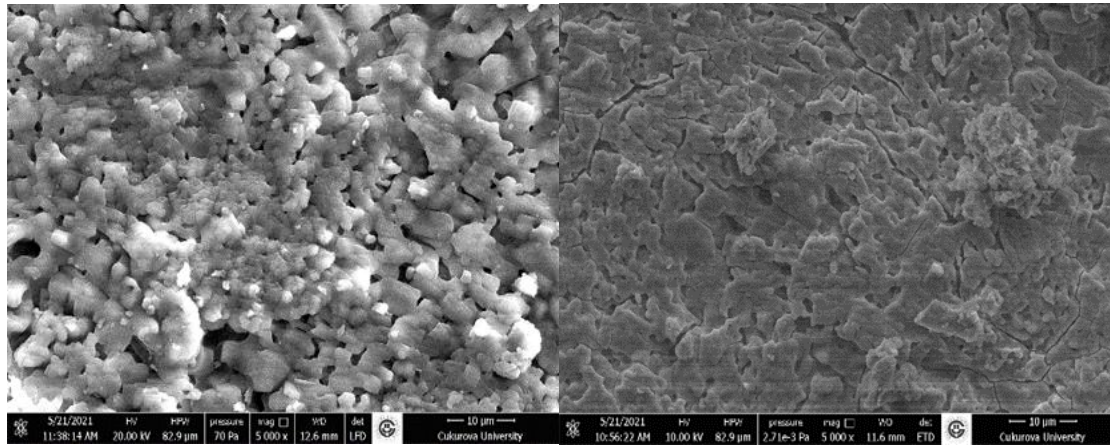
Surface morphologies of S10 sample and the cordierite were shown in Figure 4 by SEM images

with 5000x magnification. When examined by SEM after chemical etching process, it can be discerned that cracks are formed on the surface of the cordierite structure on SEM image of S10

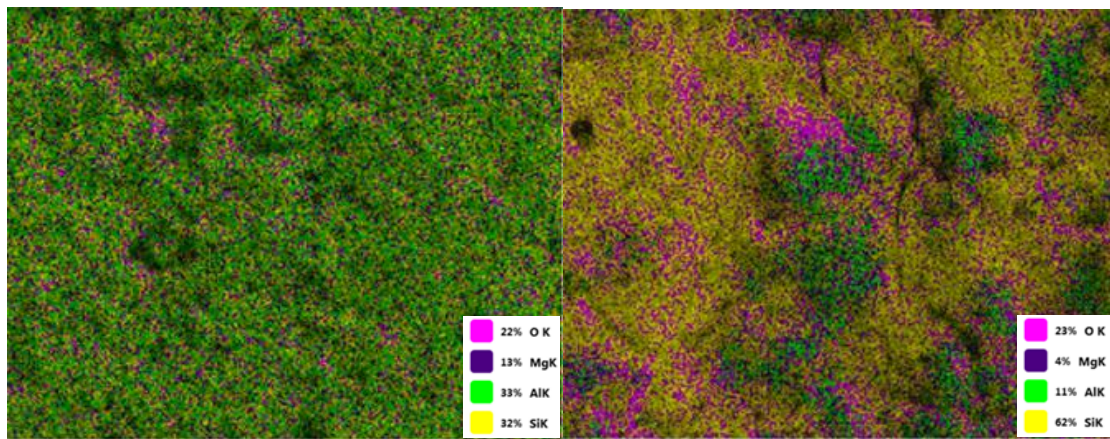
sample in Figure 4. It can be clearly demonstrated that these cracks, which are formed as a result of acid etching, lead to an increment in the surface area of cordierite. In this case, enhancement of the specific surface area of cordierite for catalyst production allows for the generation of more active sites and better distribution of active ingredients on the surface.

In Figure 5, SEM mapping images of acid etched cordierite and untreated cordierite structure are available. It can be seen that correspond to silicon (Si) as the yellow spots, aluminum (Al) as the green spots, magnesium (Mg) as the purple spots,

and oxygen (O) particles as the pink spots on the SEM images. From the results of this analysis, it could be understood that after acid etching, Al and Mg ions are dissolved from the surface of the cordierite and their ratios decrease. Also, it caused the formation of amorphous silica. SEM-EDS results of acid etched cordierite and untreated cordierite structure are given in Figure 6. SEM-EDS results gave information about the change of cordierite surface after chemical etching. It can be discernible that the weight and atomic ratios of the elements vary. Finally, similar results were obtained for SEM-EDS and mapping analysis.

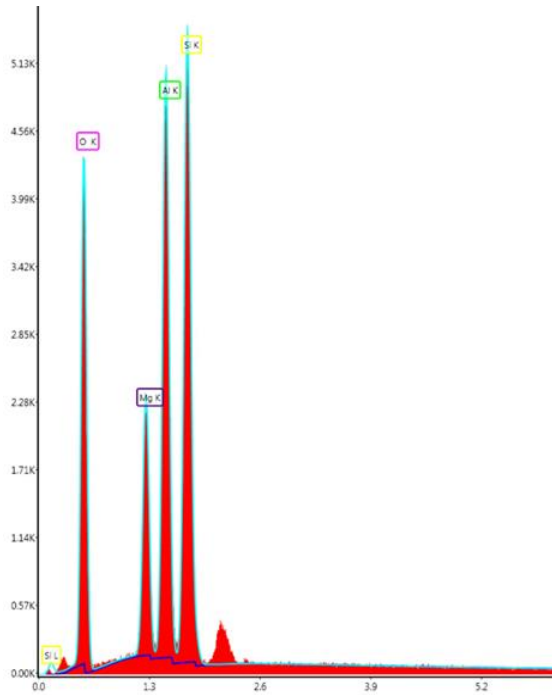
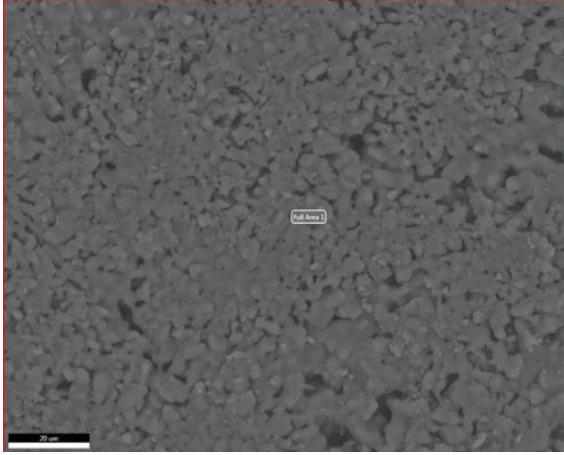


(a) (b)
Figure 4. SEM images of (a) Cordierite, (b) S10



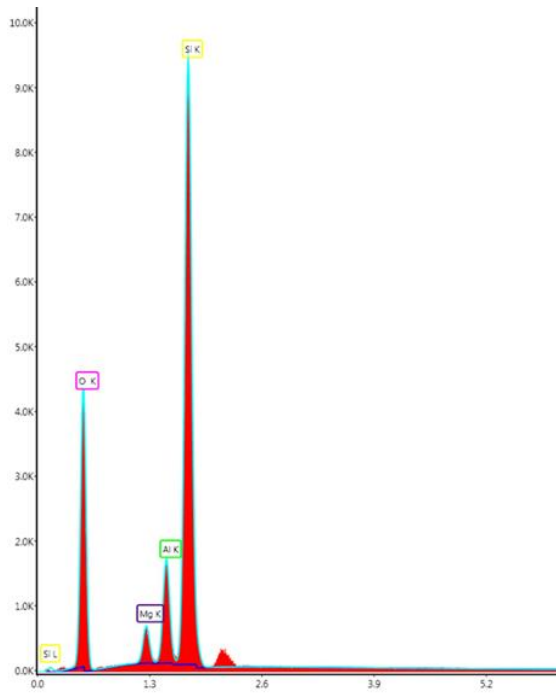
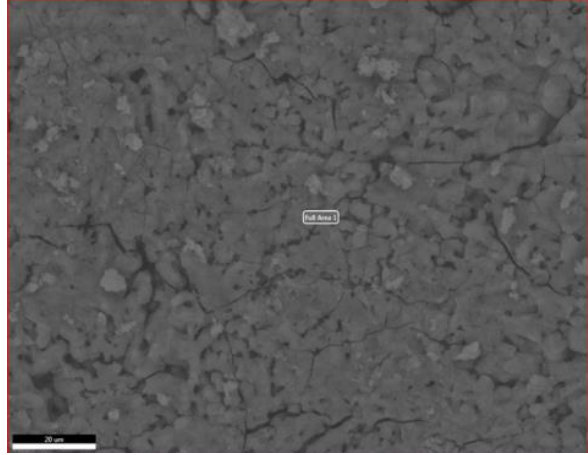
(c) (d)
Figure 5. SEM mapping results of (c) Cordierite, (d) S10

Cordierite



Elements	EDS		
	Weight (%)	Atomic (%)	Net int.
O K	42.77	55.78	679.75
Mg K	9.17	7.87	400.9
Al K	21.16	16.36	934.25
Si K	26.91	19.99	1043.58

S10



Elements	EDS		
	Weight (%)	Atomic (%)	Net int.
O K	47.92	61.44	687.53
Mg K	2.69	2.27	101.66
Al K	6.98	5.31	303.08
Si K	42.42	30.98	1848.69

Figure 6. SEM-EDS images and results

4. CONCLUSION

In this study, it could be concluded that increasing the duration applied at a constant acid rate increases the surface area of the cordierite. Also, at a given duration in chemical etching process, the surface area can be enhanced as the acid amount of the solution rises. The surface area value of 163.601 m²/g obtained by acid treatment of cordierite increased approximately 327 times from the value before acid treatment. As can be seen from the SEM analysis results, the percentage of Mg and Al ions decreased and the percentage of Si increased. After the acid treatment of cordierite, the pure amorphous silica was formed due to the removal of Mg and Al ions on the cordierite surface. Thus, the SEM analysis results supported the change of the cordierite surface in relation to the increase in the BET surface area values of the cordierite structure. It was understood that after acid treatment, the rough and porosity surface structure of cordierite is preserved. Increasing the specific surface area of cordierite for catalyst production can be resulted in better distribution of active ingredients on the surface and formation of more active sites.

5. INFORMATION

This study belongs to the PhD graduation project.

6. REFERENCES

1. Zhang, X., Wu, Q., Diao, Q., Wang, J., Xiao, K., Yang, B., Wu, X., 2019. Performance Study for NH₃-SCR at Low Temperature Based on Different Methods of Mn_x/SEP Catalyst. *Chemical Engineering Journal*, 370, 364–71.
2. Wu, R., Li, L., Zhang, N., He, J., Song, L., Zhang, G., Zhang, Z., He, H., 2020. Enhancement of Low-temperature NH₃-SCR Catalytic Activity and H₂O & SO₂ Resistance Over Commercial V₂O₅-MoO₃/TiO₂ Catalyst by High Shear-induced Doping of Expanded Graphite. *Catalysis Today*, 1–9.
3. Wu, S., Li, X., Fang, X., Sun, Y., Sun, J., Zhou, M., Zang, S., 2016. NO Reduction by CO Over TiO₂-γ-Al₂O₃ Supported In/Ag Catalyst Under Lean Burn Conditions. *Cuihua Xuebao/Chinese Journal of Catalysis*, 37(11), 2018–24.
4. Zhao, X., Zhang, X., Xu, Y., Liu, Y., Wang, X., Yu, Q., 2015. The Effect of H₂O on the H₂-SCR of NO_x over Pt/HZSM-5. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 400(x), 147–153.
5. Yang, X., Su, Y.X., Qian, W.Y., Yuan, M.H., Zhou, H., Deng, W.Y., Zhao, B.T., 2017. Experimental Study on Selective Catalytic Reduction of NO by C₃H₆ Over Fe-Ag/Al₂O₃ Catalysts. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 45(11), 1365–75.
6. He, H., Yu, Y., 2005. Selective Catalytic Reduction of NO_x Over Ag/Al₂O₃ Catalyst: From Reaction Mechanism to Diesel Engine Test. *Catalysis Today*, 100(1–2), 37–47.
7. Azalim, S., Brahmi, R., Agunaou, M., Beaurain, A., Giraudon, J.M., Lamonier, J.F., 2013. Washcoating of Cordierite Honeycomb with Ce-Zr-Mn Mixed Oxides for VOC Catalytic Oxidation. *Chemical Engineering Journal*, 223, 536–46.
8. Nijhuis, T.A., Beers, A.E.W., Vergunst, T., Hoek, I., Kapteijn, F., Moulijn, J.A., 2001. Preparation of Monolithic Catalysts. *Catalysis Reviews-Science and Engineering*, 43(4), 345–380.
9. Williams, J.L., 2001. Monolith Structures, Materials, Properties and Uses. *Catalysis Today*, 69(1–4), 3–9.
10. Chen, D., Feng, J., Sun, J., Cen, C., Tian, S., Yang, J., Xiong, Y., 2020. Molybdenum Modified Montmorillonite Clay as an Efficient Catalyst for Low Temperature NH₃-SCR. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 95(5), 1441–52.
11. Şen, M., Emiroğlu, A.O., Çelik, M.B., 2016. CO and C₃H₈ Oxidation Activity of Pd/ZnO Nanowires/cordierite Catalyst. *Applied Thermal Engineering*, 99, 841–5.
12. Zhou, H., Ge, M.Y., Wu, S., Ye, B., Su, Y., 2018. Iron Based Monolithic Catalysts Supported on Al₂O₃, SiO₂, and TiO₂: A Comparison for NO Reduction with Propane. *Fuel*, 220, 330–8.
13. Trimm, D.L., 1995. *Materials Selection and*

- Design of High Temperature Catalytic Combustion Units. *Catalysis Today*, 26(3–4), 231–8.
14. Kang, W., Choi, B., Jung, S., Park, S., 2018. PM and NO_x Reduction Characteristics of LNT/DPF+SCR/DPF Hybrid System, *Energy*, 143, 439–47.
 15. Emiroğlu, A.O., 2017. Investigation of NO_x Reduction Activity of Rh/ZnO Nanowires Catalyst. *Atmospheric Pollution Research*, 8(1), 149–53.
 16. Jung, Y., Pyo, Y.D., Jang, J., Kim, G.C., Cho, C.P., Yang, C., 2019. NO, NO₂ and N₂O Emissions Over a SCR Using DOC and DPF Systems with Pt Reduction, *Chemical Engineering Journal*, 369(2), 1059–1067.
 17. Meng, Z., Chen, C., Li, J., Fang, J., Tan, J., Qin, Y., Jiang, Y., Qin, Z., Bai, W., Liang, K., 2020. Particle Emission Characteristics of DPF Regeneration from DPF Regeneration Bench and Diesel Engine Bench Measurements. *Fuel*, 262, 116589.
 18. Govender, S., Friedrich, H.B., 2017. Monoliths: A Review of the Basics, Preparation Methods and Their Relevance to Oxidation. *Catalysts*, 7(2), 62.
 19. Yao, X., Zhang, L., Li, L., Liu, L., Cao, Y., Dong, X., Gao, F., Deng, Y., Tang, C., Chen, Z., Dong, L., Chen, Y., 2014. Investigation of the Structure, Acidity, and Catalytic Performance of CuO/Ti_{0.95}Ce_{0.05}O₂ Catalyst for the Selective Catalytic Reduction of NO by NH₃ at Low Temperature. *Applied Catalysis B: Environmental*, 150–151, 315–29.
 20. Sun, F., Liu, H., Shu, D., Chen, T., Chen, D., 2019. The Characterization and SCR Performance of Mn-containing α -Fe₂O₃ Derived from the Decomposition of Siderite. *Minerals*, 9(7), 393.
 21. Huang, K., Lu, K., Ni, S., Tong, S., 2012. Studies on Preparation and Catalytic Performances of Monolithic Solid Acid Catalysts. *Asian Journal of Chemistry*, 24(3), 997–1002.
 22. Shigapov, A.N., Graham, G.W., McCabe, R.W., Peck, M.P., Plummer, H.K., 1999. The Preparation of High-surface-area Cordierite Monolith by Acid Treatment. *Applied Catalysis A: General*, 182(1), 137–46.
 23. Madhusoodana, C.D., Das, R.N., Kameshima, Y., Yasumori, A., Okada, K., 2001. Preparation of ZSM-5 Thin Film on Cordierite Honeycomb by Solid State in Situ Crystallization. *Microporous and Mesoporous Materials*, 46 (2–3), 249–55.
 24. Soghrati, E., Kazemeini, M., Rashidi, A.M., Jozani, K.J., 2014. Development of a Structured Monolithic Support with a CNT Washcoat for the Naphtha HDS Process. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 45(3), 887–95.
 25. Liu, Q., Liu, Z., Huang, Z., 2005. CuO Supported on Al₂O₃-coated Cordierite-honeycomb for SO₂ and NO Removal from Flue Gas: Effect of Acid Treatment of the Cordierite. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 44(10), 3497–502.
 26. Liu, Q., He, Y., Yang, J., Xi, W., Wen, J., Zheng, H., 2012. Modification of Cordierite Honeycomb Ceramics Matrix for DeNO_x Catalyst. *Materials Research Society Symposium Proceedings*, 1449, 141–6.
 27. Liu, Q., Liu, Z., Huang, Z., Xie, G., 2004. A Honeycomb Catalyst for Simultaneous NO and SO₂ Removal from Flue Gas: Preparation and Evaluation. *Catalysis Today*, 93–95, 833–7.
 28. Li, F., Shen, B., Tian, L., Li, G., He, C., 2016. Enhancement of SCR Activity and Mechanical Stability on Cordierite Supported V₂O₅-WO₃/TiO₂ Catalyst by Substrate Acid Pretreatment and Addition of Silica. *Powder Technology*, 297, 384–91.
 29. Keskin, Z., Özgür, T., Özarşlan, H., Yakaryılmaz, A.C., 2021. Effects of Hydrogen Addition into Liquefied Petroleum Gas Reductant on the Activity of Ag–Ti–Cu/Cordierite Catalyst for Selective Catalytic Reduction System. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(10), 7634–41.

Exergy Analysis of a Double-Stage Organic Rankine Cycle Using Renewable Energy

Ahmet KAPLAN^{*1} ORCID 0000-0002-4094-3180
Arif ÖZBEK² ORCID 0000-0003-1287-9078

¹Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Cukurova University, Adana

²Mechanical Engineering Department, Ceyhan Engineering Faculty, Cukurova University, Adana

Geliş tarihi: 03.01.2022

Kabul tarihi: 21.03.2022

Atıf şekli/ How to cite: KAPLAN, A., ÖZBEK, A., (2022). Exergy Analysis of a Double-Stage Organic Rankine Cycle Using Renewable Energy. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37(1), 43-54.

Abstract

In this study, exergy analysis of a double-stage Organic Rankine Cycle (ORC) was performed using the Engineering Equation Solver program (EES). For certain temperature limits in the first and second stages (S-I and S-II) R245fa + R245fa was used as refrigerant pair. This study aims to determine the effect of working temperature on system efficiency, exergy efficiency and the most suitable working temperature. The results showed that at 425K, 14.11kW exergy destruction is obtained in Pump-1 higher than other components. The smallest exergy destruction is 0.133kW is observed in Turbine-2 at 400K temperature. The highest thermal and exergy efficiencies of the whole system were obtained at 400K temperature as 8.85% and 48.55%, respectively.

Keywords: Organic Rankine cycle, Exergy analysis, Double stage cycle, Solar power

Yenilenebilir Enerji Kullanan İki Aşamalı Bir Organik Rankine Çevriminin Ekserji Analizi

Özet

Bu çalışmada, Mühendislik Denklem Çözücü programı (EES) kullanılarak çift aşamalı bir Organik Rankine Çevriminin (ORC) ekserji analizi yapılmıştır. Birinci ve ikinci kademelerde (S-I ve S-II) belirli sıcaklık limitleri için R245fa + R245fa akışkan çifti olarak kullanılmıştır. Bu çalışma, çalışma sıcaklığının sistem verimliliğine, ekserji verimliliğine etkisini belirlemeyi ve en uygun çalışma sıcaklığını bulmayı amaçlamaktadır. Sonuçlar, 425K'da Pompa-1'de diğer bileşenlerden daha yüksek 14.11kW ekserji tahribatının elde edildiğini göstermiştir. En küçük ekserji tahribatı 0.133kW olup, Türbin-2'de 400K sıcaklıkta gözlenmektedir. Tüm sistemin en yüksek termal ve ekserji verimleri sırasıyla %8,85 ve %48,55 ile 400K sıcaklıkta elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Organik Rankine çevrimi, Ekserji analizi, İki aşamalı çevrim, Güneş enerjisi

*Corresponding author (Sorumlu yazar): Ahmet KAPLAN, ahmttkplnn@gmail.com

1. INTRODUCTION

Energy efficiency is becoming a major concern of 21st century with increasing fossil fuel consumption [1]. The organic Rankine cycle (ORC) is established for converting heat to electricity. Capability of utilization of various kinds of low-grade heat sources for power generation is the most important feature of an ORC [2]. With respect to heat recovery, ORC is an important way to recover low-medium grade heat, but relatively low thermal efficiency is the biggest problem [3]. Wang et al. (2012) have proposed a double stage Organic Rankine Cycle for discontinuous waste heat recovery [4]. Some other heat sources for ORC applications to produce electricity is Biomass, solar thermal energy and geothermal [5]. Wang et al., (2020) explained that numerous researchers have extensively studied the organic Rankine Cycle, focusing mainly on system structure, working fluid, and optimization of cycle parameters [6]. Bertrand et al., (2009) indicated that the refrigerants studied found that the organic rankine cycle's most suitable working fluid for small-scale solar applications was R134a [7].

The term exergy was first used by Carnot in 1824 [8]. Studies on exergy analysis started with Gouy and Stodola. At the beginning of this century, scientists such as Jouguet, Lewiss and Randall, DeBaufre, Darrieus, Keenan, Lerberghe and Glansdorf made great contributions to the development of thermodynamics and the concept of exergy; In 1935, Bosnjakovic started to apply the concept of exergy to the thermodynamic analysis of systems [9]. Exergy is defined as the maximum work that can be obtained from a system by bringing it under the same conditions as the environment [10]. Tantekin et al. (2015) worked on a ORC which is working with R245fa organic refrigerant [11].

When a system is dead state, it is at the same temperature and pressure as its surroundings. In other words, it is in thermal and mechanical or

thermodynamic equilibrium with the environment. Also, the kinetic and potential energies of the system with respect to its surroundings are zero. When the system is dead state, it cannot enter into a chemical reaction with its environment. The dead state properties of the system are P_0 , T_0 , h_0 , u_0 and s_0 . At dead state $P_0=1$ atm (101.325 kPa) and $T_0=25$ °C (298.15 K) [12]. The work potential of the systems will be characterized by exergy analysis. It provides a more realistic view of various devices and processes [13].

In this study, Using the Engineering Equation Solver program (EES) which is the key feature of EES is its highly accurate thermodynamic and transport property database for hundreds of substances, allowing it to be used with equation-solving capability. Using the EES program exergy analysis of a double-stage Organic Rankine Cycle (ORC) was performed. In the first and second stages (S-I and S-II), R245fa organic fluids were used for certain temperature limits. In order to obtain exergy efficiency and exergy destruction rate from ORC.

2. MATERIAL AND METHOD

2.1. System Description

The double stage ORC system designed is shown in Figure 1. The solar collector is used as a heater in this system. Heat is taken from the solar collector and delivered that heat to the working fluid on the first stage at the evaporator. The second-stage working fluid in Re-evaporator is heated with the turbine-1 exit fluid which is still in the superheated gas state. As a pre-heater the regenerator heats the compressed liquid. At both condensers, the water is used as a cooler. The same refrigerant is used in the first stage (S-I) and the second stage (S-II) as working fluid. At the evaporator, Re-evaporator and heat exchangers the effectiveness-NTU method is used to model.

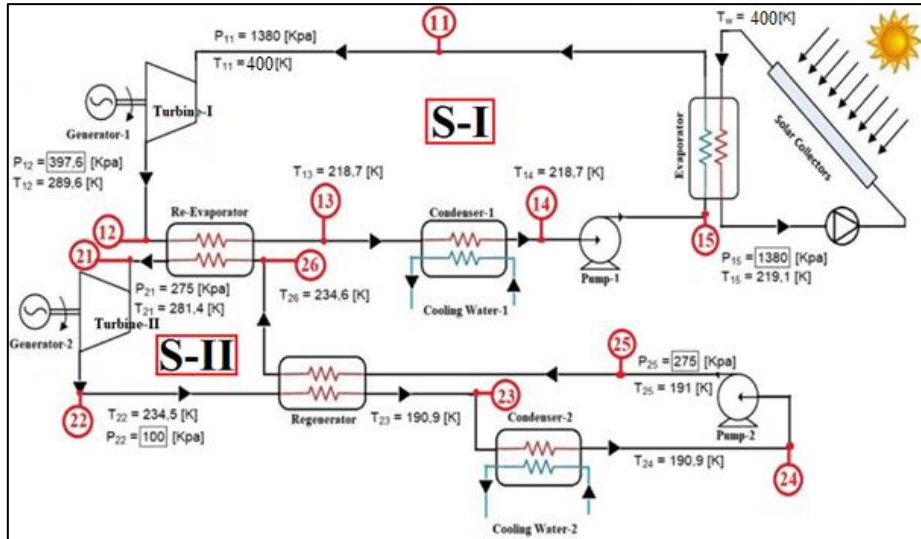


Figure 1. Schematic representation of double stage ORC system

The ORC system consists of two stages. The same fluid is used in the first and second stages (S-I and S-II), and the solar collector gives to the heat in the system. That heat is converted into electric energy. All of the heat sources like natural gas, waste heat, geothermal energy, solar energy etc. can be used instead of solar collector. The system works with 0.93 kg/s and 0.4882 kg/s constant mass flow rate in the first (S-I) and second (S-II) stages, respectively. Also, all components works with constant pressure. Calculations were made between 400K and 425K temperature at which two stage can work.

Figure 2 illustrates the temperature/entropy diagram of the two-stage Rankine cycle designed with R245fa at each stage. The points in the first stage show: 11-12 is the turbine1, 12-13 is the re-evaporator, 13-14 is a condenser1, 14-15 is a pump1, and 15-11 is the evaporator where heat is gained from the solar collector. The points in the second stage show: 21-22 is a turbine2, 22-23 and 25-26 are regenerator, 23-24 is a condenser2, 24-25 is a pump2, and 26-21 is an evaporator where heat is gained from re-evaporator.

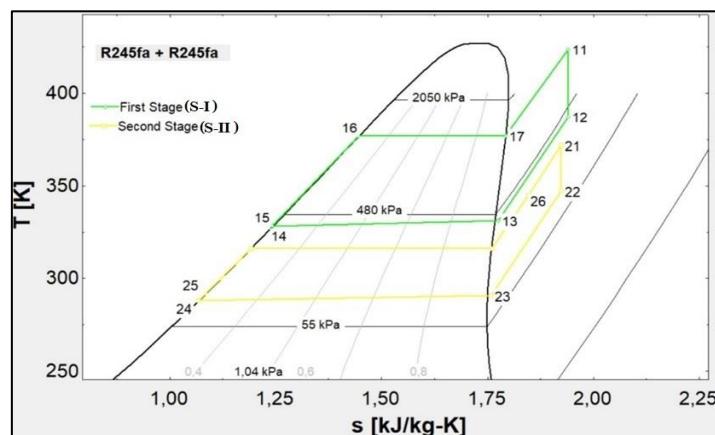


Figure 2. Temperature/entropy chart of two-stage Rankine cycle with R245fa at each stage

2.2. Organic Refrigerants

Efficient working fluid should have a low liquid specific volume and low steam [14]. The specific volume of the fluid pressure in the condenser

should be as small as possible to minimize the feed pump work [15]. Physical, safety and environmental data of the working fluid used in the analyses are shown in Table 1.

Table 1. Physical, safety and environmental data of the working fluid

Substance	Molecular mass (kg/kmol)	T _{bp} (°C)	T _{cr} (°C)	P _{cr} (MPa)	ASHRAE 34 safety group	Atmospheric life time (yr)	ODP	GWP (100 yr)
R245fa	134.05	15.3	154.1	3.64	B1	8.8	0	820

T_{bp}: Normal boiling point; T_{cr}: Critical temperature; P_{cr}: Critical pressure; ODP: Ozone depletion potential, relative to R-11; GWP: Global warming potential, relative to CO₂. n.a: non available.

2.3. Energy Analysis of the System

Because Rankine cycles with four components (pump, boiler, turbine and condenser) accepted as constant-flow devices, all arithmetic operations constituting the Rankine cycle can be analyzed as the fixed-flow process. Potential and kinetic energy are often neglected because they are small in terms of according to work and heat transfer [16].

Pump and turbine are isentropic. Do not require any work at the boiler and condenser. Energy relationship for each device can be expressed as:

S-I Processes: Process 11 - 12 is the Turbine-1 (Equation 1).

$$\dot{W}_{T-I} = \dot{m}_I \times (h_{11} - h_{12}) \times \eta_m \quad (1)$$

At the designed condition the isentropic efficiency of Turbine-1 is $\eta_{T-I} = 0.8$.

Process 12 – 13 is Re-evaporator (Equation 2).

$$\dot{Q}_r = \dot{m}_I \times (h_{12} - h_{13}) \quad (2)$$

Process 13 – 14 is the condenser1 (Equation 3).

$$\dot{Q}_{out-I} = \dot{m}_I \times (h_{13} - h_{14}) \quad (3)$$

Process 14 – 15 is the pump1 (Equation 4).

$$\dot{W}_{p-I} = \dot{m}_I \times (h_{14} - h_{15}) \times \eta_p \quad (4)$$

At the designed condition the pump1 efficiency is $\eta_{p-I} = 0.8$

Process 15 – 11 is a solar collector gives the heat to the system (Equation 5).

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_I \times (h_{11} - h_{15}) \quad (5)$$

S-II Processes: Process 21 - 22 is the Turbine-2 (Equation 6).

$$\dot{W}_{T-II} = \dot{m}_{II} \times (h_{21} - h_{22}) \times \eta_{T-II} \quad (6)$$

At the designed condition the isentropic efficiency of Turbine-2 is $\eta_{T-2} = 0.8$.

Process 22 – 23 is the Regenerator (Equation 7).

$$\dot{Q}_{R-2} = \dot{m}_{II} \times (h_{22} - h_{23}) \quad (7)$$

The ORC with a regenerator is better than the basic ORC because of when the heat source temperature is relatively high [16].

Process 23 – 24 is the condenser 2 (Equation 8).

$$\dot{Q}_{out-2} = \dot{m}_{II} \times (h_{23} - h_{24}) \quad (8)$$

Process 24 – 25 is the pump 2 (Equation 9).

$$\dot{W}_{p-II} = \dot{m}_{II} \times (h_{24} - h_{25}) \times \eta_{p-II} \quad (9)$$

At the designed condition the pump efficiency is $\eta_{p-II} = 0.8$

Process 25-21 is the Re-evaporator (Equation 10).

$$\dot{Q}_{in-II} = \dot{m}_{II} \times (h_{21} - h_{25}) \quad (10) \quad \dot{Q}_{max} = C_{min} (T_{h-in} - T_{c-in}) \quad (15)$$

The net electrical power produced by the system is calculated from equation below (Equation 11):

$$\dot{W}_{net} = (\dot{W}_{T-I} + \dot{W}_{T-II}) - (\dot{W}_{p-I} + \dot{W}_{p-II}) \quad (11) \quad NTU = \frac{U \times A}{C_{min}} \quad (16)$$

The thermal efficiency of the double stage ORC system is determined as (Equation 12):

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{in}} \quad (12) \quad \text{NTU is a dimensionless number which means number of transfer unit.}$$

The effectiveness – NTU Method: Kays and London in 1955 was found The effectiveness-NTU method. Heat exchanger analysis greatly simplified this method [17]. By the ϵ -NTU all heat exchangers are calculated (Equation 13):

$$\epsilon = \frac{\dot{Q}_{act}}{\dot{Q}_{max}} \quad (13) \quad \sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_e \quad (17)$$

A dimensionless parameter ϵ is the heat transfer effectiveness. Defined with; the ratio of actual heat transfer rate to maximum possible heat transfer rate.

In a heat exchanger to determine the maximum possible heat transfer rate, difference between the inlet temperature of the hot and cold fluids is maximum temperature difference in a heat exchanger [16] (Equation 14).

$$\dot{Q}_{act} = C_h (T_{h-in} - T_{h-out}) = C_c (T_{c-out} - T_{c-in}) \quad (14) \quad Q - W = \sum E_e - \sum E_i \quad (18)$$

The heat capacity of the hot and cold fluids C_h and C_c , respectively (Equation 15).

The smaller fluid thermal capacity is C_{min} . The overall heat transfer coefficient is U (Equation 16).

2.4. Exergy Analysis

For process components the following exhibits the numerous rate balance values based on energy and exergy approaches. The equations for a steady-state system are given below [18] (Equation 17-19).

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_e \quad (17)$$

$$Q - W = \sum E_e - \sum E_i \quad (18)$$

$$X - W = \sum X_e - \sum X_i + X_D \quad (19)$$

The general exergy balance is expressed in the rate form as (Equation 20):

$$\dot{E}x_i - \dot{E}x_e = \dot{E}x_D \quad (20)$$

And the specific exergy is calculated as (Equation 21):

$$ex = h - h_0 - T_0(s - s_0) \quad (21)$$

Table 2. Exergy analysis equations for the system components

Stage	Components	Exergy destruction rate	Exergy efficiency
S-I	Turbine-1	$X_D = X_{11} - W_{T1} - X_{12}$	$\eta_{t1} = \frac{W_{T1}}{X_{11} - X_{12}}$
	Condenser-1	$X_D = X_{13} + X_{cw1-in} - X_{14} - X_{cw1-out}$	$\eta_{c1} = \frac{X_{cw1-in} - X_{cw1-out}}{X_{13} - X_{14}}$
	Pump-1	$X_D = X_{14} + W_{P1} - X_{15}$	$\eta_{p1} = \frac{X_{15} - X_{14}}{W_{P1}}$
	Evaporator	$X_D = X_{15} + X_{SC-in} - X_{11} - X_{SC-out}$	$\eta_{evap} = \frac{X_{11} - X_{15}}{X_{SC-in} - X_{SC-out}}$

Table 2. Continou

S-I & S-II	Re-Evaporator	$X_D = X_{12} + X_{26} - X_{13} - X_{21}$	$n_{R-e} = \frac{X_{12} - X_{13}}{X_{26} - X_{11}}$
S-II	Turbine-2	$X_D = X_{21} - W_{T2} - X_{22}$	$n_{t2} = \frac{W_{T2}}{X_{21} - X_{22}}$
	Condenser-2	$X_D = X_{23} + X_{cw2-in} - X_{24} - X_{cw2-out}$	$n_{c2} = \frac{X_{cw2-in} - X_{cw2-out}}{X_{23} - X_{24}}$
	Pump-2	$X_D = X_{24} + W_{P2} - X_{25}$	$n_{p2} = \frac{X_{25} - X_{24}}{W_{P2}}$
	Regenerator	$X_D = X_{22} + X_{25} - X_{23} - X_{26}$	$n_{Rg} = \frac{X_{22} - X_{23}}{X_{25} - X_{26}}$

3. RESULT AND DISCUSSIONS

With the EES (Engineering Equation Solver) software program, thermodynamic properties of the R245fa refrigerant in the first and second stages were determined. EES simplifies the process. EES groups equations and automatically identifies that need to be solved and instead of assignments normally used in formal programming

languages uses equations [15]. The effect on the system in the same situation is calculated by changing the evaporator inlet temperature (T_w).

For Evaporator Inlet Temperature is 400K: Table 3 shows the thermodynamic values of the first stage using R245fa fluid when the evaporator inlet temperature (T_w) is 400K.

Table 3. Thermodynamic properties of R245fa in the first stage

Point	State	Temperature (K)	Pressure (kPa)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ-kg/K)
11	Superheated vapor	418.5	1380	529.0	1.925
12	Superheated vapor (Scroll expander)	382	397.6	501.2	1.925
13	Superheated vapor	331.3	397.6	447.9	1.776
14	Saturated liquid	328	397.6	273.1	1.243
15	Sub-cooled liquid (Pump)	328.5	1380	273.9	1.243
16	Saturated liquid	377	1380	345.8	1.447
17	Saturated vapor	377	1380	476.3	1.793

Table 4 shows the thermodynamic values of the second stage using R245fa fluid when the evaporator inlet temperature (T_w) is 400K.

Table 4. Thermodynamic properties of R245fa in the second stage

Point	State	Temperature (K)	Pressure (kPa)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ-kg/K)
21	Superheated vapor	366.8	275	487.3	1.910
22	Superheated vapor (Scroll expander)	342.0	100	465.8	1.910
23	Superheated vapor	290.9	100	418.0	1.759
24	Saturated liquid	288.0	100	219.1	1.068
25	Sub-cooled liquid (Pump)	288.1	275	225.2	1.068
26	Saturated liquid	339.2	275	459.3	1.831
27	Saturated vapor	316.1	275	256.6	1.192

Table 5 shows the power output, thermal efficiency and exergy efficiency values of different evaporator inlet temperature (T_w) for R245fa refrigerant at both stages. According to

the results, the highest power output, thermal efficiency and exergy efficiency values were obtained as 18.99 kW, 8.856% and 48.55%, respectively at 400K.

Table 5. System performance for different temperature for R245fa refrigerant

Turbine Inlet Temperature (K)	Power output (kW)	Thermal Efficiency (%)	Exergy Efficiency System (%)
400	18.99	8.856	48.55
405	18.22	8.274	44.06
410	17.73	7.846	40.63
415	17.40	7.513	37.87
420	17.19	7.246	35.59
425	17.06	7.025	33.66

For Evaporator Inlet Temperature is 425K:
Table 6 and 7 show the thermodynamic values of the first stage and second stage using R245fa

fluid when the evaporator inlet temperature (T_w) is 425K, respectively.

Table 6. Thermodynamic properties of R245fa in the first stage

Point	State	Temperature (K)	Pressure (kPa)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ-kg/K)
11	Superheated vapor	423.5	1380	535.1	1.940
12	Superheated vapor (Scroll expander)	387.2	397.6	506.7	1.940
13	Superheated vapor	331.3	397.6	447.9	1.776
14	Saturated liquid	328	397.6	273.1	1.243
15	Sub-cooled liquid (Pump)	328.5	1380	273.9	1.243
16	Saturated liquid	377	1380	345.8	1.447
17	Saturated vapor	377	1380	476.3	1.793

Table 7. Thermodynamic properties of R245fa in the second stage

Point	State	Temperature (K)	Pressure (kPa)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ-kg/K)
21	Superheated vapor	372	275	492.6	1.924
22	Superheated vapor (Scroll expander)	347.2	100	470.8	1.924
23	Superheated vapor	290.9	100	418.0	1.759
24	Saturated liquid	288	100	219.1	1.068
25	Sub-cooled liquid (Pump)	288.1	275	224.8	1.068
26	Saturated liquid	344.4	275	464.5	1.846
27	Saturated vapor	316.1	275	256.6	1.192

Figure 3 shows thermal efficiency and power output relation between 400K and 425K evaporator inlet temperatures. As can be seen from the figure, there is an inverse proportion between thermal efficiency and power output

with evaporator inlet temperature. For the system, both net electrical power and thermal efficiency decrease as ORC working temperature increases.

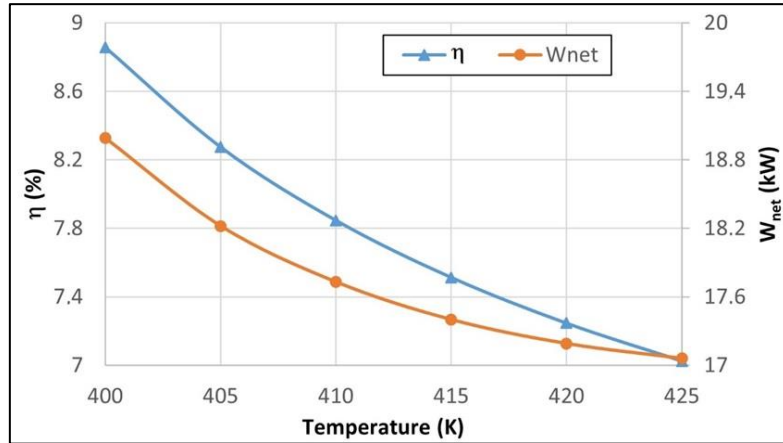


Figure 3. Thermal efficiency and power output values of the system versus evaporator inlet temperatures

The variation of the thermal and exergy efficiencies against the evaporator inlet temperature, for ORC system are shown in Figure 4. It is seen from the figure that, the exergy efficiency of the cycle decreases with increasing

evaporator inlet temperature. At same time, thermal efficiency of the system decreases with increasing evaporator inlet temperature. The highest thermal and exergy efficiencies are seen at the 400K temperature.

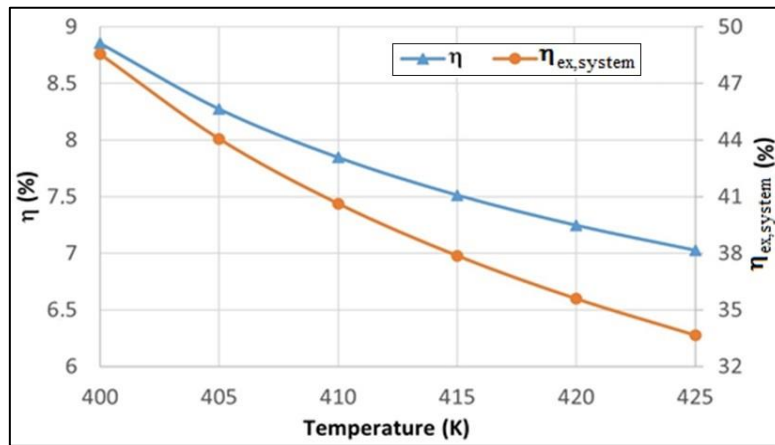


Figure 4. Thermal efficiency and exergy efficiency against evaporator inlet temperatures for the system

Figure 5 represents exergy efficiency and exergy destruction values versus evaporator inlet temperature for Turbine1 and 2. It is seen from the figure that, exergy efficiency in the Turbine-1 decreases, while exergy destruction in the Turbine-1 increases with increasing evaporator inlet temperature. The smallest and highest exergy destructions in the Turbine-1 is 0.4514 kW and 0.6653 kW, respectively. The percentage of the exergy efficiency in Turbine-1 is 98.14 and 97.54

for 400K and 425K, respectively. Figure 5 also shows that, exergy efficiency in the Turbine-2 decreases, while exergy destruction in the turbine-2 increases, when evaporator inlet temperature is increased. The smallest and highest exergy destruction in the Turbine-2 is 0.1258 kW and 0.1496 kW, respectively. The percentage of the exergy efficiency in Turbine-2 is 99.25 and 98.48 for 400K and 425K, respectively.

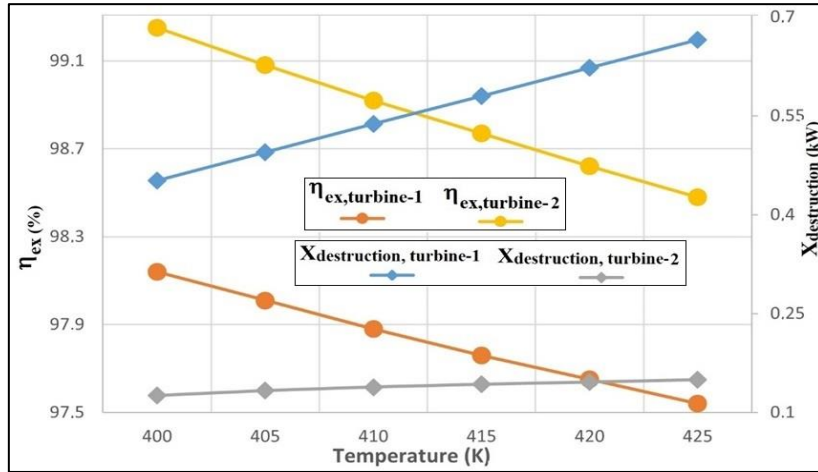


Figure 5. Exergy efficiency and exergy destruction values versus evaporator inlet temperature for Turbine1 and 2

According to Figure 6 a and Figure 7 b, the exergy efficiency reduces with increasing evaporator inlet temperature of hot fluid for Pump1 and 2. In addition, the highest exergy efficiency is calculated as to be 6.18% and 83% for Pump-1 and 2, respectively when the evaporator inlet temperature is 400K. Exergy efficiency values decrease up to 5.48% and 44% for Pump1 and 2.

The exergy destruction is increased from 11.2% to 12.6% for Pump1 and from 1.6% to 3.1% for Pump2 in figure 6 a and b. According to the results of calculations, it is seen from Figure 6 a and Figure 7 b; the highest exergy destruction is observed at the Turbine1 and 2 against to the smallest exergy efficiency is seen at the Condenser1 and 2 for 425K temperature.

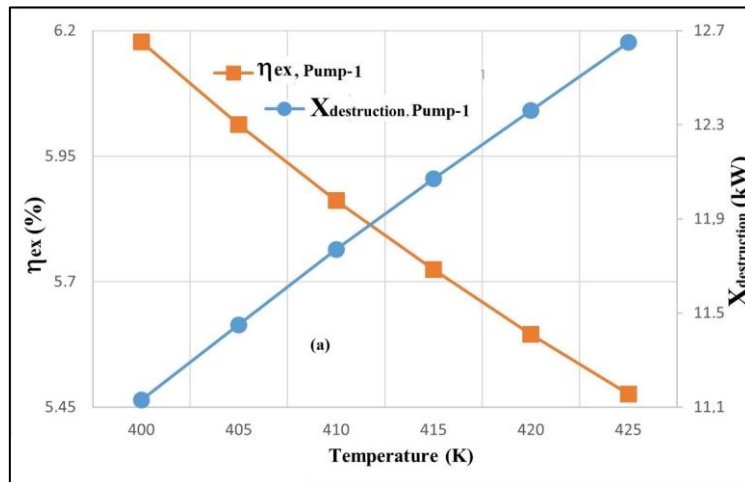


Figure 6. Exergy destruction and Thermal efficiency values when using R245fa at different evaporator inlet temperatures for (a) Pump1

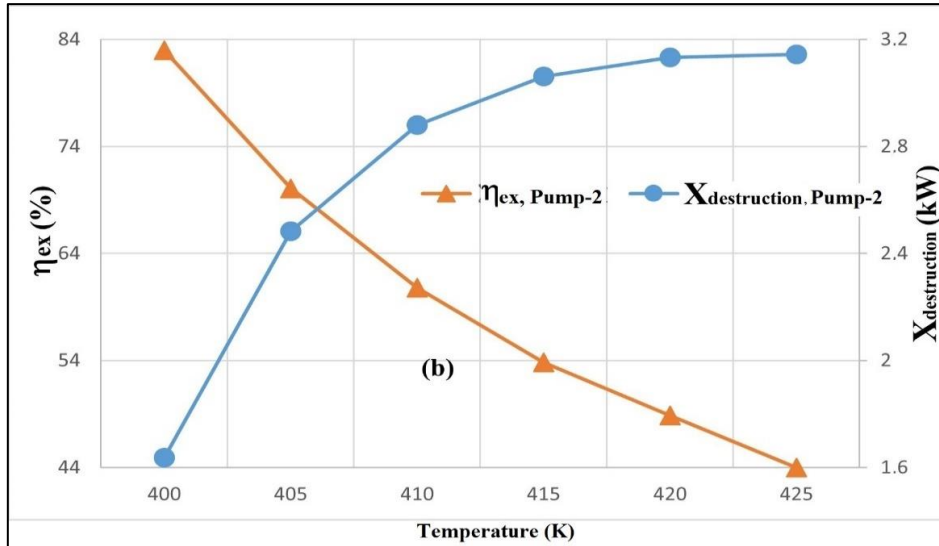


Figure 7. Exergy destruction and Thermal efficiency values when using R245fa at different evaporator inlet temperatures for (b) Pump2

Exergy efficiency values of ORC system components at 425K evaporator inlet temperature are shown in Figure 8. The greatest efficiencies

were obtained in Turbine1 and 2 and in the Evaporator. Smallest efficiencies are obtained in both Condensers and in Pump1.

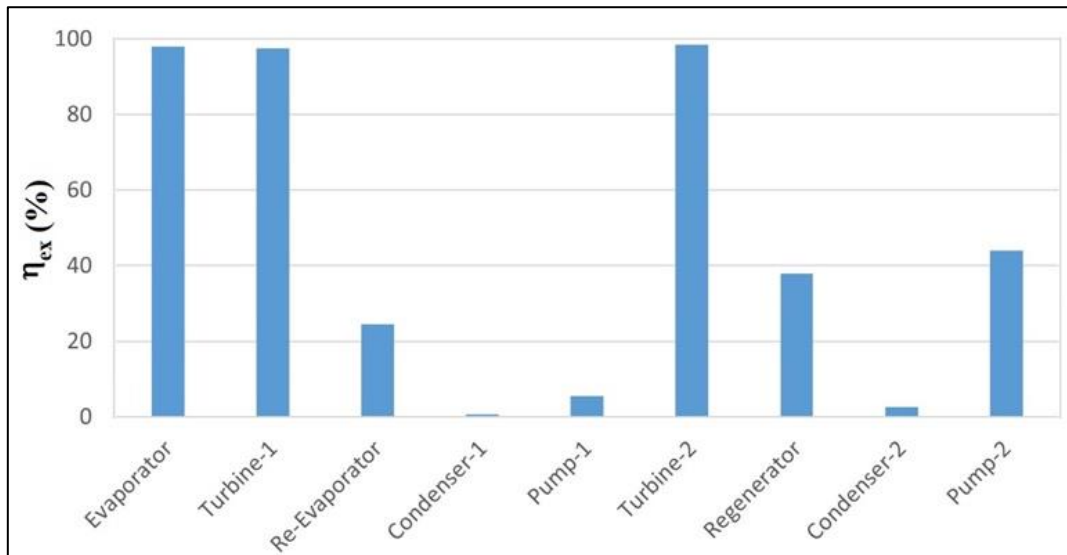


Figure 8. Exergy efficiency values of all components of the system at 425K evaporator inlet temperature

Exergy destruction of the turbines and pumps due to evaporator inlet temperature changes is given in Figure 9. The maximum exergy destruction is found in Pump1 compared to other components for

all temperatures. Minimum exergy destruction is found in Turbine2 compared to other components for all temperatures.

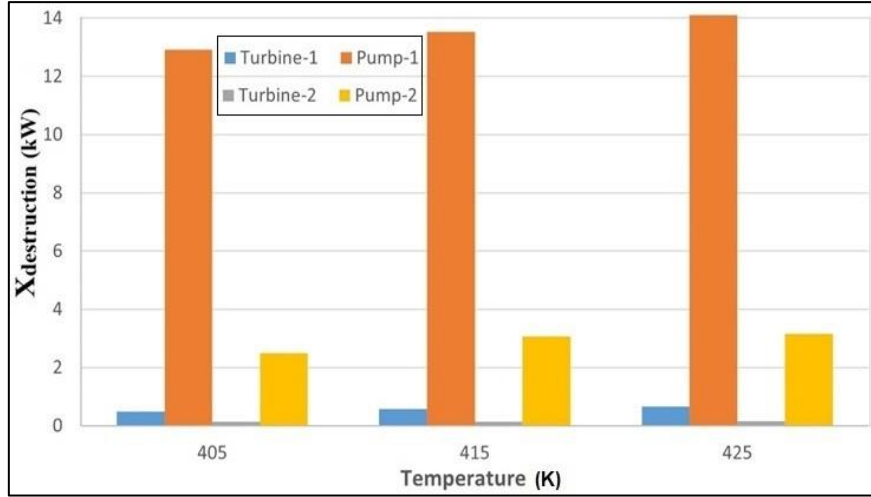


Figure 9. Exergy destruction at turbines and pumps for 405K, 415K and 425K

4. CONCLUSION

This work represents a comprehensive assessment of exergy analysis of the double stage ORC system. The Engineering Equation Solver is used to carry out various calculation of present analysis. In this work, the exergy destruction and exergy efficiency values of various components are obtained and compared.

- The exergy destruction in Pump-1 is found higher than other components at all evaporator inlet temperature. As a result, at 425K, 14.11kW exergy destruction is obtained. The smallest exergy destruction is observed in Turbine-2. The exergy destruction in turbine-2 is found to be 0.133kW at 400K temperature.
- The highest exergy efficiency is observed at the Turbine-2 as 98.48%. The minimum exergy efficiency is seen at the Condenser-1 for 425K temperature as 0.7%.
- The highest thermal and exergy efficiencies of the whole system were obtained at 400K temperature as 8.85% and 48.55%, respectively. The exergy efficiency of the cycle decreases with increase in evaporator inlet temperature. At same time, thermal

efficiency of the system decreases with increase in evaporator inlet temperature.

5. REFERENCES

1. Dincer, I., 6/2000. Renewable Energy and Sustainable Development: A Crucial Review. *Renew Sustain Energy Rev*, 4:157e75.
2. Roy, J.P., Mishra, M.K., Misra, A., 2011. Performance Analysis of an Organic Rankine Cycle with Superheating Under Different Heat Source Temperature Conditions. *Applied Energy*, 88, 2995–3004.
3. Di Pippo R., 2004. Second Law Assessment of Binary Plants Generating Power from Low-temperature Geothermal Fluids. *Geothermics*, 33, 565–86.
4. Wang, D., Ling, X., Peng, H., 2012. Performance Analysis of Double Organic Rankine Cycle for Discontinuous Low Temperature Waste Heat Recovery. *Appl Therm Eng*, 48, 63–71.
5. Tchanche, B.F., Lambrinos, G., Frangoudakis, A., Papadakis, G., 2011. Low-grade Heat Conversion into Power Using Organic Rankine Cycles—A Review of Various Applications. *Renew. Sustain Energy Rev*, 15, 3963–3979.
6. Wang, Q., Wang, J., Li, T., Meng, N., 2020. Techno-economic Performance of Two-stage

Series Evaporation Organic Rankine Cycle with Dual-level Heat Sources. Applied Thermal Engineering, 171, 115078.

7. Bertrand, F.T., Papadakis, G., Lambrinos, G., Frangoudakis, A., 2009. Fluid Selection for a Low Temperature Solar Organic Rankine Cycle. Applied Thermal Engineering 29, 2468-2476.
8. Wall, G., 1998. Exergetics. Exergy Ecology Democracy, Sweden.
9. Rivero, R., Anaya, A., 1997. Exergy Analysis of Industrial Processes: Energy-economy-ecology. Latin American Applied Research, 27, 191-205.
10. Kotas, T.J., 1995. The Exergy Method of Thermal Plant Analysis, Kriger Publishing Comp, USA.
11. Tantekin, A., Tumen Ozdil, N.F., Segmen, M.R., 2015. Thermodynamic Analysis of an Organic Rankine Cycle (ORC) Based on Industrial Data. Applied Thermal Engineering, 91, 43-52.
12. Çengel, A.Y., Boles, M.A., 1998. Thermodynamics, an Engineering Approach, Mc. Graw Hill, USA.
13. Xu, C., Wang, Z., Li, X., Sun, F., 2011. Energy and Exergy Analysis of Solar Power Tower Plants. Appl. Therm. Eng. 31, 3904–3913.
14. Lee, D.H., 2014. Organic Rankine Cycle Power Generator. 8th Fluid Machinery Core Technology Lecture of Korea Society for Fluid Machinery, 169-179.
15. Davidson, T.A., 1977. Design and Analysis of a 1 kW Rankine Power Cycle, Employing a Multi-vane Expander, for Use with a Low Temperature Solar Collector. Master's Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA.
16. Chen, H., Goswami, D.Y., Stefanakos, E.K., A., 2010. Review of Thermodynamic Cycles and Working Fluids for the Conversion of Low-grade Heat. Renew Sustain Energy Rev, 14, 3059–67.
17. Çengel Y.A., 2003. Heat Transfer. 2th Edition, 690-694.
18. Kaushik, S.C., Reddy, V.S., Tyagi., S.K., 2011. Energy and Exergy Analyses of Thermal Power Plants a Review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15(4), 1857–72.

Nomenclature			
h	Enthalpy [kJkg ⁻¹]		
\dot{m}	mass flow rate [kgs ⁻¹]		
\dot{Q}	heat transfer rate [kW]		
C	heat capacity rate [kW ^o C ⁻¹]		
T	temperature [°C or K]		
\dot{W}	work [kW]		
A	surface area [m ²]		
<i>Greek Letter</i>			
η	efficiency		
<i>Subscripts</i>			
p	pump	min	minimum
out	outgoing	max	maximum
in	incoming	act	actual
r	re-evaporator	m	mechanic
T	turbine	h	hot
th	thermal	c	cold

Yeraltı Kömür Maden Makinaları Operatörlerinin Gürültü ve Titreşim Maruziyetlerinin Araştırılması

İlknur EROL*¹ ORCID 0000-0002-8968-1134

¹Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Adana

Geliş tarihi: 01.01.2022

Kabul tarihi: 22.02.2022

Atıf şekli/ How to cite: EROL, İ., (2022). Yeraltı Kömür Maden Makinaları Operatörlerinin Gürültü ve Titreşim Maruziyetlerinin Araştırılması. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37(1), 55-65.

Öz

Bu çalışmada, bir yeraltı kömür işletmesinde makina operatörlerinin maruz kaldıkları gürültü ve titreşim değerleri ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar gürültü ve titreşim yönetmelikleri kapsamında değerlendirilmiştir. Kulak koruyucu kullanan tüm makina operatörlerinin maruz kaldıkları gürültü değerlerinin yönetmelikte belirtilen sınır değerinin altında olduğu tespit edilmiştir. Ölçüm yapılan makineler arasında, en fazla gürültü ve el-kol titreşimine martoperfaratör operatörü maruz kalmıştır. Operatörlerin titreşim maruziyetinin yanısıra makinelerin titreşim değerleri de ölçülmüştür. Paletli jumbo ve lastik tekerlekli jumbo makinelerinin titreşim değerleri arasındaki fark, yolun pürüzlülüğü, motor titreşimleri ve seyir hareketlerine bağlı olarak değişmektedir. Ayrıca, operatörlerin bireysel gürültü maruziyetleri ile titreşim maruziyetleri arasında $R^2=0.88$ 'lik bir ilişki tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Maden makineleri, Gürültü, Titreşim, Kömür, Yeraltı

Investigation of Noise and Vibration Exposure of Underground Coal Mining Machinery Operators

Abstract

In this study, the noise and vibration values that machine operators are exposed to in a underground coal mining were measured. The results obtained were evaluated within the scope of noise and vibration regulations. It has been determined that the noise values that all machine operators using ear protection are exposed to are below the acceptable limit value specified in the regulation. Among the measuring machines, the jackhammer operator was exposed to the most noise and hand-arm vibration. Besides the vibration exposure of the operators, the vibration values of the machines were also measured. The difference between the vibration values of crawler jumbo and rubber wheel jumbo machines varies depending on the roughness of the road, engine vibrations and cruising movements. In addition, an $R^2=0.88$ relationship was found between the individual noise exposure of the operators and their vibration exposure.

Keywords: Mining machines, Noise, Vibration, Coal, Underground

*Sorumlu yazar (Corresponding author): İlknur EROL, ierol@cu.edu.tr

1. GİRİŞ

Gürültü, çalışanların sağlığını fizyolojik ve psikolojik ve performans açısından olumsuz etkileyen, istenmeyen seslerdir. Gürültü sesin frekansına, gürültünün ses basınç seviyesine ve maruziyet süresine bağlı olarak işitme duyusuna zarar vermektedir [1-3].

Kömür işletmelerinde madencilik işlemleri sırasında jumbo, elektro hidrolik yükleyici, martopikör, martoperfaratör, sondaj makinası vb. makineler kullanılmaktadır. Bu makinelerin her biri farklı gürültü düzeyleri sahip olup uzun süre bu gürültüye maruz kalan operatörlerde veya çalışanlarda geçici veya kalıcı işitme kayıpları söz konusu olabilir. Bu nedenle makinelerin gürültü seviyelerinin yönetmelikte belirtilen sınır değerinin altında tutulması gerekmektedir.

Titreşim, bir cismin iç veya dış kuvvetlerin etkisiyle yaptığı salınım hareketidir. İnsan titreşimi ise, titreşen bir yüzey veya cisim ile temas neticesinde bireyin hissettiği titreşimdir. Titreşim, insan vücuduna, temas edilen titreşen yüzey aracılığı ile iletilmektedir. Titreşim yüzeyi, bir makinenin tutamak kısmı, bir aletin yüzeyi veya motorlu bir makinenin koltuğu olabilmektedir. Titreşim maruziyeti iki çeşit olup, birincisi tutamak kısmı olan ve elle kullanılan aletlerden iletilen el-kol titreşimi, ikincisi motorlu bir makinenin üzerindeki koltuk veya yüzeyden iletilen tüm vücut titreşimidir [4].

Madencilik işlemleri sırasında makina operatörleri doğrudan titreşim kaynağı ile temas halinde olup titreşime maruz kalmaktadırlar. Titreşime uzun süre maruz kalan çalışanlarda titreşim kaynaklı meslek hastalıkları meydana gelebilmektedir [5-7].

Titreşim maruziyeti sonucu en sık görülen meslek hastalığı el-kol titreşimi sendromudur. Bu hastalık, titreşimli el aletlerini yada makineleri kullanan çalışanların mesleki olarak titreşime maruz kalmasından kaynaklanmaktadır [8].

Maden makineleri operatörleri el-kol ve tüm vücut titreşimine maruz kalmaktadırlar. El- kol titreşimi,

çalışılan aletlerden yayılan enerjinin, parmak veya elin avuçlarından vücuda girip mekanik enerjiye neden olmasıyla meydana gelmektedir. Tüm vücut titreşimi, operatörler, makinenin üzerindeki koltukta otururken, makineden yayılan enerji koltuk arkılığı veya sırt arkılığından, ayrıca kalça ve ayaklar yoluyla; operatör ayakta iken, enerji ayaklar yoluyla vücuda girmektedir [9,10].

Xu ve arkadaşları [11] Kuzey Çin kömür madeninde el-kol titreşimine maruz kalan çalışanlarda meydana gelen ellerde uyuşma, karpal tünel sendromu vb. sağlık sorunlarını tespit etmişlerdir. Marin ve arkadaşları [12] çalışmalarında, açık ocak madenciliğinde kullanılan iş makineleri operatörlerinin tüm vücut titreşimine yüksek seviyelerde maruz kaldıklarını belirtmişlerdir. Alphin ve arkadaşları [13], ekskavatör operatörlerinin tüm vücut titreşim maruziyet değerinin, sınır değeri aştığını vurgulamışlardır. Seidel [14] tüm vücut titreşimine maruz kalan çalışanlarda meydana gelen sağlık sorunlarını belirtmiştir. Ljungberg ve Parmentier [15] çalışmasında, gürültü ve titreşimin ortak etkisinin vücut üzerinde titreşim ve gürültünün tekil etkilerinden oldukça farklı olduğunu belirtmiştir.

Arıtan ve Tümer [16] doğaltaş madenciliği sektöründe hidrolik ekskavatör operatörlerinin hem kırıcı uç hem de kova takılıyken tüm vücut titreşim maruziyetlerini ölçmüştür. Ekskavatör operatörlerinin kırıcı uç takılıyken daha fazla titreşime maruz kaldıklarını belirtmişlerdir. Nyantumbu ve arkadaşları [17] Güney Afrika'daki maden işçilerinde el-kol titreşim sendromunun (EKTS) yaygınlığı ile bu duruma sebep olan aletleri tespit etmek için Güney Afrikada bir altın madeninde çalışma yapmışlardır. EKTS'nin elle tutulan titreşimli aletlerin kullanılmasıyla bağlantılı olduğunu ifade etmişler. Bu durumdan etkilenen işçilerde karıncalanma, hissizlik, tutuş gücü kaybı görülebileceğini, el becerisi kaybının günlük aktivitelerin gerçekleştirilmesini zorlaştıracağını ve kaza riskini artırabileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca martopikör ve martoperforatörlerde 31 m/s² gibi yüksek titreşim

ivmesi seviyelerinin ölçüldüğünü vurgulamışlardır. Arıtan ve Tümer, [7] doğaltaş ocağında martopikör operatörlerinin el kol titreşimi maruziyet değerlerinin yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Titreşim sönmüleyici eldiven kullanan çalışanlarda ise maruziyet miktarının azaldığını ancak yönetmelikte belirtilen sınır değere indirilemediğini vurgulamışlardır.

Bu çalışmada, yeraltı kömür ocaklarında çalışan makina operatörlerinin el-kol ve tüm vücut titreşim maruziyetleri araştırılmıştır. Operatörlerin bu sırada maruz kaldıkları gürültü değerleri de tespit edilmiştir. Ayrıca, operatörlerin kişisel gürültü maruziyeti ile titreşim maruziyetleri arasındaki ilişki incelenmiştir.

2. GÜRÜLTÜ VE TİTREŞİMİN İNSAN SAĞLIĞINA ETKİSİ

Gürültü ve titreşim madencilik faaliyetleri sırasında karşılaşılan önemli tehlikelerdendir. Gürültü konusunda gerekli önlemler alınmadığında işitme kaybı söz konusu olabilir. Gürültü, işitme kaybının yanı sıra çalışanların performansını da olumsuz yönde etkileyebilmektedir [18-21]. Titreşime yoğun maruz kalan çalışanlarda çalışma konforu bozulmakta, işgücü verimliliği azalmakta ve fizyolojik fonksiyonları olumsuz etkilenmektedir. Bunun sonucunda çalışanlarda titreşime bağlı meslek hastalıkları ortaya çıkmaktadır.

Martopikör, matkap vb. titreşim kaynaklı makineleri kullananların dolaşım sistemlerinde, kemik ve eklem sistemlerinde, sinir sistemlerinde ve kaslarında hasarlar meydana gelmektedir. Bunun sonucunda ise Beyaz Parmak Hastalığı oluşmaktadır. Bu hastalığın belirtileri, el bilekleri ve ellerde dolaşım bozukluğu ve nörolojik bozukluktur [22-24]. Çimento sanayinde ve dokuma tezgahlarında çalışanlarda ve delik delme makinelerini kullananlarda tüm vücut sistemine bağlı meslek hastalıkları görülmektedir. Bu tür işlerde çalışanlarda bel ağrısı, denge bozuklukları, görme bozuklukları, baş ağrısı ve özellikle uyku

bozuklukları söz konusudur. Nari ve arkadaşları [25] çalışmalarında işyerlerinde mesleki gürültü ve titreşime maruz kalan Koreli işçilerin uyku bozukluğu durumlarını araştırmışlar. Uykusuzluk ile gürültü ve titreşim maruziyeti arasında ilişki olduğunu ortaya koymuşlardır.

2.1. Gürültü ve Titreşimle İlgili Mevzuat

Bu çalışma kapsamında yapılan gürültü ve titreşim ölçümlerini değerlendirmek üzere “Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği” esas alınmıştır [26]. Bu yönetmelikte çalışanların, gürültü etkisinden korunması için “Çalışanların Gürültü İle İlgili Risklerden Korunmalarına Dair Yönetmeliği”nin dikkate alınmasının gerekliliği yer almaktadır [27]. Gürültü yönetmeliğinde, en düşük maruziyet eylem değerleri ($L_{EX,8h}$) 80 dBA, en yüksek maruziyet eylem değerleri ise ($L_{EX,8h}$) 85 dBA’dır.

İşveren, en düşük maruziyet eylem değeri aşıldığında kulak koruyucu donanımları hazır halde bulundurmalıdır. En yüksek maruziyet eylem değerine ulaşıldığında ya da bu değer aşıldığında ise, kulak koruyucu donanımların kullanılmasını sağlaması ve bu durumu denetlemesi gerekmektedir. Maruziyet sınır değerleri aşıldığında işveren, sınır değer altına inmek için önlem almak, sınır değer aşılma nedenlerini belirlemek ve bu durumu önlemek için, koruyucu tedbirler almak zorundadır.

Ayrıca Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliğinde çalışanların titreşim maruziyetlerini azaltmak için “Çalışanların Titreşim İle İlgili Risklerden Korunmalarına Dair Yönetmeliği”nin esas alınması gerektiği yer almaktadır [28]. Titreşim Yönetmeliğinde tüm vücut titreşimi için; günlük maruziyet sınır değeri $1,15 \text{ m/s}^2$, eylem değeri $0,5 \text{ m/s}^2$, el kol titreşimi için ise günlük maruziyet sınır değeri: 5 m/s^2 , maruziyet eylem değeri ise; $2,5 \text{ m/s}^2$ olarak belirtilmiştir. Titreşim sınır değeri aşıldığında, işveren; sınır değer altına inmek için önlem almak ve sınır değer aşılma nedenlerini belirlemek zorundadır.

2.2. Kömür Madenlerinde Kullanılan Makinalar

Kömür ocaklarında sondaj makinası, jumbo, martoperfaratör ve martopikör vb. makinalar kullanılmaktadır. Bu makinaların kullanım alanları Çizelge 1'de sunulmaktadır.

Çizelge 1. Kömür madenlerinde kullanılan makinalar

Makinalar	Özellikleri
 Jumbo	Bu makinalar, yeraltı madencilğinde galeri ve lağım sürme işlerinde, patlatma deliklerinin delinmesinde kullanılmaktadır.
 Martoperfaratör	Martoperfaratörler basınçlı hava ile çalışmaktadır. Sert arınlarda patlatma deliklerinin delinmesinde kullanılmaktadır.
 Martopikör	Martopikör, kömürlerin kazısında, yantaşların koparılmasında, tahkimat direği yuvalarının açılmasında kullanılmaktadır.
 Sondaj Makinası	Sondaj makinaları, kömürden karot numunesi almak için ayrıca kömür damarındaki metanın drenaj işlemlerinde kullanılmaktadır.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal

Çalışmada bir yeraltı kömür işletmesindeki lastik tekerlekli jumbo, paletli jumbo, martoperfaratör ve sondaj operatörlerinin maruz kaldıkları gürültü değerleri ölçülmüştür. Operatörlerin etkin çalışma süreleri ise 2 saat olarak değerlendirilmiştir. Gürültü değerlerinin ölçümünde Svantek marka dozimetre cihazı kullanılmıştır (Şekil 1). Dozimetre cihazı makina operatörlerinin kulak hizasında olacak şekilde kıyafetlerine tutturularak gürültü ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 1. Gürültü dozimetre cihazı [29]

Maden işletmelerinde işveren, gürültü kaynaklı riskleri değerlendirirken, titreşim ile gürültü arasındaki etkileşimlerin, çalışanların sağlığına ve güvenliğine olan etkisini de değerlendirmelidir [27]. Bu esasa operatörlerin gürültü maruziyeti değerlendirilirken titreşim maruziyetleri de ele alınmıştır.

Kişisel titreşim maruziyeti ölçümlerinde Bruel&Kjaer marka titreşim ölçüm cihazı kullanılmıştır (Şekil 2). El-kol titreşim ölçüm setindeki aparat operatörlerin eline takılarak; tüm vücut titreşim ölçüm setindeki disk operatörlerin oturduğu koltuğun üzerine koyularak titreşim ölçümleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. Bireysel titreşim ölçüm cihazı [30]

Makinaların titreşim ölçümlerinde ise PCE marka cihaz ile ölçüm yapılmıştır (Şekil 3). Cihaza bağlı probun manyetik özelliği bulunmaktadır. Bu esasa makinanın üstüne tutturularak titreşim ölçümü yapılmıştır.



Şekil 3. Makina titreşim ölçüm cihazı [31]

3.2. Metot

Operatörlerin gürültü maruziyet ölçümleri TS EN ISO 9612 (2009) [32] standardı esas alınarak yapılmıştır. Gürültü ölçümleri, A ağırlıklı ses düzeyinde ve yavaş modda gerçekleştirilmiştir. Eşitlik 1'de sunulan formül kullanılarak, ölçüm sonucu elde edilen veriler eşdeğer gürültü seviyesine dönüştürülmüştür.

$$L_{Aeq} = 10 \cdot \log \left[\left(\frac{1}{n} \right) \sum_{i=1}^n 10^{L_i/10} \right] \quad (1)$$

L_{Aeq} : Eşdeğer gürültü seviyesi (dBA)

n : Ölçüm sayısı

L_i : Ölçüm değerleri (dBA)

8 saatlik çalışma süresi boyunca maruz kalınan gürültü düzeyi ($L_{EX, 8h}$) Eşitlik 2'deki formül kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$L_{EX, 8h} = L_{Aeq} + 10 \log \left[\frac{T_e}{T_0} \right] \quad (2)$$

L_{Aeq} : Eşdeğer gürültü düzeyi (dBA).

T_e : Çalışma gününde etkin olarak maruz kalınan periyot (saat).

T_0 : Referans maruz kalma periyodu (= 8 saat).

Titreşim maruziyet ölçümleri ISO 2631-1 (2013) [33] standardında belirtildiği şekilde yapılmıştır. Titreşim genliğinin belirlenmesinde m/s^2 biriminden frekans ağırlıklı ivmenin RMS (Root Mean Square, ortalama karekök) değerinden ölçümler alınmaktadır.

Günlük titreşim maruziyeti ise 8 saatlik frekans ağırlıklı toplam titreşim değeri $A(8)$ ile gösterilmektedir.

a) El-Kol Titreşim Ölçümleri

El-kol titreşim maruziyetini belirlemek için toplam değer hesaplaması Eşitlik 3'de gösterilmektedir. RMS ivmeleri (a_{wx} , a_{wy} , a_{wz}), TS EN ISO 5349-1'de [34] belirtilen ağırlıklandırma faktörleri (x-ekseni = h_{wx} ; y-ekseni = h_{wy} ; z-ekseni = h_{wz}) kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$a_{hv} = \sqrt{(a_{hwx}^2 + a_{hwy}^2 + a_{hwz}^2)} \quad (3)$$

Günlük kişisel titreşim maruziyeti $A(8)$ (m/s^2), Eşitlik 4'teki formül kullanılarak belirlenmektedir.

$$A(8) = a_{hv} \sqrt{\frac{T}{T_0}} \quad (4)$$

T : Titreşim büyüklüğüne maruz kalma süresi (saat)

T_0 : 8 saat referans süresidir.

b) Tüm Vücut Titreşim Ölçümü

Tüm vücut titreşim ölçümleri ISO 2631-1 (2013) [33] standardında belirtilen formüllere göre hesaplanmaktadır. 8 saatlik frekans ağırlıklı toplam titreşim değeri $A(8)$ ile gösterilmektedir. RMS ivmesi ve 8 saatlik eşdeğer titreşim dozu değerleri Eşitlik 5'deki denklem kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$a_w = \sqrt{\left(\frac{1}{T} \int a_w^2(t) dt \right)} \quad (5)$$

T : Ölçüm süresi,

$aw(t)$: t zamanındaki frekans ağırlıklı ivmedir.

Frekans ağırlıklı ortalama karekök (rms) ivmeleri (a_{wx} ; a_{wy} ; a_{wz}), ISO 2631-1'de [32] (x-axis= Wd ; y-axis= Wd ; z-axis= Wk) yer almaktadır. Ağırlıklandırma faktörleri olarak x-ekseni için, $k=1,4$; y-ekseni için, $k=1,4$; z-ekseni için, $k=1,0$ esas alınır. Frekans ağırlıklı RMS vektörü toplamı değeri Eşitlik 6'daki denklem kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$a_v = \sqrt{(1,4a_{wx})^2 + (1,4a_{wy})^2 + (1,0a_{wz})^2} \quad (6)$$

a_v : Frekans ağırlıklı RMS vektörü toplam değeri
 a_{wx} , a_{wy} ve a_{wz} : x, y ve z eksenindeki frekans ağırlıklı RMS hızlandırma değerleridir.

c) Makinaların Titreşim Ölçümü

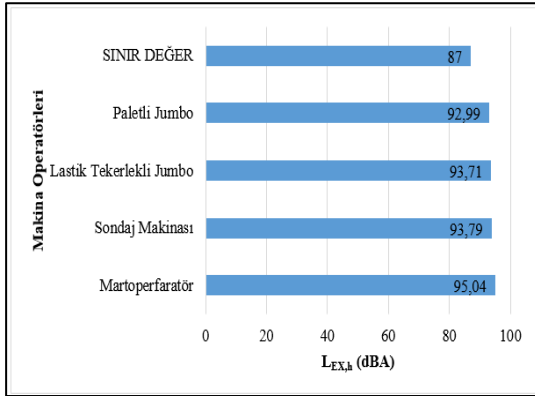
Makinaların titreşim ölçümlerinde PCE marka titreşim ölçer cihaz kullanılmıştır. Bu cihaz makinaların titreşim davranışının değerlendirilmesinde kullanılmakta olup; makinaların titreşim ivmesi, titreşim hızı veya titreşim yer değiştirmesini ölçmektedir. Cihaza bağlı prob makinaların motor kısmının üstüne tutturularak titreşim ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Gürültü Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bir kömür işletmesinde, lastik tekerlekli jumbo, paletli jumbo, martoperfaratör ve sondaj operatörlerinin gürültü maruziyet değerleri Gürültü Yönetmeliği'ne göre değerlendirilmiştir.

Makina operatörlerinin kişisel gürültü maruziyet düzeyleri ($L_{EX,8h}$) Şekil 4'te gösterilmektedir.



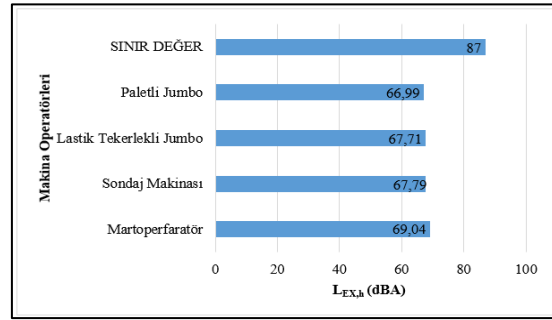
Şekil 4. Makina operatörlerinin kişisel gürültü maruziyet düzeyleri

Şekil 4'te verilen sonuçlara göre martoperfaratör operatörünün diğer operatörlere göre daha fazla gürültüye maruz kaldığı görülmektedir. Dört makina operatörünün maruz kaldığı gürültü değeri de, $L_{EX,8h}=87$ dBA'nın üstündedir.



Şekil 5. Barete takılabilir kulaklık [35]

Bu işletmedeki makina operatörleri gürültüden korunmak amacıyla, sönümleme değeri 26 dBA olan barete takılabilir kulaklık (ergonomik olmasından dolayı) kullanılmaktadır (Şekil 5). Böylelikle operatörler ortamdaki gürültü değerinden 26 dBA daha az gürültüye maruz kalmaktadırlar. Şekil 6'da makina operatörlerinin kulak koruyucu takılıken maruz kaldıkları gürültü düzeyleri yer almaktadır.



Şekil 6. Makina operatörlerinin kulaklık takılıken kişisel gürültü maruziyet düzeyleri

Kulaklık takan dört makina operatörünün maruz kaldığı gürültü değerinin sınır değerinin altında olduğu tespit edilmiştir.

4.2. Titreşim Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Martoperfaratör operatörü, arın formasyonu çok sert kayaç içeren lağımda delik delerken eldivensiz el-kol titreşim ölçümü yapılmış olup, titreşim maruziyet değeri $13,66 \text{ m/s}^2$ çıkmıştır (Şekil 7). Bu değer yönetmelikte belirtilen sınır değerinin oldukça üstündedir.

Ayrıca martoperfaratör operatörünün arın kömüründe delik delerken, martopikör operatörünün ise baca arınında demirbağın direk dibi yerlerini açarken el-kol titreşim ölçümleri de

yapılmış olup, titreşim maruziyet değerleri martoperfaratör operatörü için $2,28 \text{ m/s}^2$, martopikör operatörü içinse $2,41 \text{ m/s}^2$ olarak tespit edilmiştir. Her iki değer titreşim maruziyeti sınır değerinin altında olduğu görülmekle birlikte, martopikör operatörü için ölçülen değer maruziyet eylem değerine oldukça yakındır.

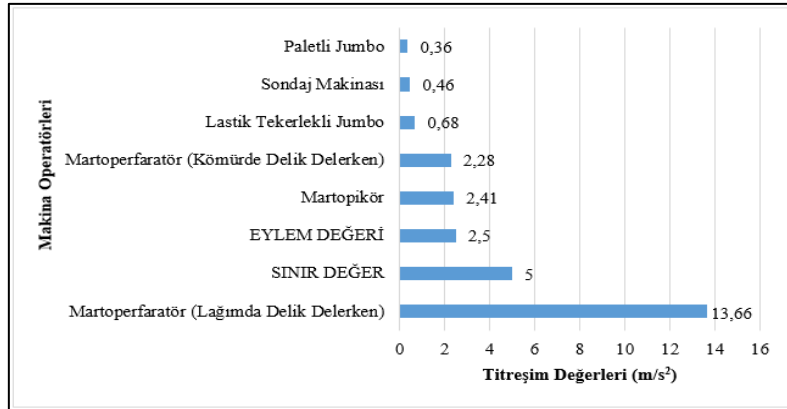
Galeri ilerlemesi çalışmaları sırasında delik delme işlemi yapan paletli jumbo operatörü için $0,36 \text{ m/s}^2$, lastik tekerlekli jumbo operatörü için $0,68 \text{ m/s}^2$ ve kömürde delik delme işlemi yapan sondaj operatörü için $0,46 \text{ m/s}^2$ olarak ölçülen el-kol titreşim değerleri mevzuatta belirtilen sınır ve eylem değerlerin altında çıkmıştır.

Kömürde sondaj işlemleri yapılırken, sondaj operatörünün el-kol titreşim ölçümü yapılmıştır.

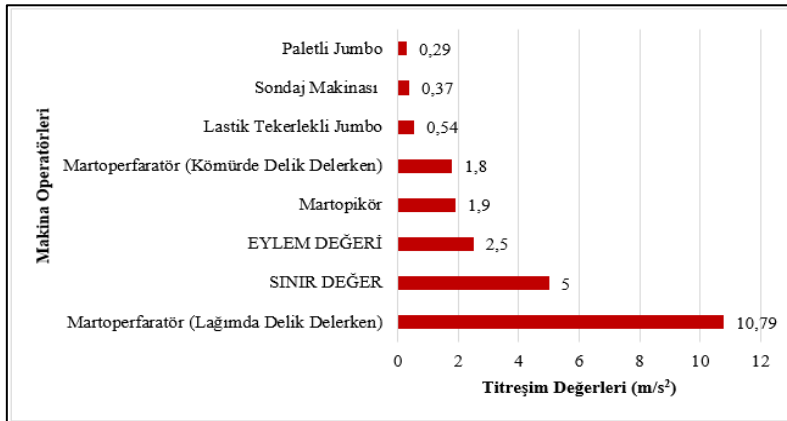
Ölçülen titreşim maruziyet değeri ($0,46 \text{ m/s}^2$) sınır değerinin altında çıkmıştır.

Arıtan ve Memiş [36] çalışmalarında iş makineleri operatörlerinin (ekskavatör, kamyon ve yükleyici) el-kol titreşim maruziyetlerini ölçmüşlerdir. Ayrıca operatörlerin titreşim maruziyetini azaltmak için operatörlere titreşim sönümleyici eldiven kullandırmışlardır.

Eldivenli ve eldivensiz titreşim maruziyet düzeyleri arasında %15-21 fark tespit etmişlerdir. Bu çalışma kapsamında işletmedeki makina operatörlerine ortalama %21 koruma sağlayan titreşim sönümleyici eldiven kullanıldığında elde edilen titreşim maruziyet değerleri Şekil 8'de gösterilmektedir.



Şekil 7. Makina operatörlerinin eldivensiz el-kol titreşim sonuçları



Şekil 8. Makina operatörlerinin eldivenli el-kol titreşim sonuçları

Titreşim sönümleyici eldiven kullanan martoperfaratör operatörünün, çok sert kayaç içeren lağımda delik delerken maruz kaldığı titreşim değeri $13,66 \text{ m/s}^2$ 'den $10,79 \text{ m/s}^2$ 'ye düşmektedir (Şekil 8). Ancak bu değer yine de yönetmelikte belirtilen sınır değerinin oldukça üstündedir.

Bazı makina operatörleri kişisel koruyucu donanım olarak titreşim sönümleyici eldiven kullandığında maruziyet miktarının azaldığı ancak yönetmelikte belirtilen sınır değere indirilemediği tespit edilmiştir.

Bu esasla martoperfaratör operatörünün çalışma süresi azaltıldığında maruz kalacağı titreşim değerleri Eşitlik 4'teki formül kullanılarak hesaplanmıştır. Martoperfaratör operatörü 1 saat çalıştığında $4,83 \text{ m/s}^2$, 2 saat çalıştığında $6,83 \text{ m/s}^2$, 4 saat çalıştığında ise $9,66 \text{ m/s}^2$ titreşime maruz kalmaktadır. Operatör 2 saat ve 4 saat çalıştığında maruz kaldığı titreşim değerleri sınır değerinin üstünde çıkmıştır. Bu nedenle martoperfaratör operatörü için etkin çalışma süresi 1 saat olarak tespit edilmiştir.

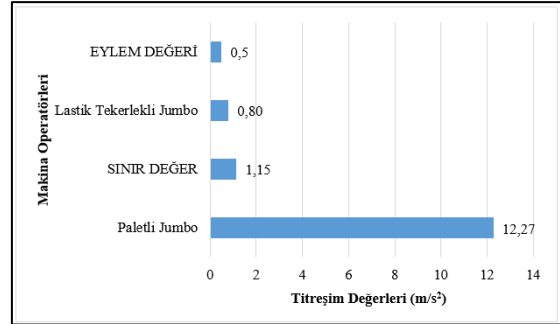
Çalışma süresinin azaltılmasının yanısıra makinayı kullanacak operatörlerin dönüşümlü olarak çalıştırılması, makinanın tutma kolunun titreşim

sönümleyici malzeme ile kaplanması ve operatörün sönümleyici eldiven kullanması gibi önlemlerle martoperfaratör operatörünün maruz kaldığı titreşim değerinin, sınır değerinin altına indirilmesi sağlanabilir.

Ayrıca, delik delme işlemleri sırasında lastik tekerlekli ve paletli jumbo operatörlerinin tüm vücut titreşim ölçümleri yapılmıştır (Şekil 9).

Her iki makinanın delik deldiği formasyon (gre) aynı olmasına rağmen paletli jumbo operatörünün maruz kaldığı tüm vücut titreşim değeri ($12,27 \text{ m/s}^2$) yönetmelikte belirtilen sınır değerinin oldukça üstünde çıkmıştır.

Lastik tekerlekli jumbo operatörünün maruz kaldığı tüm vücut titreşim değeri ($0,80 \text{ m/s}^2$) ise yönetmelikte belirtilen eylem değerinin üstündedir.



Şekil 9. Makina operatörlerinin tüm vücut titreşim sonuçları

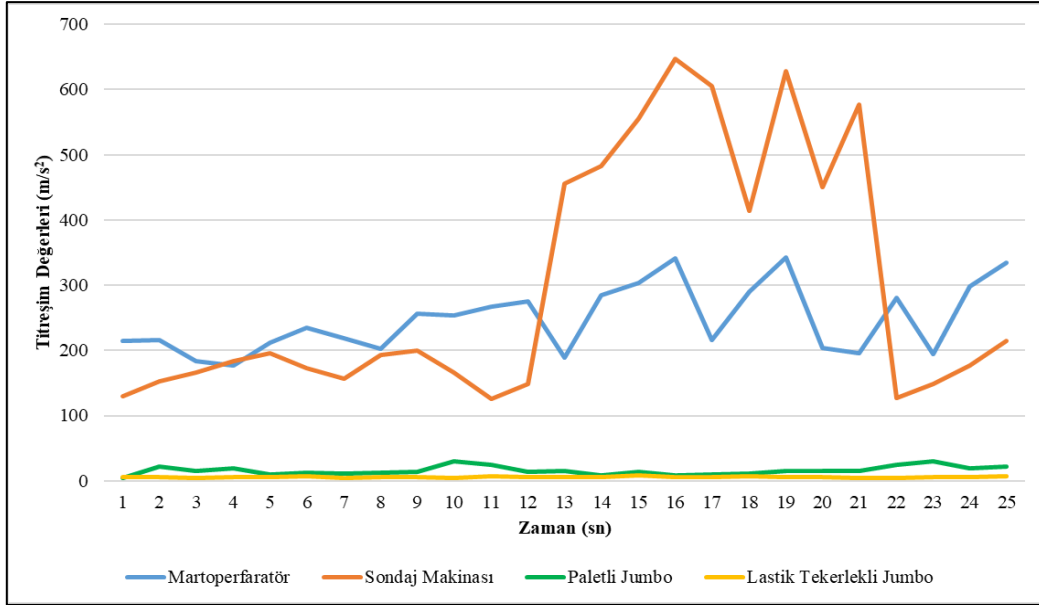
Paletli jumbo operatörünün çalışma süresi azaltıldığında maruz kalacağı titreşim değerleri Eşitlik 4'teki formül kullanılarak hesaplanmıştır. Paletli jumbo operatörü 1 saat çalıştığında $4,34 \text{ m/s}^2$, 2 saat çalıştığında $6,14 \text{ m/s}^2$, 4 saat çalıştığında ise $8,68 \text{ m/s}^2$ titreşime maruz kalmaktadır. Operatör 2 saat ve 4 saat çalıştığında maruz kaldığı titreşim değerleri sınır değerinin üstündedir. Bu nedenle paletli jumbo operatörü için etkin çalışma süresi 1 saat olarak tespit edilmiştir.

Şekil 10'da Martoperfaratör, sondaj, lastik tekerlekli jumbo ve paletli jumbo makinalarının titreşim ölçüm sonuçları yer almaktadır.

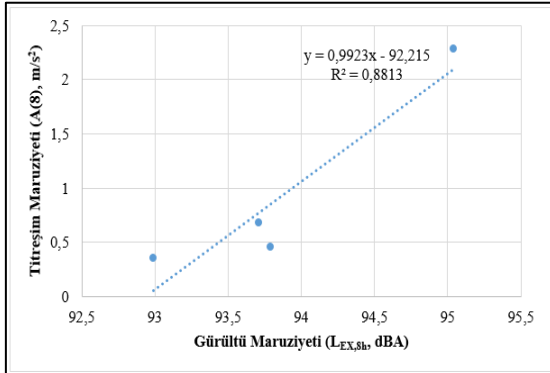
Dört makinanın titreşim sonuçları karşılaştırıldığında en fazla titreşimin, sondaj makinasında olduğu görülmektedir. Bu sıralamayı martoperfaratör, paletli ve lastik tekerlekli jumbo makinası takip etmektedir (Şekil 10).

Makinalardaki titreşim yolun pürüzlülüğüne, makinanın dönen elemanlarının arıza durumuna, motor titreşimlerine ve seyir hareketlerine bağlı olarak değişmektedir. Paletli ve lastik tekerlekli jumbo makinalarının titreşim durumlarındaki farklılık bu durumu çok iyi açıklamaktadır.

Ayrıca çalışma kapsamında, sondaj, paletli jumbo, lastik tekerlekli jumbo ve martoperfaratör operatörlerinin gürültü maruziyet değerleri ile el-kol titreşim maruziyet değerleri arasındaki ilişki incelenmiş ve aralarında $R^2=0,88$ 'lik bir korelasyon tespit edilmiştir (Şekil 11).



Şekil 10. Makinaların titreşim değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 11. Makina operatörlerinin gürültü maruziyet değerleri ile el-kol titreşim maruziyet değerleri arasındaki ilişki

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada bir yeraltı kömür işletmesindeki maden makinalarını operatörlerinin maruz kaldıkları gürültü ve titreşim değerleri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Gürültü ve Titreşim Yönetmelikleri kapsamında değerlendirilmiştir.

Martoperfaratör, paletli jumbo, lastik tekerlekli jumbo ve sondaj operatörleri kulaklık

takmadığında gürültü maruziyet değerleri sınır değerinin (>87 dBA) üzerinde çıkmıştır. Bu işletmede çalışan makina operatörlerinin gürültü düzeyine uygun kulak koruyucu kullandığında ise elde edilen gürültü maruziyet değerlerinin sınır değerinin altında olduğu belirlenmiştir. Ölçüm yapılan bu işletmede çalışan tüm operatörlerin kulak koruyucu kullanımını konusunda bilinçli oldukları gözlemlenmiştir.

Gürültü ile mücadele konusunda ayrıca makinalarda ses yalıtım sistemleri bulundurulmalı ve makinaların periyodik bakımları ihmal edilmemelidir. Kulaklık takmasına rağmen yüksek gürültü seviyelerine maruz kalan operatörler ses yalıtımlı kabinler ile de korunabilmektedir.

Çalışanların konforuna, psikolojisine ve ergonomiye uygun kişisel koruyucu donanım tercihi yapılmalıdır.

Çalışma kapsamında yapılan makina titreşim ölçüm sonuçlarına göre en fazla titreşim sondaj makinasında tespit edilmiştir.

Makinaların titreşim ölçüm değerleri çalışma yapılan sahadaki kayaçların yapısı, zeminin

pürüzlülüğü ve ekipmanın bakımına bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle maden makinalarını kullanan operatörlerin kişisel titreşim ölçümleri periyodik olarak yapılmalıdır.

Martoperfaratör operatörünün (lağım ilerlemesi sırasında delik delerken) el-kol titreşim maruziyet düzeyi, çalışma süresi kısa tutularak, bu makinaı kullanan diğer operatörler ile dönüşümlü çalışma imkanı sağlanarak ve makinanın tutma kolu titreşim sönümleyici malzeme ile kaplanarak azaltılabilir. Ayrıca makinalarda vibrasyon emici sistemin bulunması da oldukça mühim bir konudur.

Martopikör operatörünün eldivensiz titreşim maruziyet değeri, eylem değerine oldukça yakın iken titreşim sönümleyici eldiven kullanıldığında titreşim maruziyet değeri eylem değerinin altında düşmektedir.

Tüm vücut titreşim ölçüm sonuçlarına göre, lastik tekerlekli ve paletli jumbo operatörlerinin titreşim maruziyetleri çalışma ve dinlenme sürelerinin yönetmelikte belirtilen sınır değerlere göre belirlenmesi ve operatörlerin dönüşümlü çalışma imkânının sağlanması ile azaltılabilir.

Makina operatörüne iletilen titreşim değeri üzerinde makina, koltuk, lastik ve zemin etkilidir. Uygun lastik, iyi bir süspansiyon düzeni ve operatör koltuğu ile de titreşim azaltılabilir. Ayrıca operatörlerin sağlık gözetimleri de ihmal edilmemelidir.

Çalışanları titreşim ve gürültü kaynaklı risklerden korumada ve yönetmelikte belirtilen titreşim ve gürültü düzenlemelerine uymalarını sağlamada etkili yöntem çalışanlara verilen eğitimler ve yapılan sıkı denetimlerdir.

6. KAYNAKLAR

1. Haşgür, İ., 1998. Gürültü Kirliliğinin Türk Mevzuatındaki Yeri. *Çevre Dergisi*, 31-33.
2. Kurtuluş, C., Endeş, H., 1998. İzmit'te Karayolu ve Demiryolunda Taşıt Gürültüsünü Etkileyen Etmenlerin İncelenmesi. *Uygulamalı Yerbilimleri*, 1(1), 31-38.
3. Şensöğüt, C., Çınar İ., 2006. Açık Ocaklarda Gürültü Yayılımının Geliştirilen Bir Model ile İncelenmesi. *Madencilik*, 45 (3), s. 27-33.
4. Zeyrek, S., 2009. Titreşim. *İş Sağlığı ve Güvenliği*, Uzmanlık Tezi, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, Ankara.
5. Fritz, M., 2000. Description of the Relationship Between the Forces Acting in the Lumbar Spine and Whole Body Vibrations By Means of Transfer Functions. *Clin Biomech (Bristol Avon)*, 15, 234-40.
6. Özgen, Z., 2015. Maden İşyerlerinde Kullanılan Bazı İş Araçlarından Kaynaklanan El-kol Titreşim Maruziyetinin Ölçümü ve Değerlendirilmesi. *Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sivas, 134.
7. Arıtan, A.E., Tümer, M., 2018. Doğal Taş Ocaklarında Martopikör Kullanımında El-kol Titreşim Maruziyetinin İncelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(4), 57-66.
8. Youakim, S., 2009. Hand-arm Vibration Syndrome. *BC Medical Journal*, 51(1), 10.
9. ISO 2631-1, 1997. Mechanical Vibration and Shock-evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration-part 1: General Requirements, Geneva.
10. HSE, 2005. Hand-arm Vibration and Whole Body Vibration. Health and Safety, www.hse.gov.uk/vibration, Son Erişim: 12.03.2018.
11. Xu, X., Yuan, Z., Gong, M., He, L., Wang, R., Wang, J., Yang, Q., Wang, S., 2017. Occupational Hazards Survey Among Coal Workers Using Hand-held Vibrating Tools in a Northern China Coal Mine. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 62, 21-26.
12. Marin, L.S., Andres, C., R., Estefany, R., Hugo, P., Lope, H. B., Jack, T.D., Peter, W.J., 2017. Assessment of Whole-body Vibration Exposure in Mining Earth-moving Equipment and Other Vehicles Used in Surface Mining. *Annals of Work Exposures and Health*, Cilt 61, Sayı 6, 669-680.
13. Alphin, M.S., Sankaranarayanan, K., Sivapirakasam, S.P., 2010. Experimental Evaluation of Whole Bodyvibration Exposure from Tracked Excavatorswith Hydraulic

- Breaker Attachment in Rockbreaking Operations. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 29(2), 101-110.
14. Seidel, H., 2005. On the Relationship Between Whole-body Vibration Exposure and Spinal Health Risk. *Industrial Health*, 43, 361-377.
15. Ljungberg, J.K., Parmentier, F.B.R., 2010. Psychological Effects of Combined Noise and Whole-body Vibration. A Review and Avenues for Future Research, *Journal of Automobile Engineering*, 224(10), 1289-1302.
16. Arıtan, A.E., Tümer, M., 2019. Doğal Taş Ocaklarında Ekskavatör Operatörlerinin Tüm Vücut Titreşim Maruziyetinin İncelenmesi. *SÜ. Müh. Bilim ve Tekn. Derg.*, 7(2), 321-330.
17. Nyantumbu, B., Barber, C.M., Ross, M., Curran, A.D., Fishwick, D., Dias, B., Kgalamono, S., Phillips, J.I., 2007. Hand-arm Vibration Syndrome in South African Gold Miners. *Occupational Medicine*, 57(1), 25–29.
18. Sharma, O., Mohanan, V., Singh, M., 1998. Noise Emission Levels in Coal Industry. *Applied Acoustics*, 54(1), 1-7. 5.
19. Roy, S., Adhikari, G.R., 2007. Worker Noise Exposures from Diesel and Electric Surface Coal Mining Machinery. *Noise Control Eng. J.*, 55, 434-437.
20. Şensöğüt, C., 2007. Occupational Noise in Mines and its Control-A Case Study. *Polish J. of Environ. Stud.*, 16 (6), 939-942.
21. Şensöğüt, C., Eralp, H., 1998. Ömerler Yeraltı Ocağındaki Gürültü Ölçümleri ve Öneriler. *Türkiye 11. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı*, 43-52.
22. İSGİP, 2013. Meslek Hastalıkları ve İşle ilgili Hastalıklar Tanı Rehberi. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, Ankara. <http://isgip.gov.tr>
23. Bilir, N., 2016. İş Sağlığı ve Güvenliği. Hacettepe Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Halk Sağlığı Anabilim Dalı, Güneş Tıp Kitabevi, 261.
24. Erol, İ., 2020. Ülkemizde Madencilik Sektöründe Görülen Meslek Hastalıklarının İncelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(4), 859-872.
25. Nari, F., Kim, Y.K., Kang, S.H., Park, E.C., Jang, S.I., 2020. Association Between Occupational Noise and Vibration Exposure and Insomnia Workers in Korea. *Life*, 10, 46, 2-15. doi:10.3390/life10040046.
26. Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği, 2013. 19.9.2013 Tarihli ve 28770 Sayılı Resmi Gazete, Ankara.
27. Gürültü Yönetmeliği, 2013. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, Resmi Gazete, 28.07.2013 Tarih, Sayı 28721, Ankara.
28. Titreşim Yönetmeliği, 2013. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, Resmi Gazete, 22.08.2013 Tarih, Sayı 28743, Ankara.
29. Svantek, 2021. Kişisel Gürültü Ölçüm Cihazı. <https://svantek.com/products/sv-104a-personal-noise-dosimeter/> Son Erişim:10.10.2021.
30. Brüel&Kjaer, 2002. Human Vibration, Brüel & Kjaer Sound & Vibration Measurement A/S. Nærum, Denmark.
31. PCE-VM20, 2021. Vibration Meter. https://www.pceinstruments.com/english/measuring-instruments/test-meters/vibration-meter-pce-instruments-vibration-meter-pce-vm-20-det_5889346.htm Son Erişim:10.10.2021.
32. TS EN ISO 9612, 2009. Akustik-Çalışma Ortamında Maruz Kalınan Gürültünün Belirlenmesi- Mühendislik Yöntemi.
33. TS ISO 2631-1., 2013. Türk Standartları, Mekanik Titreşim ve Şok-Tüm Vücut Titreşime Maruz Kalma Değerlendirilmesi-Bölüm 1: Genel Kurallar, TSE, Ankara
34. TS EN ISO 5349-1, 2005. Türk Standartları, Mekanik Titreşim-Kişilerin Maruz Kaldığı, Elle İletilen Titreşimin Ölçülmesi ve Değerlendirilmesi-Bölüm 1: Genel Kurallar, TSE, Ankara.
35. 3M, 2022. Kişisel Koruyucu Ekipman. https://www.3m.com.tr/3M/tr_TR/p/c/kisisel-koruyucu-ekipman/isitme-koruma/koruyucu-kulakliklar. Son Erişim: 01.01.2022.
36. Arıtan, A.E., Memiş, Z., 2019. Doğal Taş Ocağında Sahada Çalışan Operatörlerin Titreşim Maruziyetinin İncelenmesi. *Uluslararası Maden İşletmelerinde İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Sempozyumu 2019*, 485-492, Adana.

Seralarda Doğal Havalandırma Açıklıklarının Belirlenmesi

A. Nafi BAYTORUN*¹ ORCID 000-0002-5971-6893

Mahamed Abdalla MAKAY ABASS¹ ORCID 0000-0002-6614-1784

¹Çukurova Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü, Adana

Geliş tarihi: 04.05.2021

Kabul tarihi: 21.03.2022

Atıf şekli/ How to cite: BAYTRUN, A.N., MAKAY ABBAS, M.A., (2022). Seralarda Doğal Havalandırma Açıklıklarının Belirlenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37(1), 67-78.

Öz

Güneş ışınımı şiddetinin yüksek olduğu dönemlerde seralarda bitkilerin arzu ettiği konfor ortamı en ucuz olarak doğal havalandırma ile sağlanabilmektedir. Bitkisel üretimin yapıldığı serada iyi bir havalandırma ile hava sıcaklığı dış sıcaklığın 1-2 °C üzerine çekilirken, bitki sıcaklığı hava sıcaklığının 5-15 °C üzerine yükselmektedir. Belirtilen nedenle havalandırma ile gölgelemenin birlikte yapılması sıcak dönemlerde bitki konfor ortamının sağlanmasında etkili bir iklimlendirme yöntemi olarak kabul edilmektedir. Hava değişim sayısı seralarda havalandırma etkinliğinin belirlenmesinde kullanılan önemli bir parametredir. Hava değişim sayısı havalandırma açıklıklarının büyüklüğüne, konumuna ve havalandırma açıklıklarında kullanılan böcek tüllerinin porozitelerine bağlı olarak değişmektedir.

Yapılan çalışmada havalandırma açıklıklarının büyüklüğüne, kullanılan böcek tülünün porozite katsayısına ve rüzgâr hızına bağlı olarak hava değişim sayısı ve ulaşılabilen sıcaklık farkı hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda %50 oranında gölgelendirilen, sera taban alanına göre çatısında %40 oranında havalandırma açıklığı bulunan ve havalandırma açıklıklarına böcek tülünün gerildiği seralarda ulaşılan hava değişim katsayısı 30 h⁻¹ olurken sıcaklık farkı 1,6 °C olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sera, İklimlendirme, Havalandırma

Determination of Natural Ventilation Openings in Greenhouses

Abstract

During periods when the intensity of solar radiation is high, it is possible to provide the comfortable environment desired by plants in greenhouses with natural ventilation as the cheapest method. In the greenhouse where plant production is carried out, with good ventilation, the air temperature is become above the external temperature by 1-2 °C, while the plant temperature can rise above the air temperature by 5-15 °C. For this reason, ventilation and shading together are considered an effective method of air conditioning in providing a plant comfortable environment during hot periods. The ventilation rate of air is an important parameter used to determine the ventilation efficiency in greenhouses. The number of air

*Sorumlu Yazar (Corresponding author): A. Nafi BAYTORUN, baytorun@cu.edu.tr

changes (ventilation rate) varies depending on the size, location of the ventilation openings, and the porosity of the insect tulle used in the ventilation openings.

In this study, depending on the size of the ventilation openings and the porosity coefficient of the insect tulle used, and the wind speed, the ventilation rate, and the temperature difference that could be reached were determined. As a result of the calculations, in 50% shaded greenhouse and when the ventilation openings area on the roof to the greenhouses floor area was 40% while the insect tulle were used on the ventilation openings, the temperature difference was determined as 1.6 °C according to the air change coefficient of 30 h⁻¹ that was achieved in the greenhouses.

Keywords: Greenhouse, Climatization, Ventilation

1. GİRİŞ

Sıcak dönemlerde seraya ulaşan güneş ışınımına bağlı olarak artan sıcaklığın düzenlenmesi için seralar iklimlendirilmelidir. Seralarda yetiştirilen bitkilerin çoğu, 10 °C ve 35 °C'lik alt ve üst sınırlar ile 17 °C–27 °C aralığında ortalama sıcaklıklara adapte olmuş sıcak iklim türleridir. Günlük minimum sıcaklık <10 °C olduğunda, seralarda gece saatlerinde ısıtma yapılmalıdır. Maksimum sıcaklık <27 °C olduğunda, havalandırma ve gölgeleme yeterli olabilirken, sıcaklık 27 °C'nin üzerine yükselince serada soğutma gereklidir. Seralarda maksimum sıcaklık uzun süreli olarak 30-35 °C'yi geçmemelidir [1].

Günlük ortalama sıcaklığın 12-22 °C arasında olması durumunda, seralarda bitkiler için konfor ortamının sağlanması havalandırma ile mümkündür. Günlük ortalama sıcaklığın 22 °C'nin üzerine çıkması durumunda havalandırma ile birlikte gölgeleme ve aktif soğutma önlemlerinin alınması üretimin devamı için gereklidir [2-4].

Kuzey Avrupa ülkelerinde, ısıtma ve havalandırma, seralarda sıcaklığın yıl boyunca kontrol edilmesine olanak sağlarken, Türkiye, Yunanistan ve güney İspanya gibi daha düşük enlemlerde yer alan ülkelerde, yaz aylarında yeterli bir serinletme için gündüz saatlerindeki sıcaklıklar havalandırma için çok yüksek olabilmektedir. Bu ülkelerde üretimin seralarda devamı için aktif soğutma gereklidir [5].

Seralarda en ucuz iklimlendirme yöntemi doğal havalandırma. Havalandırma, sıcaklığın, nemin

ve CO₂ konsantrasyonunun düzenlenmesine olanak sağlar. Serada bağıl nemin gece saatlerinde uzun süre %95'i aşması ve sıcaklığın çiğ noktasına ulaşması sonucunda, Botrytis cinerea ve küllenme gibi mantar hastalıklarının hızlı gelişimi gibi ciddi sorunlar ortaya çıkabilir. Ayrıca bitkilerde kalsiyum eksikliği ile ilgili problemlerden kaçınmak için yeterli terlemeyi sağlayan buhar basıncı açığı (VPD) nem kontrolü yapılarak uygun aralıklarda tutulmalıdır [1]. Seralarda yapılan domates üretiminde VPD 0,8-0,9 kPa olmalıdır. Bu da sıcaklığın 24 °C olduğu koşullarda %70 bağıl neme eşdeğerdir [6]. Seralarda nem düzenlenmesi genellikle havalandırma ile yapıldığından, havalandırma sadece sıcak dönemlerde değil tüm üretim periyodu boyunca bitkiler için gerekli olan konfor ortamının sağlanmasına hizmet eder.

Seralarda iyi bir havalandırma ile ulaşılan sıcaklık farkı 2-3 °C arasında değişir [4]. Akdeniz bölgesinde %40 havalandırma açıklığına böcek tülü gerilmiş üretici seralarında yapılan ölçümlerde Ekim ayında ulaşılan sıcaklık farkı 1-2 °C arasında değişmektedir [7].

Seralarda havalandırma ile ulaşılan sıcaklık, havalandırma açıklıklarının boyutlarına, konumlarına, rüzgâr etkisine bağlı olarak değişmektedir. Böcek tüllerinin kullanılmadığı seralarda, iyi bir havalandırma için, havalandırma açıklıklarının sera taban alanına oranı %20-25 arasında olması yeterlidir [8].

Seralarda havalandırmanın etkinliği üç farklı değişkenle belirlenir. Bunlar; hava değişim

katsayısı (N), birim alana tekabül eden hava değişim sayısı (V_A) ve havalandırma etkinliğidir (V_{eff}) [4,9,10]. Hava değişim katsayısı, havalandırma açıklıklarından ortaya çıkan hava akış debisinin sera hacmine oranı olup sera tipine bağlı bir katsayıdır. Bu katsayı sera tipine bağlı olduğundan, havalandırma etkinliğinin belirlenmesinde birim alana tekabül eden hava değişim sayısı daha fazla kullanılmaktadır [10]. Birim alana tekabül eden hava değişim sayısı, havalandırma açıklıklarından ortaya çıkan hava akış debisinin sera taban alanına oranıdır.

Seralarda iyi bir havalandırma için hava değişim katsayısının 30 h^{-1} , çok iyi bir havalandırma için 50 h^{-1} olması istenir. Bu değer ortalama yüksekliği 6 m olan serada $300 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ hava değişim sayısına eşdeğerdir [10,11].

Seralarda hava değişimi iç ve dış ortam arasındaki basınç farkından ortaya çıkar. Ortaya çıkan basınç farkı, iç ve dış ortam arasındaki sıcaklık, nem farkına ve rüzgârın sera yüzeyinde yarattığı etkiye bağlıdır. Rüzgâr havalandırma açıklıklarında bir basınç alanı oluşturarak hava akımının meydana gelmesini sağlar. Ortaya çıkan basınç, seraya hava girdiğinde pozitif, hava çıktığında negatif olmaktadır. Rüzgârın sera üzerindeki etkisi, ortalama rüzgâr hızına bağlı statik basınç tarafından tetiklenen ve Bernoulli denklemi ile açıklanabilen sabit etki ve rüzgârın türbülans özelliklerine bağlı etki olmak üzere iki bileşene ayrılır [12-13].

Seralarda doğal havalandırmanın etkinliğini belirlemek amacıyla birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların çoğu, indikatör gaz ölçümlerini kullanarak hava değişim katsayısı tahminlerine [10,14-16] ve enerji dengesi modellerinden homojen hava sıcaklığının simülasyonlarına [17,18] dayanmaktadır. Von Zabeltitz, enerji dengesi yöntemine göre hava değişim sayısını hesaplayarak, Baytorun [10] tarafından indikatör gaz yöntemine göre belirlenen hava değişim sayıları ile karşılaştırmıştır. Enerji dengesine göre hesaplanan değerler, Baytorun'un indikatör gaz yöntemine göre belirlediği sonuçlarla çok iyi bir uyum göstermiştir [9]. Baptista ve arkadaşları [14] yaptıkları çalışmada büyük havalandırma

açıklıklarına sahip seralarda her iki yöntemle göre belirlenen hava değişim katsayıları arasında çok iyi bir uyumun bulunduğunu belirlemişlerdir. Havalandırma açıklıklarından ortaya çıkan hava akışının doğrudan tahmini, değişik seralarda basınç farkının ölçülmesi ile de belirlenmiştir [13,19].

Doğal havalandırmada, genellikle hem rüzgâr hem de sıcaklık farkının yarattığı etki söz konusudur. Rüzgâr hızının yüksek olduğu bölgelerde bu etki, sıcaklık farkına baskındır. Rüzgâr zayıfladığında sıcaklık farkının yarattığı kuvvet ön plana çıkar. Meneses ve Raposo [20], çatıda ve yan duvarlarda havalandırma açıklıkları bulunan seralarda, $0,5-1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ rüzgâr hızlarında, sıcaklık farkının rüzgâr etkisine göre baskın olduğunu, daha yüksek rüzgâr hızlarında bunun tersi olup sıcaklık farkı etkisinin göz ardı edilebileceğini belirlemişlerdir. Ancak bu sınır, sera geometrisine, havalandırma açıklıkları konumuna ve iç-dış sıcaklık farklılıklarına bağlı olarak değişebilmektedir.

Sıcaklık farkının hava değişimine etkisi, yan duvar ve çatı havalandırmasına sahip seralarda sıcaklık farkının büyük olduğu koşullarda önemlidir [21]. Sadece çatı havalandırmasına sahip blok seralarda şömine etkisi yaratan yan duvar ve çatı havalandırma açıklıkları arasındaki yükseklik (h) oluşmadığından sıcaklık farkının hava değişimine etkisi ihmal edilecek düzeyde küçüktür. Rüzgâr hızı $> 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ olduğunda [14], rüzgâr hızı $> 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 'den [22] veya $v_w / \Delta T^{0,5} > 1$ olduğunda [23,24] Sıcaklık farkının hava değişimine etkisi ihmal edilmektedir.

Havalandırma açıklıklarında ortaya çıkan deşarj katsayısı (C_d) havalandırma kapaklarının konumlarına, rüzgâr yönüne ve havalandırma açıklıkları boyutlarına bağlı olarak değişir. Bot [12] yaptığı çalışmada C_d 'yi 0,65-0,7 arasında belirlerken, De Jong [25] 0,65-0,75, Boulard ve Baille [13] 0,644 olarak bulmuşlardır.

Boulard ve Baille [13] havalandırma açıklıkları boyut oranlarının (L_o/H_o) 32 olduğu serada C_d 'nin 0,705 alınabileceğini belirlemişlerdir. Aynı şekilde Papadakis ve arkadaşları [22] yaptıkları çalışmada (L_o/H_o) 33 için C_d 'yi 0,707,

havalandırma kapaklarının seranın yan duvarında bulunması durumunda L_0/H_0 37 için C_d 'yi 0,712 olarak belirlemişlerdir. Von Zabeltitz [4] rüzgâr yönü dikkate alınmadan havalandırma kapaklarının sadece çatıda bulunması durumunda C_d 'nin 0,649, yan duvarda bulunması durumunda 0,666 alınabileceğini ifade etmiştir.

Blok olarak inşa edilen seralarda dış tüneldeki havalandırma açıklıklarında ortaya çıkan deşarj katsayısı, ara tünellerde ortaya çıkan deşarj katsayısına göre farklılıklar göstermektedir. Munoz [11] tarafından yapılan araştırmalarda havalandırma kapaklarının boyut oranlarına bağlı olarak dış tünellerde ortaya çıkan deşarj katsayısı 0,681-0,815 arasında değişirken, ara tünellerde 0,518-0,621 arasında belirlenmiştir. Farklı araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar sonucunda deşarj katsayısını 0,6-0,8 arasında belirlemiştir.

Seralarda havalandırma açıklıklarında ortaya çıkan hava akış debisinin belirlenmesinde gerekli olan rüzgâr basınç katsayısı (C_w), farklı araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarla belirlenmiştir. Küçük boyutlu seralar üzerinde yapılan çalışmalarda C_w katsayısı, Baptista ve arkadaşları, [14] 0,09, Boulard ve Baille [13] 0,10, Kittas ve arkadaşları, [19] 0,14 ve Papadakis ve arkadaşları, [22] tarafından 0,13 olarak bulunmuştur. Munoz, [11] yaptığı çalışmada rüzgâr basınç katsayısının rüzgârın esiş yönüne bağlı olarak değiştiğini, basma yönündeki havalandırma kapaklarının açık olması durumunda C_w katsayısının 0,430, emme yönündeki havalandırma kapaklarının açık olması durumunda C_w katsayısının 0,079 alınabileceğini belirlemiştir.

Baptista ve arkadaşları [14] yaptıkları çalışmada $C_d * C_w^{0,5}$ 'i rüzgâr etki katsayısı olarak tanımlayarak hesaplamalarda bu değer 0,20 olarak alınabileceğini belirlemiştir. Von Zabeltitz [4] $C_d * C_w^{0,5}$ 0,22 olarak alınabileceğini ifade etmektedir.

Yapılan bu çalışmada sera donanımına (örtü malzemesi, gölgeleme, havalandırma açıklık boyutları, böcek tülü) ve bölgenin iklim

koşullarına (güneş ışınımı şiddeti, rüzgâr hızı) bağlı olarak enerji dengesi yöntemi ve Bernoulli eşitlikleri kullanılarak hava değişim sayılarının belirlenmesi ve belirlenen hava değişim sayılarına bağlı olarak serada ulaşılan sıcaklık farklarının hesaplanması amaçlanmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

Seralarda enerji dengesi yöntemine göre güneşten kazanılan ve örtü yüzeyinden kaybedilen ısı enerjileri eşittir. Seralarda enerji dengesi, toprağa olan ısı akışı ve fotosentezde kullanılan ısı enerjisi (%2-3) ihmal edildiğinde Eşitlik 1 ile ifade edilir [9,26-28].

$$\tau \cdot I_0 = U \cdot \frac{A_C}{A_G} \cdot \Delta T + V_A \cdot c_p \cdot \rho \cdot \Delta T + E \cdot f \cdot \tau \cdot I_0 \quad (1)$$

Eşitlikte;

τ : Örtü malzemesinin geçirgenliği (-),

I_0 : Güneş ışınımı şiddeti ($W m^{-2}$),

c_p : Havanın özgül ısısı ($Wh kg^{-1}K^{-1}$),

ρ : Havanın yoğunluğu ($kg m^{-3}$),

ΔT : İç-dış sıcaklık farkı ($^{\circ}C$),

U : Örtü malzemesinin ısı iletim katsayısı ($W m^{-2}K^{-1}$),

A_C : Örtü yüzey alanı (m^2),

E : Seraya ulaşan güneş ışınımının buharlaşmada kullanılan oranı (-),

f : Bitki örtü faktörü (-).

Eşitlik 1'de ($\tau \cdot I_0$) güneşten kazanılan, ($U \cdot \frac{A_C}{A_G} \cdot \Delta T$) örtü malzemesinden sıcaklık farkına bağlı transimiyonla kaybedilen, ($V_A \cdot c_p \cdot \rho$) hava değişimi ile kaybedilen ve ($E \cdot f \cdot \tau \cdot I_0$) serada bitkilerin transpirasyonuna bağlı buharlaşmada kullanılan ısı enerjisidir. Eşitlik 1'den V_A çekildiğinde serada istenen sıcaklık farkına bağlı gereksinilen hava değişim sayısının hesaplanmasında kullanılan Eşitlik 2 elde edilir.

$$V_A = \frac{\tau \cdot I_0 \cdot (1 - E \cdot f)}{c_p \cdot \rho \cdot \Delta T} - \frac{U \cdot A_C}{c_p \cdot \rho \cdot A_G} \quad (2)$$

Eşitlik 2'deki E katsayısının belirlenmesi zordur [28]. Seraya ulaşan hava, bitkide terlemeye etki etmediği sürece, E katsayısı 0 ile 1 arasında değişir. Ancak, kurak iklim bölgelerinde seraya

ulaşan kuru hava çok düşük neme sahipse, buharlaşmaya ve seradaki ısı enerjisine katkı sağlayarak E katsayısının 1'den büyük olmasına neden olabilir. $E > 1$ ise, transpirasyon bitkiye ulaşan net radyasyondan daha fazla enerji gerektirir. Bu durumda hava sıcaklığı hava girişinden hava çıkışına doğru azalır [28-29]. Ilıman iklim koşullarında havalandırma hesaplamaları için dış nemin çok düşük olmadığı ve üretimin yapılmadığı boş seralarda $E=0$, bitkiyle yarı örtülmüş seralarda $E = 0,5$ ve bitkiyle tamamen kaplı seralarda için $E = 0,8-1,0$ alınır [4].

Eşitlik 2'deki bitki örtü faktörü (f) serada üretilen bitki çeşidine göre, toprakta doğrudan üretimin yapıldığı sera için 0,8, kesme çiçek için 0,8 ve masada saksı bitkileri üretimi yapılan seralar için 0,6-0,8 alınır [4].

Havalandırma açıklığı çevresinde rüzgâr hızının sabit olduğu varsayıldığında ortaya çıkan hava akış hızı Eşitlik 3 ile ifade edilir [13].

$$v = C_d \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta P} \quad (3)$$

Havalandırma açıklığından ortaya çıkan hava akış debisi Eşitlik 4 ile belirlenir.

$$V_v = \frac{A_v}{2} \cdot C_d \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta P} \quad (4)$$

Eşitlikte; A_v : Havalandırma açıklığının toplam alanıdır. Havalandırma alanının 2'ye bölünmesi, alanın yarısının hava girişi ve yarısının hava çıkışı için kullanılmasından kaynaklanmaktadır.

Havalandırma açıklıklarında rüzgârın yarattığı basınç farkı Eşitlik 5 ile hesaplanır.

$$\Delta P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_w \cdot v_w^2 \quad (5)$$

Baca etkisine bağlı ortaya çıkan basınç farkı (ΔP_T), iç ve dış ortam hava yoğunluğunun farkından kaynaklanan dikey basınç farkına bağlı olup, Eşitlik 6 ile ifade edilir.

$$\Delta P_T = \rho \cdot g \cdot H \cdot \frac{\Delta T}{T_o} \quad (6)$$

Seralarda hava değişimine neden olan basınç farkı, sıcaklık farkı ve rüzgâr etkisinden ortaya çıkan basınç farkı toplamına eşit olup Eşitlik 7 ile ifade edilmektedir.

$$\Delta P = \Delta P_w + \Delta P_T \quad (7)$$

Havalandırma açıklıklarında ortaya çıkan basınç farkı Eşitlik 4'te yerine konulduğunda, çatı havalandırma açıklıklarından sıcaklık farkı ve rüzgâr hızına bağlı olarak ortaya çıkan havalandırma debisi Eşitlik 8 ile hesaplanabilmektedir [23,24,30].

$$V_v = \frac{A_v}{2} \cdot C_d \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot (h/4) \Delta T}{T_o} + C_w \cdot v_w^2} \quad (8)$$

Eşitlikte;

V_v : Hava akış debisi ($m^3 s^{-1}$)

A_v : Havalandırma açıklık alanı (m^2),

g : Yerçekimi ivmesi ($m s^{-2}$),

h : Hava girişi ve çıkış merkezleri arasındaki dikey mesafe (m),

θ_m : Ortalama dış sıcaklık ($^{\circ}C$),

v_w : Rüzgâr hızı ($m s^{-1}$),

C_w : Rüzgâr basınç katsayısı (-)

C_d : Deşarj katsayısıdır (-).

Sıcaklık farkının hava değişimine etkisi, yan duvar ve çatı havalandırmasına sahip seralarda sıcaklık farkının büyük olduğu koşullarda önemlidir [30]. Sadece çatı havalandırmasına sahip blok seralarda sıcaklık farkının hava değişimine etkisi ihmal edilecek düzeyde küçüktür. Sıcaklık farkının hava değişimine etkisi ihmal edildiğinde çatı havalandırma açıklığından ortaya çıkan hava debisi Eşitlik 9'dan yararlanılarak hesaplanır.

$$V_v = \frac{A_v}{2} \cdot C_d \cdot v_w \cdot \sqrt{C_w} \quad (9)$$

Havalandırma açıklıklarına böcek tülünün gerilmesi durumunda tülün porozitesine bağlı olarak ortaya çıkan hava akış debisi Eşitlik 10 ile hesaplanır [11,31].

$$V_{VS}=V_V \cdot (\varepsilon \cdot (2-\varepsilon)) \quad (10)$$

Eşitlik 9 ve Eşitlik 10'da Eşitlik 11 elde edilir.

$$V_{VS}=\frac{A_V}{2} \cdot C_d \cdot v_w \cdot \sqrt{C_w} \cdot (\varepsilon \cdot (2-\varepsilon)) \quad (11)$$

Eşitlikte; ε porozite katsayısıdır.

Havalandırma açıklıklarında ortaya çıkan hava akış debisinin sera taban alanına bölünmesi ile birim alana tekabül eden hava değişim sayısı (V_A) elde edilir. Eşitlik 11'in her iki tarafı sera taban alanına bölündüğünde Eşitlik 13 elde edilir.

$$\frac{V_{VS}}{A_G}=\frac{A_V}{2 \cdot A_G} \cdot C_d \cdot v_w \cdot \sqrt{C_w} \cdot (\varepsilon \cdot (2-\varepsilon)) \quad (12)$$

$$\frac{V_{VS}}{A_G}=V_A \text{ Olduğundan}$$

$$V_A=\frac{A_V}{2 \cdot A_G} \cdot C_d \cdot v_w \cdot \sqrt{C_w} \cdot (\varepsilon \cdot (2-\varepsilon)) \quad (13)$$

Yapılan çalışmada havalandırma açıklıklarının büyüklüğüne ve rüzgârın etkisine bağlı olarak birim alana tekabül eden hava değişim sayısının hesaplanmasında gerekli olan deşarj katsayısı (C_d) Eşitlik 14 yardımı ile hesaplanmıştır [4].

$$C_d=\frac{1}{\sqrt{1,9+0,7 \cdot \exp\{-L_0/[32,5 \cdot H_0 \cdot \sin \alpha]\}}} \quad (14)$$

Eşitlikte; L_0 ve H_0 Havalandırma açıklığının uzunluğu ve genişliği, α ise kapakların açıklık açısıdır.

Rüzgâr etkisine bağlı birim alana tekabül eden hava değişim sayısının Eşitlik 13'e göre hesaplanmasında gerekli olan rüzgâr basınç katsayısı (C_w) rüzgârın farklı yönlerden estiği kabul edilerek 0,12 alınmıştır.

Yapılan çalışmada son yıllarda kurulan ileri teknoloji seralarının boyutları esas alınmıştır. Hesaplama kullanılan seranın teknik özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

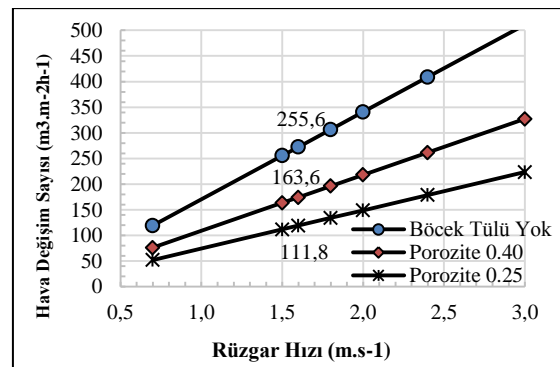
Çizelge 1. Seranın teknik özellikleri

Tünel sayısı (Adet)	10
Tünel uzunluğu (m)	100
Tünel genişliği (m)	9,6
Yan duvar yüksekliği (m)	5
Mahya yüksekliği (m)	7
Havalandırma uzunluğu (m)	100
Havalandırma genişliği (m)	2
Sera alanı (m ²)	9600
Örtü alanı (m ²)	12552
Sera hacmi (m ³)	57600
Örtü geçirgenliği (%)	60
Gölgeleme (%)	50
Çatı örtü malzemesi	Polietilen
Yan duvar örtü malzemesi	Polikarbon (8 mm)

Yapılan çalışmada, Eşitlik 13'e göre farklı havalandırma açıklıklarına bağlı hesaplanan hava değişim sayısı Eşitlik 2'de yerine konularak serada ulaşılabilir sıcaklık farkı belirlenmiştir.

3. BULGULAR

Sera havalandırma açıklıklarından ortaya çıkan hava değişimi, havalandırma kapaklarının konumuna, büyüklüğüne, böcek tülünün porozitesine ve rüzgâr hızına bağlı olarak değişir. Güneş ışınımı şiddetinin 800 W m², gölgeleme oranının %50 ve çatıda havalandırma açıklığının sera taban alanına oranının %40,4 olduğu serada, farklı porozitelere sahip böcek tülleri ve rüzgâr hızlarına bağlı olarak ulaşılan hava değişim sayıları Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Havalandırma açıklığı %40,4 olan serada farklı rüzgâr hızlarına ve böcek tülü porozite katsayılarına bağlı hava değişim sayıları

Havalandırma açıklığında böcek tülünün kullanılmadığı serada $1,5 \text{ m s}^{-1}$ rüzgar hızında $256 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2}\text{h}^{-1}$ hava değişim sayısına ulaşılırken, porozite katsayısı 0,4 olan böcek tülünün kullanıldığı serada $164 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2}\text{h}^{-1}$ ve porozite katsayısı 0,25 olan serada ise $112 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2}\text{h}^{-1}$ olmaktadır. Artan rüzgar hızı, hava değişim sayısının büyümesine neden olurken, havalandırma açıklıklarında kullanılan böcek tülleri hava değişim sayısının küçülmesine neden olur.

Seralarda iyi bir havalandırma için hava değişim katsayısının 30 h^{-1} 'ten, çok iyi bir havalandırma için 50 h^{-1} 'den büyük olmalıdır [9]. Çizelge 2'de farklı porozitelere sahip böcek tüllerinin kullanıldığı seralarda, farklı havalandırma açıklıkları ve rüzgâr hızlarına bağlı olarak ulaşılan hava değişim sayısı ve hava değişim katsayıları verilmiştir. Çizelgeden de görüleceği gibi havalandırma açıklığının sera taban alanına oranının %21,4 olduğu koşullarda, havalandırma açıklıklarında böcek tülünün kullanılmaması durumunda iyi bir havalandırma için rüzgâr hızı en az 2 m s^{-1} olmalıdır.

Rüzgâr hızının 2 m s^{-1} 'den düşük olduğu yerlerde iyi bir havalandırma için açıklıkların büyütülmesi

gereklidir. Çizelge 2'den görüleceği gibi havalandırma açıklığının %21,4'ten, %25,7'ye büyütülmesi durumunda böcek tülünün kullanılmadığı seralarda iyi bir havalandırma için $1,6 \text{ m.s}^{-1}$ rüzgar hızı yeterli olmaktadır.

Sera havalandırma açıklıklarında böcek tülünün kullanılması, havalandırma etkinliğini olumsuz etkilediğinden havalandırma açıklık alanı büyütülmelidir. Çizelge 2'de havalandırma açıklık alanının sera taban alanına oranının %25,7 olduğu koşullarda porozite katsayısı 0,4 olan böcek tülünün kullanılması durumunda 2 m s^{-1} rüzgâr hızında bile yeterli bir havalandırma sağlanamamaktadır.

Böcek tülünün kullanıldığı seralarda böcek tülü porozite katsayısına bağlı olarak havalandırma açıklık alanları büyütülmelidir. Çatıda havalandırma açıklık alanının sera taban alanına oranının %40,4'e yükseltildiği serada, porozite katsayısı 0,40 olan böcek tülünün kullanılması durumunda iyi bir havalandırma için bölgedeki rüzgâr hızının $1,6 \text{ m s}^{-1}$ 'den büyük olmalıdır. Beyaz sineğe karşı böcek tülünün kullanılması durumunda iyi bir havalandırma için rüzgâr hızı en az $2,4 \text{ m s}^{-1}$ olmalıdır.

Çizelge 2. Farklı havalandırma açıklıklarında ve farklı porozitelere sahip böcek tülünün kullanıldığı seralarda rüzgâr hızına bağlı olarak ulaşılan hava değişim katsayıları

A _v /A _G (%)	V _w (m s ⁻¹)	Böcek tülü yok		Porozite 0,40		Porozite 0,25	
		V _A (m ³ m ⁻² h ⁻¹)	N (h ⁻¹)	V _A (m ³ m ⁻² h ⁻¹)	N (h ⁻¹)	V _A (m ³ m ⁻² h ⁻¹)	N (h ⁻¹)
21,4	0,7	65,3	10,9	41,8	7,0	28,6	4,8
	1,5	139,9	23,3	89,5	14,9	61,2	10,2
	1,6	149,2	24,9	95,5	15,9	65,3	10,9
	2,0	186,6	31,1	119,4	19,9	81,6	13,6
25,7	0,7	77,5	12,9	49,6	8,3	33,9	5,7
	1,5	166,1	27,7	106,3	17,7	72,7	12,1
	1,6	177,2	29,5	113,4	18,9	77,5	12,9
	2,0	221,5	36,9	141,8	23,6	96,9	16,2
40,4	0,7	119,3	19,9	76,3	12,7	52,2	8,7
	1,5	255,6	42,6	163,6	27,3	111,8	18,6
	1,6	272,6	45,4	174,5	29,1	119,3	19,9
	1,8	306,7	51,1	196,3	32,7	134,2	22,4
	2,0	340,8	56,8	218,1	36,3	149,1	24,8
	2,4	408,9	68,2	261,7	43,6	178,9	29,8

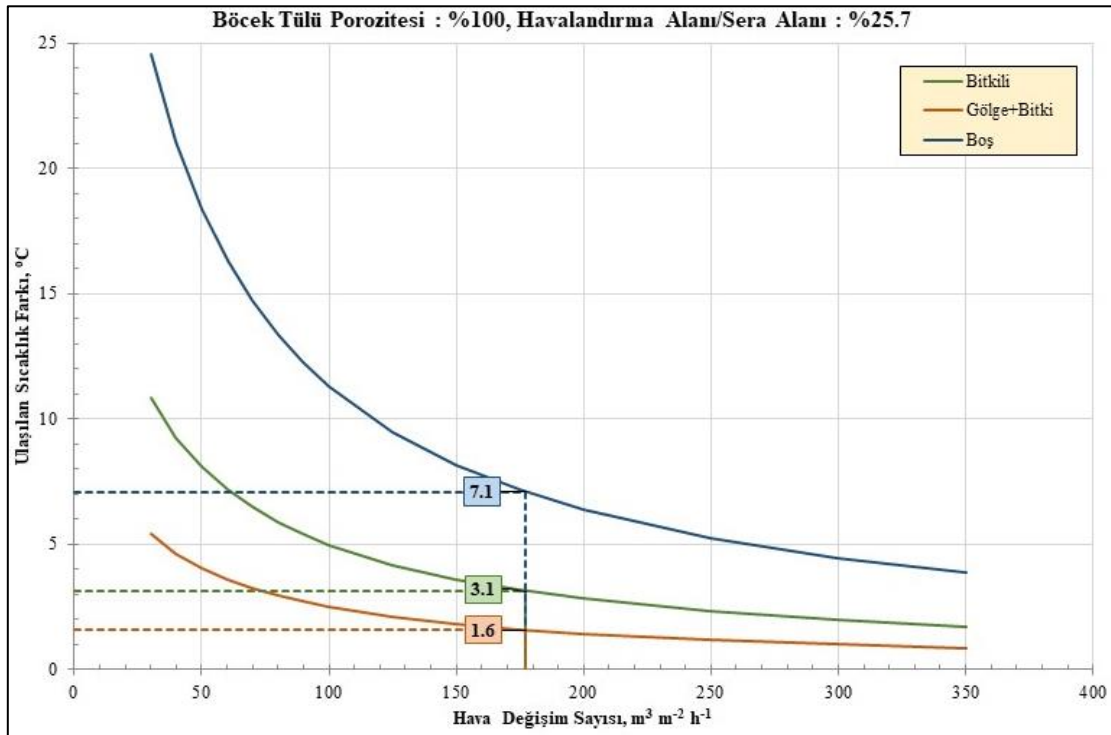
Akdeniz iklim koşullarında Mayıs ayında ortaya çıkan maksimum güneş ışınımı şiddeti yaklaşık

800 W m^{-2} civarındadır. Yapılan çalışmada Çizelge 1'de verilen seranın teknik özellikleri esas

alınarak serada ulaşılan sıcaklık farkları hesaplanmıştır. Şekil 2’de güneş ışınımının 800 W m^{-2} , rüzgâr hızının $1,6 \text{ m s}^{-1}$, havalandırma açıklık alanının sera taban alanına oranının %25,7, böcek tülünün kullanılmadığı koşullarda, boş ve üretiminin yapıldığı gölgelenmemiş ve %50 oranında gölgelendirilmiş serada birim alana tekabül eden hava değişim sayılarına bağlı ulaşılan sıcaklık farkları verilmiştir.

Şekil 2’den görüleceği gibi havalandırma açıklıklarına böcek tülü gerilmemiş serada rüzgâr hızı $1,6 \text{ m s}^{-1}$ olduğunda ulaşılan hava değişim sayısı $177,2 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (hava değişim katsayısı

$29,5 \text{ h}^{-1}$) olmaktadır. Hava değişim katsayısı iyi bir havalandırma için sınırda bulunmaktadır. Çatıdaki havalandırma açıklığının sera taban alanına oranının %25,7, havalandırma açıklıklarında böcek tülünün kullanılmadığı ve bitkisel üretimin yapılmadığı serada ulaşılan sıcaklık farkı $7,1 \text{ }^\circ\text{C}$ olmaktadır. Aynı koşullarda bitkisel üretimin yapıldığı serada duyulur ısının bir kısmı transpirasyonda kullanıldığından ulaşılan sıcaklık farkı $3,1 \text{ }^\circ\text{C}$ olmaktadır. Yapılan çalışmada güneş ışınımının gölgeleme ile %50 oranında azaltıldığı ve bitkisel üretimin yapıldığı koşullarda ulaşılan sıcak farkı ise $1,6 \text{ }^\circ\text{C}$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2. Güneş ışınımının 800 W m^{-2} , örtü geçirgenliğinin %60 olan, boş ve bitkisel üretimin yapıldığı PE plastik serada hava değişim sayısına bağlı ulaşılan sıcaklık farkı

Hava değişim sayısı ile serada ulaşılan sıcaklık farkı arasında doğrusal olmayan azalan bir ilişki bulunmaktadır (Şekil 2). Bu durum önemli miktarda ısı enerjisinin kapakların ilk açıldığı anlarda serayı terk ettiği anlamına gelmektedir. Schmidt [32] yaptığı çalışmada havalandırma kapaklarının çok az açıldığı koşullarda gizli ısı

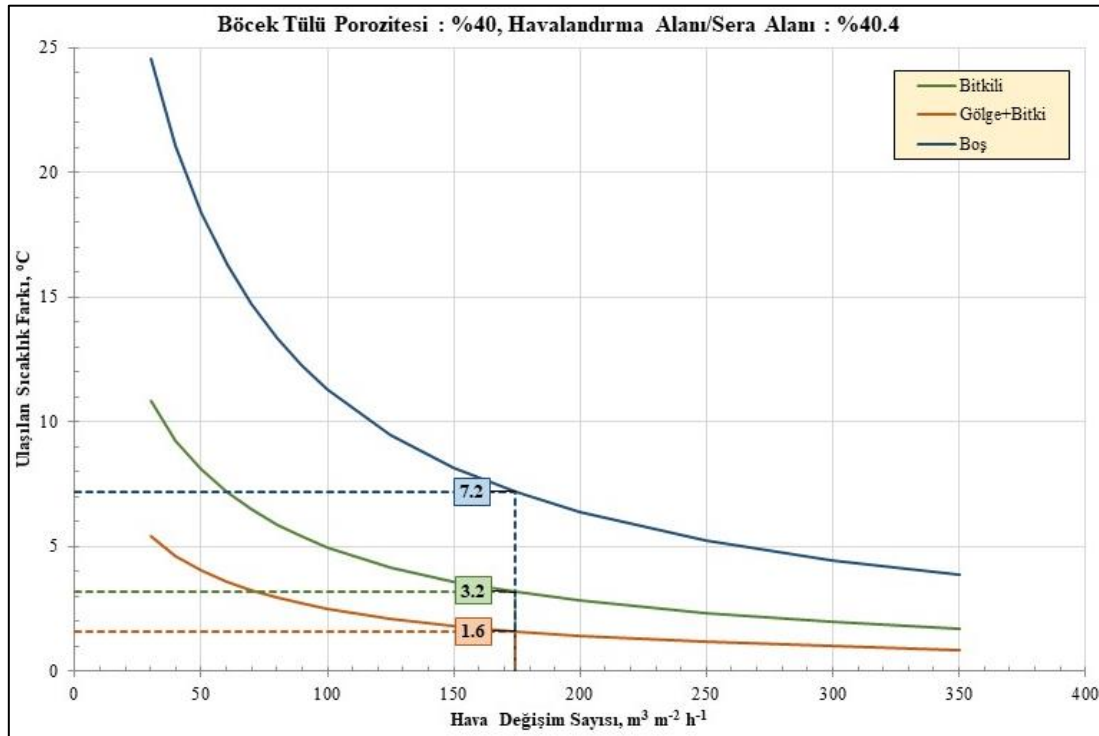
kaybının duyulur ısı kaybına göre çok daha fazla olduğunu belirlemiştir. Havalandırma kapaklarının daha fazla açılması durumunda toplam ısı kaybı içinde gizli ısının oranı azalır. Bu durum sera örtü yüzeyinde bulunan istenmeyen açıklıklardan öncelikli olarak nemli havayla birlikte gizli ısının kaybolduğu anlamına gelmektedir [32].

Seralarda havalandırma açıklıklarına gerilen böcek tülleri serada ortaya çıkan hava değişimini kısmen de olsa engellemektedir. Böcek tülleri hava girişlerinde direncin yükselmesine, dolayısı ile havalandırma etkinliğinin azalmasına neden olurlar [33-35]. Belirtilen nedenle havalandırma açıklıklarına böcek tülü gerilmiş seralarda havalandırma açıklıklarının belirli oranlarda büyütülmesi zorunludur. Teitel [36], Bailey ve arkadaşları, [37] böcek tülü kullanılan seralarda havalandırma açıklıklarının kullanılan tüllerin porozite katsayılarına göre iki katına kadar artırılmasını önermektedirler.

Güneş ışınımının 800 W m^{-2} , rüzgâr hızının $1,6 \text{ m s}^{-1}$, A_V/A_G oranı %40,4 olan ve havalandırma açıklığına porozite katsayısı 0,4'lık böcek tülü gerilmiş serada ulaşılan sıcaklık farkı Şekil 3'te verilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi böcek tülünün kullanılması durumunda havalandırma açıklık alanının %25,7'den %40,4'e yükseltilmesi durumunda ulaşılan sıcaklık farkları

hemen hemen eşit olmaktadır. Diğer bir ifade ile havalandırma açıklık alanı yaklaşık %57 oranında büyütülen serada hava değişim sayısı gerilen böcek tülünden dolayı sadece %1,5 oranında azalmaktadır. Bu koşullarda bitkisel üretimin yapıldığı %50 oranında gölgelendirilmiş serada ulaşılan sıcaklık farkı ise $1,6 \text{ }^\circ\text{C}$ olmaktadır.

Havalandırma açıklıklarına gerilen böcek tüllerinin porozite katsayısı küçüldükçe havalandırma açıklıklarında ortaya çıkan basınç kaybı artmakta, buna bağlı olarak ulaşılan sıcaklık farkı büyümektedir. Dış ışınımın 800 W m^{-2} ve rüzgâr hızının $1,6-2,0 \text{ m s}^{-1}$ olduğu koşullarda, havalandırma açıklıklarında farklı porozite katsayılarına sahip böcek tülünün kullanılması durumunda gölgelendirilmiş ve gölgelendirilmemiş seralarda ulaşılan hava değişim sayısı (V_A), hava değişim katsayısı (N) ve sıcaklık farkı (ΔT) Çizelge 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Güneş ışınımının 800 W.m^{-2} , örtü geçirgenliği %60, A_V/A_G oranı %40,4 ve böcek tülü porozite katsayısı 0,40 olan PE plastik serada hava değişim sayısına bağlı ulaşılan sıcaklık farkı

Çizelge 3'ten görüleceği gibi çatıda havalandırma açıklık alanının sera taban alanına oranı %25,7 olduğu koşullarda $1,6 \text{ m s}^{-1}$ rüzgar hızında yeterli bir havalandırma sağlanarak gölgelendirilen serada sıcaklık farkı $1,6 \text{ }^\circ\text{C}$ olmaktadır. Aynı özelliklere sahip serada havalandırma açıklığına porozite katsayısı 0,4 olan böcek tülünün gerilmesi durumunda hesaplanan hava değişim katsayısı

$18,9 \text{ h}^{-1}$ 'a düşerken gölgelendirilen serada ulaşılan sıcaklık farkı $2,3 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye yükselmektedir. Rüzgâr hızının $1,6 \text{ m s}^{-1}$ olduğu koşullarda havalandırma açıklığına 0,4 porozite katsayısına sahip böcek tülünün gerildiği serada havalandırma açıklığının %40,4'e yükseltilmesi durumunda serada iyi bir havalandırma sağlanırken, ulaşılan sıcaklık farkı $1,6 \text{ }^\circ\text{C}$ olmaktadır.

Çizelge 3. Farklı havalandırma açıklıklarına sahip seralarda farklı porozite katsayılarına sahip böcek tülünün kullanılması durumunda rüzgar hızına bağlı hesaplanan hava değişim katsayıları ve ulaşılan sıcaklık farkları

A_V/A_G (%)	V_w (m.s^{-1})	Böcek tülü porozite	V_A ($\text{m}^3.\text{m}^{-2}.\text{h}^{-1}$)	N (h^{-1})	ΔT Gölge ($^\circ\text{C}$)	ΔT Gölgesiz ($^\circ\text{C}$)
25,7	1,6	Yok	177,2	29,5	1,6	3,1
		0,40	113,4	18,9	2,3	4,6
		0,25	77,5	12,9	3,0	6,0
	2,0	Yok	221,5	36,9	1,3	2,6
		0,40	141,8	23,6	1,9	3,8
		0,25	96,9	16,2	2,5	5,1
40,4	1,6	Yok	272,6	45,4	1,1	2,1
		0,40	174,5	29,1	1,6	3,2
		0,25	119,3	19,9	2,2	4,3
	2,0	Yok	340,8	56,8	0,9	1,7
		0,40	218,1	36,3	1,3	2,6
		0,25	149,1	24,8	1,8	3,6

4. SONUÇ VE TARTIŞMA

Sıcak dönemlerde seralarda bitkiler için konfor ortamının sağlanması doğru bir iklimlendirme ile mümkündür. Günlük ortalama sıcaklığın $12-22 \text{ }^\circ\text{C}$ arasında bulunması durumunda seralarda havalandırma ile bitkiler için gerekli olan konfor ortamının sağlanması mümkündür. Seralarda havalandırma açıklıkları çatı ve/veya yan duvarlarda bulunmaktadır. Teksel olarak inşa edilen seralarda çatı ve yan duvarlarda havalandırma açıklıklarının bulunması etkili bir havalandırma için en uygun olanıdır. Ancak seraların teksel olarak kurulması alan ve iş gücü kaybı yanında örtü yüzeyinin artması nedeniyle soğuk dönemlerde enerji kayıplarına neden olmaktadır. Belirtilen nedenle son yıllarda kurulan seraların tamamı blok olarak inşa edilmektedir. Küçük işletmeler halinde kurulan blok seralarda hava giriş ve çıkışı arasındaki açıklık 30 m 'den küçük olduğunda, çatı havalandırmasına gerek

duyulmadan stor tipi yan duvar havalandırması ile etkili bir hava değişimi elde etmek mümkündür. Ancak seraların büyük bloklar halinde inşa edilmesi durumunda yan duvar havalandırmasından vazgeçilerek sadece çatı havalandırması yapılmalıdır [4,5].

Havalandırma açıklıklarının büyüklüğü serada ortaya çıkan sıcaklık farkına etki eder. Serada ulaşılan sıcaklık farkı artan havalandırma açıklık alanlarına göre azalmaktadır. Bunun da anlamı seradaki ısının büyük kısmı havalandırma açıklıklarının ilk %10'luk açıklığında sera ortamını terk etmektedir.

Seralara ulaşan güneş ışınımının yaklaşık %35'i transpirasyon, fotosentez ve transmisyonla kullanılmakta, geri kalan kısmı duyulur ısıya dönüşerek ortam sıcaklığının yükselmesine neden olmaktadır. Belirtilen nedenle bitkisel üretimin yapıldığı seralarda ortaya çıkan sıcaklık farkı,

üretim yapılmadığı boş seralara göre daha küçüktür. Aynı şekilde seraya ulaşan güneş ışınımı şiddeti serada ortaya çıkan sıcaklığa etki etmektedir. Güneş ışınımının gölgeleme ile kısmen engellenmesi serada sıcaklık farkının azalmasına neden olur. Belirtilen nedenle sıcak dönemlerde havalandırılan seralarda yapılacak ek gölgeleme, bitki konfor ortamının sağlanmasına yardımcı olacaktır.

Seralarda havalandırma sistemlerinin etkinliği basınç farkına bağlı ortaya çıkan hava değişim katsayısına göre değerlendirilmektedir. Seralarda iyi bir havalandırma için hava değişim katsayısı 30 h^{-1} 'den büyük olmalıdır. Akdeniz bölgesinde mayıs ayında ortaya çıkan güneş ışınımı şiddetinin 800 W m^{-2} , gölgeleme oranının %50 ve ortalama rüzgâr hızının $1,6 \text{ m s}^{-1}$ olduğu koşullarda, sera çatısında %25 oranındaki havalandırma açıklığıyla ulaşılan hava değişim katsayısı 30 h^{-1} olurken, ulaşılan sıcaklık farkı $1,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ olmaktadır. Bu da yeterli bir havalandırmanın olduğunu göstermektedir.

Havalandırma açıklıklarına gerilen böcek tülleri porozite katsayılarına bağlı olarak hava değişimini kısmen engellenmektedir. Belirtilen nedenle böcek tüllerinin kullanıldığı seralarda havalandırma açıklıkları mutlaka büyütülmelidir. Havalandırma açıklıklarına böcek tülünün gerildiği seralarda havalandırma açıklığının %25'ten %40'a çıkarılması durumunda ulaşılan hava değişim sayısı 29 h^{-1} olurken sıcaklık farkı $1,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ olmaktadır.

5. KAYNAKLAR

1. Kittas, C., Katsoulas, N., Bartzanas, T., Bakker, S., 2013. Greenhouse Climate Control and Energy Use. Good Agricultural Practices for Greenhouse Vegetable Crops Principles for Mediterranean Climate Areas. FAO Plant Production and Protection Paper, 21. 63–96
2. Nisen, A., Grafiadellis, M., Jiménez, R., La Malfa, G., Martiez-Garcia, P.F., Monteiro, A., Verlodt, H., Villele, O., Zabeltitz, C.V., Denis, J.C., Boudoin, W., Garnaud, J.C., 1988. Cultures Protégées en Climat Méditerranéen, FAO, Rome.
3. Baytorun, A.N., Abak, K., Tokgöz, H., Güler, Y., Üstün, S., 1995. Seraların Kışın İklimlendirilmesi ve Denetimi Üzerinde Araştırmalar. Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu, Proje no TOAG-993.
4. Von Zabeltitz, C., 2011. Integrated Greenhouse Systems for Mild Climates. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
5. Baytorun, A.N., 2016. Seralar. Nobel Yayınevi.
6. Goldammer, T., 2019. Greenhouse Management. A Guide to Operations and Technology. Apex Publishers, ISBN-10: 0-9675212-9-7
7. Baytorun, A.N., Üstün, S., Akyüz, A., Önder, D., 2017. Akdeniz İklim Koşullarında Seralarda Havalandırma Açıklık Oranlarının Belirlenmesi. Türk Tarım–Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi, 5(4), 409-415.
8. Baytorun, A.N., Von Zabeltitz, C., 1987. Die Wirkung Bautechnischer Einflussgrößen Auf den Luftwechsel Gelüfteter Gewächshäusern. Horticultural Science, ISSN 0016-478 Band 52 Heft 5.
9. Von Zabeltitz, Chr. 1986. Gewächshäuser. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
10. Baytorun, A.N., 1986. Bestimmung des Luftwechsels bei Gelüfteten Gewächshäusern. Diss, Universität Hannover.
11. Muñoz, P., 1998. Ventilación Natural de Invernaderos Multitúnel. Ph. D. Universitat de Lleida, 145.
12. Bot, G.P.A., 1983. Greenhouse Climate: from Physical Processes to a Dynamic Model. Ph.D. Thesis, Agricultural University, Wageningen, 1983, 239.
13. Boulard, T., Baille, A., 1995. Modeling of the Air Exchange Rate in a Greenhouse Equipped with Continuous Roof Vents. J Agric Eng Res., 61, 37-48.
14. Baptista, F.J., Bailey, B.J., Randall, J.M., Meneses, J.F., 1999. Greenhouse Ventilation Rate: Theory and Measurement with Tracer Gas Techniques. J. Agric. Eng Res., (1999) 72, 363-374.
15. Perez-Parra, J., Baeza, E., Montero J. I., Bailey, B.J., 2004. Natural Ventilation of Greenhouses. Biosystems Eng., 87(3), 355–360.
16. Katsoulas, N., Bartzanas, T., Boulard, T., Mermier, M., Kittas, C. 2006. Effect of Vent

- Openings and Insect Screens on Greenhouse Ventilation. *Biosyst. Eng.*, 93(4), 427–436.
17. Wang, S., Deltour, J.M., 1996. Experimental Ventilation Function for Large Greenhouses Based on a Dynamic Energy Balance Model. *International Agricultural Engineering Journal*, 5(3), 103–112.
 18. Demrati, H., Boulard, T., Bekkaoui, A., Birden, L. 2001. Natural Ventilation and Microclimate Performance of a Large-scale Banana Greenhouse. *J Agric Eng Res.*, 80(3), 261–271.
 19. Kittas, C., Boulard, T., Mermier, M., Papadakis, G., 1996. Wind-induced Air Exchange Rates in a Greenhouse Tunnel with Continuous Side Openings. *J Agric Eng Res.*, 65, 37-49.
 20. Meneses, J.F., Raposo, J.R., 1987. Natural Ventilation of Animal Housings: Theory and Methods of Calculation. *Anais do Instituto Superior de Agronomia*, 249-265.
 21. Bailey, B.J., 2000. Wind-driven Ventilation in a Large Greenhouse. *Acta Horti* 534, 309-317.
 22. Papadakis, G., Mermier, M., Meneses, J., Boulard, T., 1996. Measurement and Analysis of Air Exchange Rates in a Greenhouse with Continuous of an Side Openings. *J Agric Eng Res.*, 63, 219-228.
 23. Perez-Parra, J., Montero, J.I., Baeza, E.J., Lopez Hernandez, J.C., 2006. Determination of Global Wind Coefficients for the Development of Ventilation Rate Calculation Models for a Parral Multi-span Greenhouse. *Acta Horti*, 710, 143–150.
 24. Boulard, T., 2006. Greenhouse Natural Ventilation Modeling: a Survey of the Different Approaches. *Acta Horti*, 719, 29–40
 25. De Jong, T., 1990. Natural Ventilation of Large Multispan Greenhouses. PhD Thesis Landbouw. Universiteit Wageningen, Nederlands.
 26. Bailey, B., 1998. Principals of Environmental Control, Chapter 3. In: von Zabeltitz (ed) *Energy Conservation and Renewable Energies for Greenhouse Heating*. 2. FAO Regional Office for Europe.
 27. Willits, D.H., 2006. Fan Ventilated Greenhouse Cooling: Some Considerations for Design. *Acta Horti*, 719, 83–95.
 28. ANSI/ASAE EP 406.4 (2003) Standard: Heating, Ventilation and Cooling Greenhouses. American Society of Agricultural Engineers, MI, USA.
 29. Willits, D.H., 2003. Cooling fan Ventilated Greenhouses. A Modeling Study. *Biosystems Eng.*, 84(3), 315–329.
 30. Bailey, B.J., 2000. Constraints, Limitations, and Achievements in Greenhouse Natural Ventilation. *Acta Horti*, 534, 21–30.
 31. Pérez-Parra, J., 2002. Ventilación Natural en Invernaderos parral. PhD Universidad de Córdoba.
 32. Schmidt, U., 2008. Das Besondere Problem der Feuchte. Bericht zur Bestimmung und Bewertung des Energiebedarfs von Gewächshäuser. KTBL-Workshop. 17. September 2008 in Worms, 53–60.
 33. Bethke, J.A., 1994. Considering Installing Screening? This is What You Need to Know. *Greenhouse Manager*, 13(1), 34–37.
 34. Antignus, Y., Mor, N., Ben Joseph, R., Lapidat, M., Cohen, S.H., 1996. UV-absorbing Plastic Sheets Protect Crops from Insect Pests and from Virus Diseases Vectedored by Insects. *Environ Entomol*, 25(5), 919–924.
 35. Harmanto, M., Tantau, H.J., Salokhe, V.M., 2006. Microclimate and Air Exchange Rates in Greenhouses Covered with Different Nets in the Humid Tropics. *Biosystems Eng.*, 94(2), 239-253.
 36. Teitel, M., 2006. The Effect of Screens on the Micro Climate of Greenhouses and Screen Houses-a Review. *Acta Horti*, 719, 575–586.
 37. Bailey, B.J., Montero, J.J., Peres Parra, J., Robertson, A.P., Baeza, E., Kamaruddin, R., 2003. Air Flow Resistance of Greenhouse Ventilators with and Without Screen. *Biosystems Eng.*, 86(2), 217–229.

Poliüretan ile Güçlendirilmiş Balastın Hareket Eden Tekerlek Yükü Altındaki Deformasyon Davranışının Nümerik Olarak İncelenmesi

Halil İbrahim FEDAKAR*¹ ORCID 0000-0002-7561-5363

¹Abdullah Gül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü,
Kayseri

Geliş tarihi: 23.01.2022

Kabul tarihi: 21.03.2022

Atıf şekli/ How to cite: FEDAKAR, H.İ., (2022). Poliüretan ile Güçlendirilmiş Balastın Hareket Eden Tekerlek Yükü Altındaki Deformasyon Davranışının Nümerik Olarak İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37(1), 79-91.

Öz

Hareket eden tekerlek yükünden dolayı balastlı demiryolu hatlarında meydana gelen düşey deformasyonlar özellikle yüksek tren hızlarında ve zayıf taban zemini koşullarında hat düzensizliklerine sebep olmaktadır. Bu durum ise hat güvenliğini ve inşaat sonrası maliyeti olumsuz etkilemektedir. Bu çalışmada farklı miktarlarda poliüretan ile güçlendirilmiş balast tabakasının (70 kg/m³, 140 kg/m³ ve 210 kg/m³), zayıf taban zemini koşulunda ve farklı tren hızlarındaki (100 km/h, 200 km/h ve 300 km/h) düşey deformasyon davranışları sayısal olarak incelenmiştir. Bu kapsamda geliştirilen iki boyutlu nümerik modellerde statik ve hareket eden tekerlek yükleri uygulanmıştır. Analiz sonuçlarına göre poliüretan kullanımı, zayıf zemine oturan balastlı demiryolu hattında meydana gelen düşey deformasyonu önemli oranda iyileştirmektedir (>%87). Öte yandan düşük hızlarda düşük poliüretan miktarları kullanılabilirken, balast agregaları arasında oluşan daha güçlü poliüretan yapıdan dolayı artan tren hızlarında yüksek poliüretan miktarları tercih edilmelidir. Ayrıca poliüretan ile güçlendirilmiş veya güçlendirilmemiş bir demiryolu hattının analizinde statik tekerlek yükünün yerine hareket eden tekerlek yükü kullanılmalıdır.

Anahtar Kelimeler: Poliüretan, Balast, Hareket eden tekerlek yükü, PLAXIS, Balastlı demiryolu hattı

Numerical Investigation of Deformation Behavior of Ballast Reinforced with Polyurethane Under a Moving Wheel Load

Abstract

The vertical deformation in ballasted railway tracks due to moving wheel loads causes track irregularities, particularly at high train speeds and under poor subgrade conditions. This adversely affects track safety and post-construction cost. In this study, the vertical deformation behavior of ballast reinforced with polyurethane in different amounts (70 kg/m³, 140 kg/m³ ve 210 kg/m³) under poor subgrade condition and at different train speeds (100 km/h, 200 km/h, and 300 km/h) was numerically investigated. In this context, static and moving wheel loads were applied in the developed two-

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Halil İbrahim FEDAKAR, halilibrahim.fedakar@agu.edu.tr

dimensional numerical models. According to the results, the use of polyurethane significantly improves the vertical deformation in the ballasted railway track resting on poor subgrade soil (>87%). On the other hand, while low amounts of polyurethane can be used in tracks with low train speeds, high amounts of polyurethane should be preferred in tracks with high train speeds due to stronger polyurethane bonding between ballast particles. Moreover, instead of static wheel load, a moving wheel load should be taken into consideration in the analysis of a railway track with and without polyurethane.

Keywords: Polyurethane, Ballast, Moving wheel load, PLAXIS, Ballasted railway track

1. GİRİŞ

Demiryolu hatları balastlı ve balastsız üstyapı olarak inşa edilmektedir. Hareket eden teker yükünden dolayı demiryolu hattında meydana gelecek kalıcı düşey deformasyonları ve hattın inşaat sonrası bakım maliyetini azaltmak için balastsız üstyapı sistemi kullanılsa da dünyadaki demiryolu hatlarının büyük bir kısmı düşük inşaat maliyeti ve bakım kolaylığı gibi nedenlerden dolayı balastlı üstyapı olarak inşa edilmiştir. Özellikle şehirlerarası yüksek hızlı tren ve konvansiyonel hatların büyük bir bölümü balastlı üstyapı olarak inşa edilmektedir. Ayrıca balastsız üstyapı ile kıyaslandığında, balastlı üstyapı daha elastik bir davranış sergilemektedir. Ancak bu elastik yapısından dolayı balastlı üstyapı sistemini kullanan demiryolu hatlarında taban zeminleri hareket eden teker yükünden dolayı daha fazla basınca (gerilmeye) maruz kalmaktadır. Bu durum ise artan tren hızlarında ve zayıf taban zemin koşullarında demiryolu hattında daha fazla düşey kalıcı deformasyonlara ve hatta düzensizliklerin oluşmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle hattın güvenliğini sağlamak ve inşaat sonrası bakım maliyetlerini azaltmak için balastlı üstyapının ve taban zeminin güçlendirilmesi büyük önem arz etmektedir.

Hareket eden teker yükünden dolayı balast malzemesinde meydana gelen kırılma ve aşınma olayları balast tabakasında meydana gelen kalıcı düşey deformasyonların en önemli nedenlerindedir. Ayrıca balast malzemesinde meydana gelen aşınmadan dolayı balast tabakasının dayanımı azalmakta ve balast tabakasının elastik davranışı da olumsuz etkilenmektedir. Bu durum ise hatta meydana gelen düşey kalıcı deformasyonları artırmaktadır. Balast malzemesinde meydana gelen aşınmayı

azaltmak ve balast tabakasının taşıma gücünü artırmak için farklı güçlendirme malzemeleri kullanılmaktadır (geogrid, kauçuk yastık ve poliüretan) [1-23]. Balastın geogrid ile güçlendirilmesi üzerine yapılan çalışmalarda, geogrid kullanımının balastın degradasyonunu (aşınma ve kırılma) ve hattın oturma davranışını iyileştirdiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca zayıf taban zemin durumlarında balastın geogrid ile güçlendirilmesi tren hattında daha üniform bir gerilme dağılımının elde edilmesini de sağlamaktadır [24]. Geogrid malzemesinin yanı sıra kauçuk yastıklar da demiryolu hatlarında meydana gelecek düşey deformasyonları azaltmak ve tren geçişinden kaynaklanan titreşimleri sönmölemek için travers altında ve balast tabakasının altında kullanılmaktadır [18,25-26]. Geogrid ve kauçuk yastıklar demiryolu hattında ayrı ayrı kullanılacağı gibi balastın darbe yükü altındaki degradasyon davranışını iyileştirmek için birlikte de kullanılabilir [17]. Ancak kauçuk yastık/balast ve geogrid/balast noktalarından uzaklaştıkça bu malzemelerin balastın güçlenmesine (degradasyon) etkisi de azalmaktadır. Bu malzemelerin yerine balast tabakasını bir bütün halinde tutmak ve stabiliteyi artırmak için poliüretan kullanılmaktadır.

Poliüretan ile güçlendirmenin balastın degradasyon ve deformasyon davranışına etkisi büyük ölçekli laboratuvar deneyleri (üç eksenli, kesme kutusu, kutu model, vb.) ve saha ölçümleri ile araştırılmıştır [1,3-4,6,14,22-23]. Yapılan bu araştırmalarda, poliüretan kullanımının balastın aşınma, kırılma ve deformasyon performanslarını önemli oranda iyileştirdiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca poliüretan ile güçlendirilmiş balast agregasında uygulanan yükten dolayı kırılma meydana gelse bile elde edilen üç boyutlu yapının taşıma kapasitesinde kayda değer bir azalma meydana gelmemektedir.

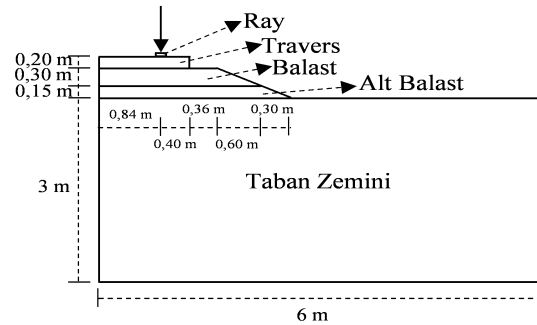
Aksine kırılan balast agregaları üç boyutlu yapının içerisinde birbirlerine poliüretan ile yapışmış olarak yük almaya devam etmektedir. Böylelikle balast tabakasının her bölgesinde balastın degradasyon ve deformasyon davranışı iyileşmektedir. Bu nedenle hattın stabilitesini artırmak, balastın degradasyon davranışını iyileştirmek ve bakım sonrası maliyeti azaltmak için mevcut ve yeni yapılan demiryolu hatlarında poliüretan ile balast iyileştirme çalışmaları yapılmaktadır. Poliüretan ile güçlendirilmiş balastın yük altındaki davranışının nümerik olarak incelenmesi, laboratuvar ve saha deneylerine kıyasla daha ekonomik ve uygun bir yöntemdir. Bundan dolayı literatürde poliüretan ile güçlendirilmiş balastın dinamik yük altındaki davranışı nümerik olarak da çalışılmıştır [23,27]. Fakat bu çalışmalarda, farklı miktarlarda poliüretan ile iyileştirilmiş balastlı demiryolu hattının hareket eden tekerlek yükü altındaki deformasyon davranışı araştırılmamıştır. Bu çalışma ile literatürdeki bu eksikliğin giderilmesine katkıda bulunulması amaçlanmaktadır.

Bu çalışmada zayıf taban zemini üzerine inşa edilmiş bir balastlı tren hattında hareket eden tekerlek yükünden dolayı meydana gelecek oturmanın farklı miktarlarda (70, 140 ve 210 kg/m^3) poliüretan kullanılarak iyileştirilmesi iki boyutlu nümerik modeller ile araştırılmıştır. Ayrıca geliştirilen nümerik modellerde uygulanan hareket eden teker yükü ile poliüretan ile güçlendirilmiş balastın farklı tren hızlarındaki (100, 200 ve 300 km/h) oturma performansları da incelenmiştir. Daha sonra hareketli yükün etkisini incelemek için, hareket eden teker yüküne ve statik teker yüküne maruz kalan poliüretan ile güçlendirilmiş balastın oturma davranışları da karşılaştırılmıştır.

2. NÜMERİK ANALİZ

Sonlu elemanlar yönteminin demiryolu hatlarının yük altındaki davranışını analiz etmedeki etkinliği literatürde kanıtlanmıştır [24]. Demiryolu hatlarının davranışı geoteknik mühendisleri tarafından yaygın olarak kullanılan PLAXIS sonlu elemanlar programı ile iki ve üç boyutlu olarak araştırılmıştır [24, 28-31]. İki boyutlu analizler ile kıyaslandığında, üç boyutlu analizler daha fazla hesaplama süresine ihtiyaç duymaktadır. Diğer bir

ifade ile bir geoteknik problemin iki boyutlu olarak modellenmesi ile problem daha basit hale gelmekte ve daha hızlı bir şekilde analiz sonuçları elde edilmektedir [32]. Bundan dolayı bu çalışmada, balastlı üstü yapı olarak inşa edilmiş bir demiryolu hattı iki boyutlu olarak ele alınmış ve bu problemin nümerik modelinin oluşturulmasında ve nümerik analizlerin gerçekleştirilmesinde PLAXIS 2D (Versiyon 21) sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında geliştirilen nümerik modelin geometrisi Şekil 1'de gösterilmiştir. Bu nümerik modelin geometrisi oluşturulurken (balast kalınlığı, alt balast kalınlığı, taban zemini (3m x 6m), şev eğimi (1/2), ray açıklığı ve ray (0,16m x 0,05m (Genişlik x Yükseklik))) Jiang ve Nimbalkar [24] tarafından gerçekleştirilen çalışmadaki ölçüler referans alınmıştır. Ayrıca taban zemininin geometrik ölçülerinin sınır koşullar açısından yeterli olduğu yapılan analizlerde görülmüştür. Öte yandan dikdörtgen rayın ölçüleri Jiang ve Nimbalkar [24] tarafından Avusturya'da kullanılan 60 kg/m rayın eşdeğeri olarak belirlenmiştir. Demiryolu hattının nümerik modeli düzlem birim deformasyon koşullarına göre ve yer altı suyu olmayacak şekilde oluşturulmuştur. Ayrıca orta sıklıktaki sonlu elemanlar ağı modelde kullanılmıştır.



Şekil 1. Geliştirilen nümerik modelin geometrisi ve boyutları

Önceki çalışmalara uygun olarak, ray ve traversin modellenmesinde lineer elastik (LE) model kullanırken taban zemini ve alt balastın davranışının modellenmesinde Mohr-Coulomb (MC) model kullanılmıştır [24, 28]. Ray, travers, alt balast ve taban zeminin malzeme özellikleri ise Jiang ve Nimbalkar [24] tarafından gerçekleştirilen

çalışmadan alınmıştır. Öte yandan 0, 70, 140 ve 240 kg/m³ poliüretan içeren balastın (sırasıyla PU0, PU70, PU140 ve PU210) malzeme özellikleri ise Lee ve arkadaşları [14] tarafından gerçekleştirilen çalışmadan alınmıştır. Balast tabakasının deformasyon davranışı açısından en kötü durumu ele almak ve analizlerde güvenli tarafta kalmak için balastın dilatasyon açısı bu çalışmada sıfır olarak alınmıştır ($\psi=0^\circ$) (Çizelge 1). Poliüretan ile güçlendirilmiş balast, balast agregaları arasında oluşan poliüretan bağlarından dolayı yük altında daha çok elastik davranmaktadır. Diğer yandan balastın davranışının modellenmesinde literatürde pekleşen zemin (hardening soil) ve Mohr-Coulomb modelleri kullanılmaktadır. Ancak Lee ve arkadaşları [14] tarafından gerçekleştirilen

çalışmadan balastın (PU0) sadece Mohr-Coulomb model parametreleri elde edilmektedir. Bu nedenle bu çalışmada, balastın modellenmesinde Mohr-Coulomb modeli kullanılırken, poliüretan ile güçlendirilmiş balastın (PU70, PU140 ve PU210) yük altındaki davranışının modellenmesinde ise lineer elastik model kullanılmıştır. Bu çalışmada poisson oranı (ν) olarak, PU70, PU140 ve PU210 için 0,15 ve PU0 için ise 0,2 kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında kullanılan malzemelerin özellikleri Çizelge 1’de verilmiştir.

Bu çalışma kapsamında geliştirilen balastlı demiryolu hattının nümerik modelinin analizleri Çizelge 2’de verilen plana göre gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 1. Malzeme özellikleri

Parametreler	Ray	Travers	PU0	PU70	PU140	PU210	Alt balast	Taban zemini
Model	LE	LE	MC	LE	LE	LE	MC	MC
Tip	NP	NP	Drenajlı	Drenajlı	Drenajlı	Drenajlı	Drenajlı	Drenajlı
E (kPa)	21x10 ⁶	10x10 ⁶	12,5x10 ³	42,2x10 ³	72x10 ³	101,8x10 ³	80x10 ³	12,5x10 ³
γ (kN/m ³)	78	24	14,6	15,6	15,6	15,7	16,67	16
ν	0,15	0,15	0,2	0,15	0,15	0,15	0,35	0,4
c (kPa)	-	-	5	-	-	-	0	15
ϕ (°)	-	-	45	-	-	-	35	12
ψ (°)	-	-	0	-	-	-	0	0

Not: LE: Lineer elastik, MC: Mohr-Coulomb, NP: Non-porous, E: Elastisite modülü, γ : Birim hacim ağırlığı, ν : Poisson oranı, c: Kohezyon, ϕ : İçsel sürtünme açısı ve ψ : Dilatasyon açısı

Çizelge 2. Analiz planı

No	PU Miktarı (kg/m ³)	Hız (km/h)	Yükleme
1	0	-	Statik (42,5 kN)
2	0	100	HTY
3	0	200	HTY
4	0	300	HTY
5	70	-	Statik (42,5 kN)
6	70	100	HTY
7	70	200	HTY
8	70	300	HTY
9	140	-	Statik (42,5 kN)
10	140	100	HTY
11	140	200	HTY
12	140	300	HTY
13	210	-	Statik (42,5 kN)
14	210	100	HTY
15	210	200	HTY
16	210	300	HTY

Not: HTY: Hareket eden teker yükü

Çizelge 2'deki her bir analiz üç aşamadan oluşmaktadır: 1) Başlangıç aşaması, 2) inşaat aşaması ve 3) yükleme aşaması. Başlangıç aşamasında sadece taban zemini aktif durumda iken, inşaat aşamasında alt balast, balast, travers ve ray aktif hale getirilmiştir. Yükleme aşamasında ise, nümerik modele statik ve hareket eden tekerlek yükleri uygulanmıştır. Yükleme türünün ve tren hızının etkisini incelemek için başlangıç ve inşaat aşamalarında modelde meydana gelen deplasmanlar yükleme aşamasında hesaba dahil edilmemiştir. Hesaplama türü olarak statik yük için plastik ve hareket eden teker yükü için ise dinamik tercih edilmiştir. Statik ve hareket eden tekerlek yükleri için Avrupa'da kullanılmakta olan Thalys hızlı treninin ölçüleri ve dingil yükleri bu çalışmada kullanılmıştır. Thalys yüksek hızlı treni toplamda 26 dingile sahiptir. Lokomotif kısmında bulunan dingillerin her birinin yükü yaklaşık 170 kN, uç bojilerdeki dingil yükleri yaklaşık 120 kN ve bar vagonlarındaki dingil yükleri de yaklaşık 155 kN'dir. Ayrıca lokomotifteki tekerleklerin çapları 920 mm iken diğer tekerleklerin çapları 910 mm'dir. Thalys yüksek hızlı tren hakkında daha fazla bilgiye Correia ve arkadaşları [30] ve Mezeh ve arkadaşları [33] tarafından gerçekleştirilen çalışmalardan ulaşılabilir.

Tekerlek yükünün %40 ile %60'ı tekerin altındaki traverse aktarılırken, yükün kalan kısmı diğer yakındaki traverslere aktarılmaktadır [30]. AREMA [34] yük dağılımını belirlerken traverslerin merkezleri arasındaki uzaklığı referans almaktadır. Bu çalışmada travers aralığı (merkezden merkeze) 60 cm olarak ele alınmıştır. AREMA'ya [34] göre 60 cm travers aralığında yük dağılımı yaklaşık olarak %50 olmaktadır. Bundan dolayı bu çalışmada yük dağılımı olarak %50 kabul edilmiştir. Diğer bir ifade ile, teker yükünün yarısı tekerin altındaki traverse ve kalan kısmı da diğer yakındaki traverslere aktarılmaktadır. Çizelge 2'de de görüldüğü üzere, nümerik modellerin analizinde statik ve hareket eden tekerlek yükleri uygulanmıştır. Bu çalışmada kullanılan statik tekerlek yükü, Thalys yüksek hızlı trenin sahip olduğu maksimum tekerlek yükü

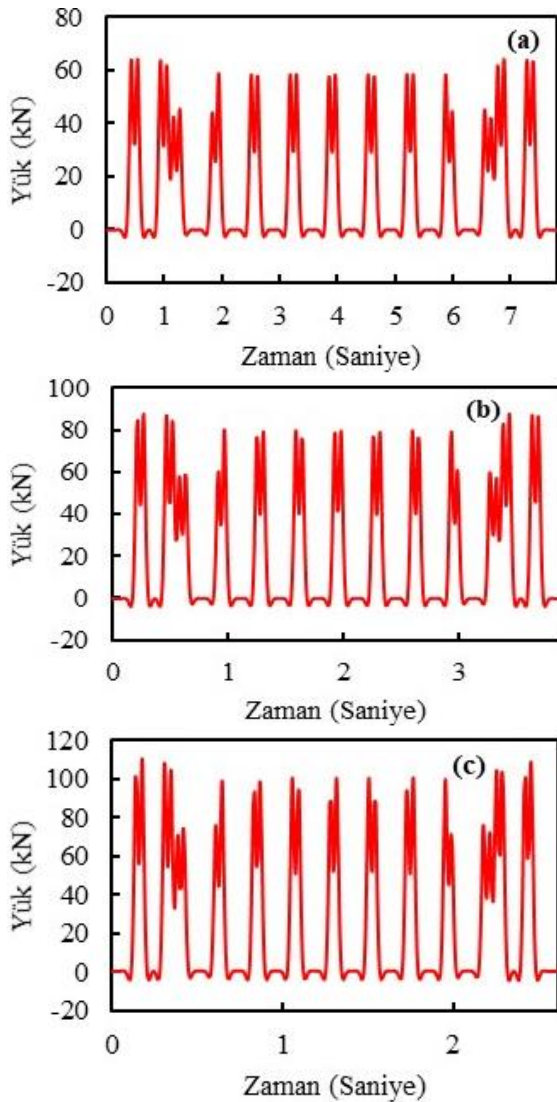
($170/2=85$ kN) ve %50 yük dağılımına göre belirlenmiştir. Şöyle ki; maksimum tekerlek yükünün 0,5 ile çarpılması ile tekerin altındaki traverse aktarılan statik teker yükü hesaplanmıştır ($85 \times 0,5=42,5$ kN) (Çizelge 2). Dinamik yüklemede ise eşdeğer dinamik teker yükü, statik teker yükü ile dinamik etki katsayısının çarpılması ile elde edilmiştir [24]. Bu çalışmada dinamik etki katsayısı (ϕ), AREA [35] tarafından önerilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır (Eşitlik 1). Bu eşitlikteki V (km/h) ve D (mm) sırasıyla tren hızını ve teker çapını ifade etmektedir. Statik tekerlek yükü hesabında olduğu gibi hareket eden tekerlek yükü hesabında da %50 yük dağılımı kullanılmıştır. Diğer yandan farklı tren hızları için (100, 200 ve 300 km/h) farklı etki katsayıları Eşitlik 1 kullanılarak hesaplanmıştır ($\phi=1,57$ (100 km/h), $\phi=2,15$ (200 km/h) ve $\phi=2,72$ (300 km/h)). Teker çapı olarak ise, bu çalışmada minimum teker çapı olan 910 mm kullanılmıştır. Bir trenin geçişi esnasında meydana gelen hareket eden tekerlek yükünün yükleme izi ise Winkler giriş yöntemi (Eşitlik 2 ve 3) ile oluşturulmuştur. Eşitlik 2'deki s, L, x ve t sırasıyla hareketli referans noktasını, karakteristik uzunluğu, statik referans noktasını ve zamanı ifade etmektedir. Eşitlik 3'teki F_e ve $F(s)$ ise sırasıyla dinamik dingil yükünü ve her bir dingilden gelen dinamik dingil yüklerinin dağılımını ifade etmektedir. Dinamik etki katsayılarının farklı hızlar için hesaplanmasından sonra ilk olarak karakteristik uzunluk (L) hesaplanmıştır. Bunun için $s=0$ (Eşitlik 2-3) olarak kabul edilmiş olup, %50 yük dağılımı için Eşitlik 3 kullanılarak L değeri 1 olarak hesaplanmıştır. Thalys yüksek hızlı treninde 1. dingil ile 26. dingil (son dingil) arasındaki mesafe 193,14 m'dir. Eşitlik 2'deki x'in hesabında, ilk dingilden önceki 20 traverslik mesafe (12 m) trenin yaklaşma mesafesi olarak hesaba dahil edilmiştir. Bu nedenle ilk ve son dingilin referans noktasına (x) olan uzaklıkları sırasıyla 12 ve 205,14 m'dir. Son dingilden sonra ise yine yaklaşık 20 traverslik mesafe rahatlama mesafesi olarak yük dağılımında göz önüne alınmıştır. Farklı hız değerleri (100, 200 ve 300 km/h) için, bu çalışmada kullanılan bir trenin

geçişi esnasında oluşan yükleme izleri Şekil 2’de verilmiştir.

$$\phi=1+5,21V/D \quad (1)$$

$$s=\frac{1}{L}(x-Vt) \quad (2)$$

$$F(s)=\frac{F_e}{2L} e^{-\left|\frac{s}{L}\right|} \left(\cos \left| \frac{s}{L} \right| + \sin \left| \frac{s}{L} \right| \right) \quad (3)$$



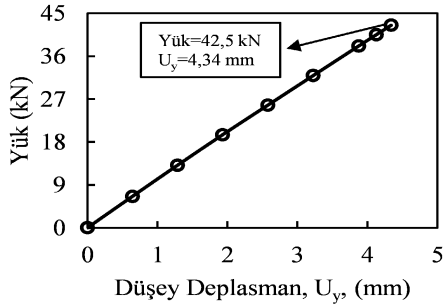
Şekil 2. Bir trenin geçişi esnasında oluşan yükleme izleri: a) 100 km/h, b) 200 km/h ve c) 300 km/h

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Yukarıda da bahsedildiği üzere, bu çalışmada farklı miktarlarda poliüretan (0, 70, 140 ve 210 kg/m³) ile iyileştirilmiş balastlı demiryolu hattında statik ve hareket eden teker yüklerinden dolayı meydana gelen düşey deformasyonlar (oturma) PLAXIS 2D programı kullanılarak araştırılmıştır. Ayrıca farklı tren hızlarının (100, 200 ve 300 km/h)’da etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Bu çalışmada, düşey deplasmanların (U_y) gösteriminde aşağı yön (↓) pozitif ve yukarı yön (↑) negatif olarak kabul edilmiştir. Çalışmanın bu bölümünde, elde edilen nümerik analiz sonuçları sunulmuştur.

3.1. Poliüretansız Balastlı Hatta Yükleme Tipinin Etkisi

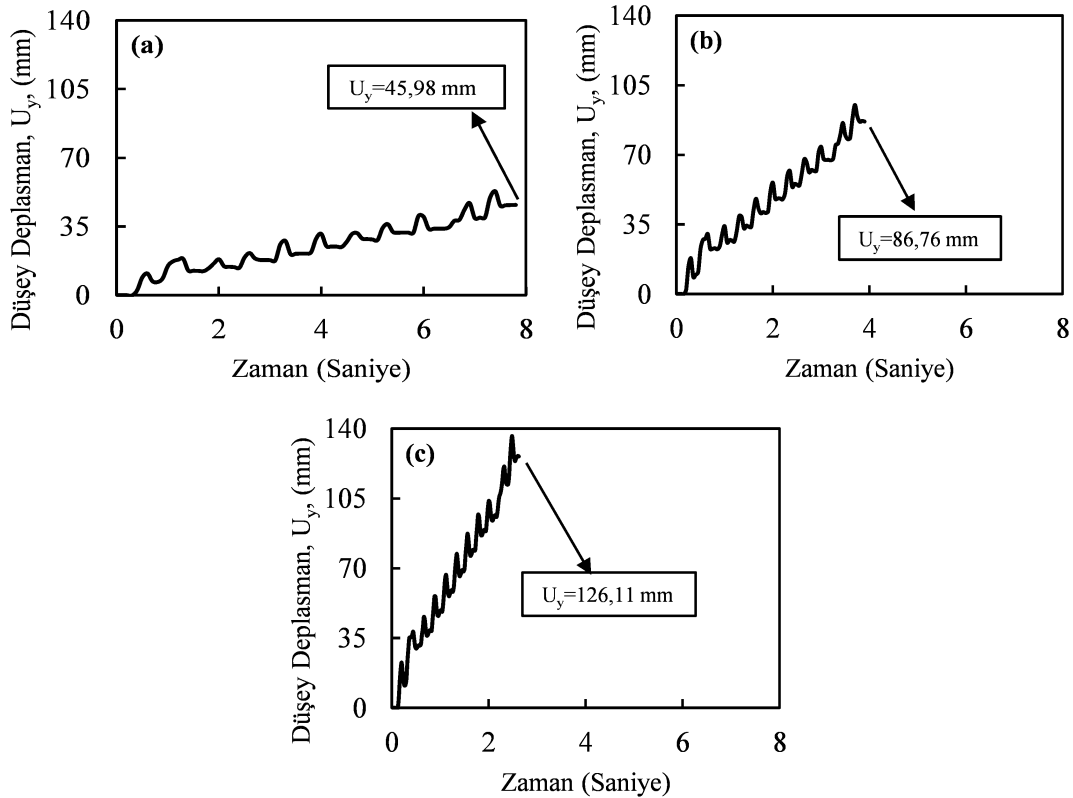
Bu alt başlıkta, poliüretan ile güçlendirilmemiş balastın bir demiryolu hattında kullanılması durumunda farklı yükleme tiplerinden dolayı hatta meydana gelen düşey deplasmanlar incelenmiştir. Statik teker yükü altında hatta meydana gelen düşey deplasman Şekil 3’te gösterilmiştir. Daha önce de bahsedildiği üzere, statik teker yükü belirlenirken maksimum dingil yükü (170 kN) ve %50 yük dağılımı göz önüne alınmıştır. Öte yandan dinamik etki katsayısı statik teker yükünün hesabına dahil edilmemiştir. Bu sebeple statik teker yükü olarak 42,5 kN analizde uygulanmıştır. Şekil 3’te görüldüğü üzere 42,5 kN’luk yükün tamamı bu modelde başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Yapılan bu statik teker yükü analizinden kalıcı düşey deplasman olarak 4,34 mm elde edilmiştir. Ulusal Demiryolu İdaresi’ne (National Railway Administration) [36] göre 250 km/h işletme hızına sahip balastlı yüksek hızlı demiryolunda kritik oturma değeri 100 mm’dir. Diğer yandan Zhou ve arkadaşları [37] tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise 300 km/h işletme hızına sahip balastlı demiryolu hattında kritik oturma değeri olarak 50 mm seçilmiştir. Bu iki kritik oturma kriterine göre statik teker yükünden dolayı meydana gelen düşey deplasman (4,34 mm), kabul edilen sınırlar içerisinde kalmaktadır.



Şekil 3. Poliüretan ile güçlendirilmemiş balastlı demiryolu hattında statik teker yükü ve düşey deplasman ilişkisi

Farklı hızlarda hareket eden trenin bir geçişi esnasında hareket eden tekerlek yükünden dolayı hatta meydana gelen oturma Şekil 4'te sunulmuştur. Şekil 4'e göre yüksek hızlı trenler için düşük olarak kabul edilebilecek 100 km/h hızda bile hatta meydana gelen oturma değeri

(45,98 mm) statik teker yükünün oturma değerinin yaklaşık olarak 10,6 katıdır. Diğer yandan bu durum artan hızlarda daha da artmaktadır. Şöyle ki; 200 km/h hızda 20 kat ve 300 km/h hızda 29 kat daha fazla oturma elde edilmiştir. Ayrıca 100 km/h ve 200 km/h hızda meydana gelen oturma değerleri kabul edilen sınırlar içerisinde kalırken (<100 mm), 300 km/h hız için kabul edilen oturma değerinden daha fazla oturma meydana gelmektedir (126,11 mm > 50 mm). Öte yandan Şekil 4'teki oturma değerindeki artış trendine bakıldığında, artan tren geçiş sayıları ile bu oturma miktarlarının daha da artabileceği sonucu çıkarılabilmektedir. Sonuç olarak Şekil 3 ve Şekil 4'teki sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, statik teker yükünün yerine tren hızlarının etkisini de içeren hareket eden tekerlek yükü balastlı demiryolu hattının tasarımında göz önüne alınmalıdır.

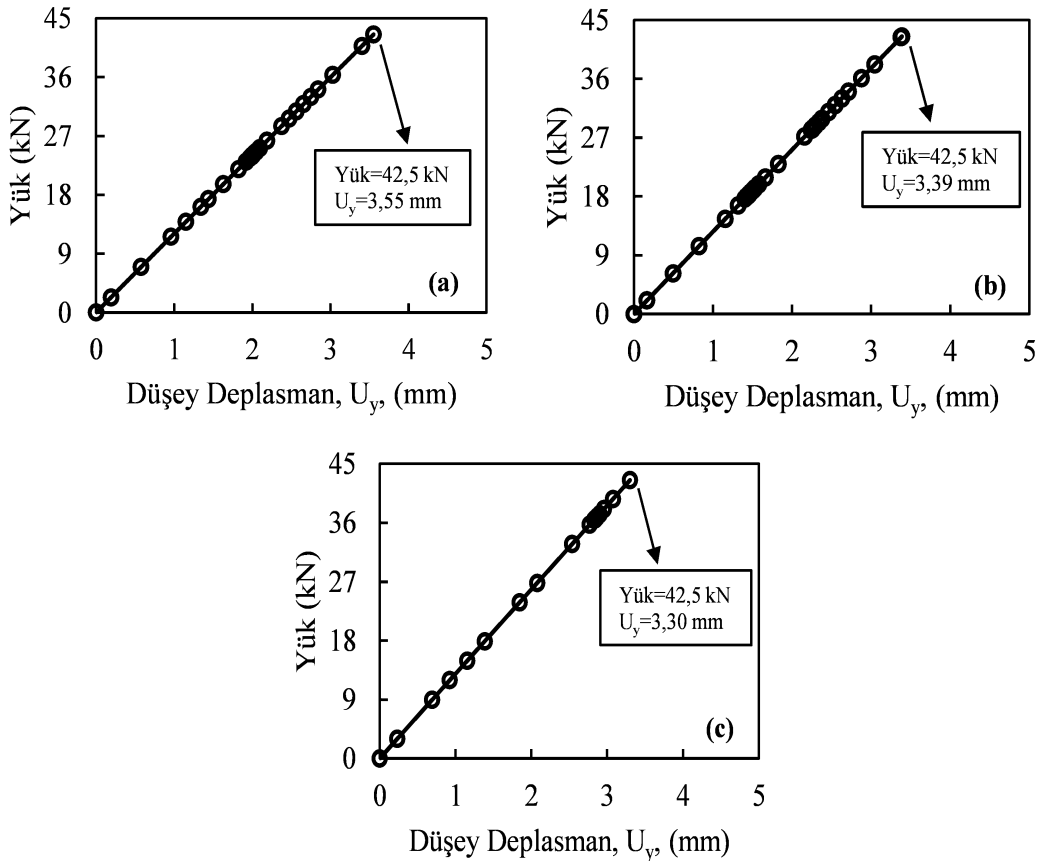


Şekil 4. Poliüretan ile güçlendirilmemiş balastlı demiryolu hattında farklı hızlar için hareket eden tekerlek yükü ve düşey deplasman ilişkisi: a) 100 km/h, b) 200 km/h ve c) 300 km/h

3.2. Poliüretan Miktarı ve Yükleme Tipinin Etkisi

Farklı miktarlarda poliüretan (70, 140 ve 210 kg/m³) ile güçlendirilmiş balastın demiryolu hattında kullanılması durumunda, statik teker yükü ve tren hızının etkisini hesaba katan hareket eden tekerlek yüklerinden dolayı hatta meydana gelen düşey deplasmanlar bu alt bölümde sunulmuştur. Statik teker yükünden dolayı poliüretan ile güçlendirilmiş hattın kalıcı düşey deplasman analiz sonuçları Şekil 5'te verilmiştir. Şekil 5'e göre 42,5 kN'luk statik teker yükü nümerik modelde başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Poliüretansız durum ile kıyaslandığında, poliüretan kullanımı ile statik teker yükünden dolayı demiryolu hattında

meydana gelen oturmada kısmen bir iyileşme meydana gelmektedir (4,34 mm'den 3,30 mm'ye) (Şekil 3 ve Şekil 5). Meydana gelen bu iyileşmenin miktarı ise artan poliüretan oranı ile artmaktadır. Bu durum ise poliüretandan dolayı balastın elastisite modülündeki artış ile açıklanabilir. Ancak poliüretanın, hattın oturma davranışına olan kısmi etkisi statik teker yükünden kaynaklanabilir. Şöyle ki; bir önceki alt başlıkta da görüldüğü üzere (Şekil 3 ve Şekil 4), hareket eden tekerlek yükü altında meydana gelen oturma statik teker yükünden dolayı meydana gelen oturmanın yaklaşık 29 katıdır. Bu nedenle poliüretan kullanımının balastlı demiryolu hattının oturma davranışına etkisinin hareket eden tekerlek yükü altında incelenmesi gerekmektedir.

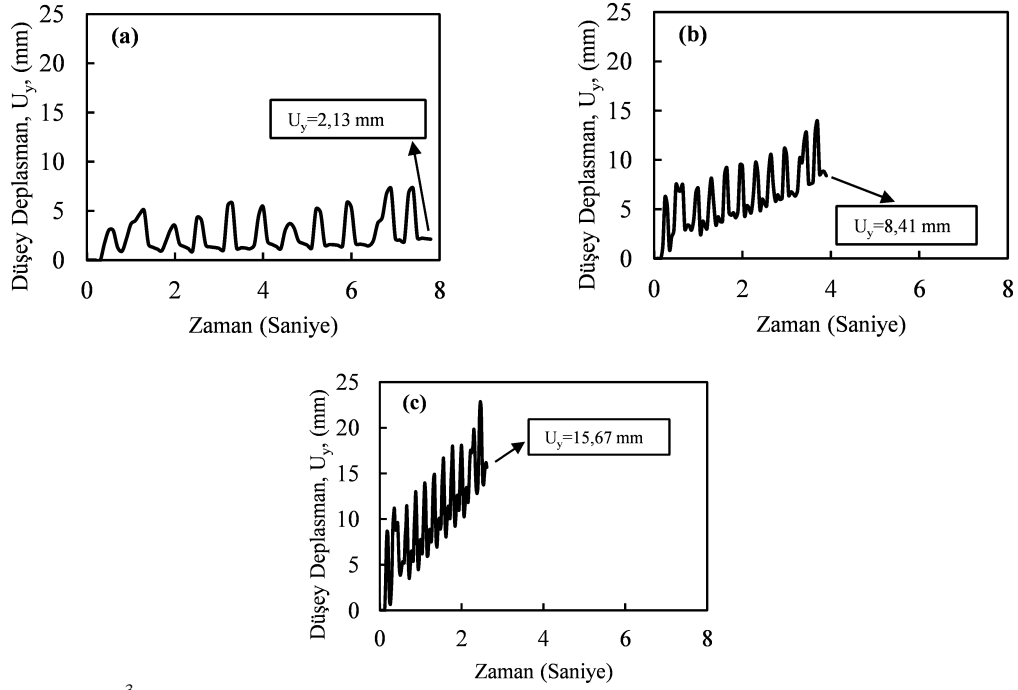


Şekil 5. Poliüretan ile güçlendirilmiş balastlı demiryolu hattında statik teker yükü ve düşey deplasman ilişkisi: a) 100 km/h, b) 200 km/h ve c) 300 km/h

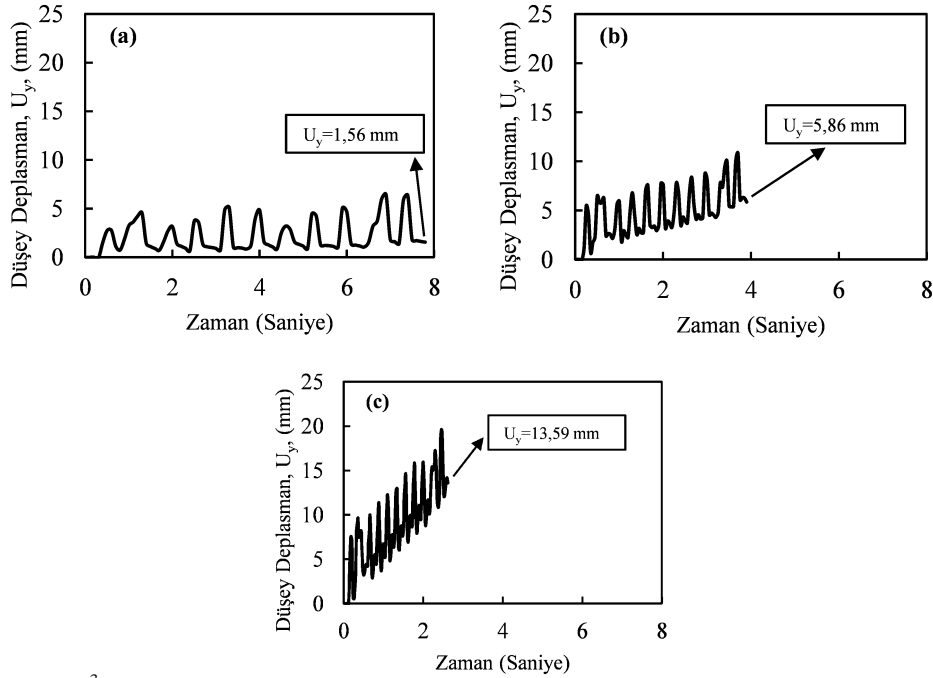
70, 140 ve 210 kg/m³ poliüretan kullanılarak iyileştirilmiş balastlı demiryolu hattının hareket eden tekerlek yükü altındaki oturma sonuçları sırasıyla Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8'te gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre balastlı demiryolu hattının poliüretan ile güçlendirilmesi durumunda 100 km/h hıza sahip bir trenin tam bir geçişinden sonra hatta meydana gelen oturma miktarı poliüretan miktarına bağlı olarak %97,2'ye kadar iyileşmektedir (45,98 mm'den 1,28 mm'ye). Farklı miktarlarda (70 ,140 ve 210 kg/m³) poliüretanlar için bu iyileşme oranları sırasıyla %95, %96,6 ve %97,2 olarak hesaplanmıştır. Bu iyileşme oranları, 100 km/h tren hızı için bu çalışmada kullanılan poliüretan miktarlarının birbirine yakın sonuçlar verdiğini göstermektedir. Öte yandan poliüretan ile güçlendirilmiş balastlı demiryolu hattında 100 km/h hızla hareket eden tekerlek yükünden dolayı meydana gelen oturma miktarı ise statik teker yükünden dolayı meydana gelen oturma miktarından daha az olmaktadır (70 kg/m³ için: 2,13 mm<3,55 mm, 140 kg/m³ için: 1,56 mm<3,39 mm ve 210 kg/m³ için: 1,28 mm<3,30 mm). Bu durum ise poliüretan ile güçlendirmiş balastın hareket eden tekerlek yükü altında daha çok elastik davranmasından ve sistemin daha az kalıcı deformasyon üretmesinden kaynaklanmaktadır. Şöyle ki; Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8'deki sonuçlar incelendiğinde, en son dingilden dolayı meydana gelen oturma miktarının büyük kısmını esnek oturma oluşturmaktadır. Diğer bir ifade ile yükün kalkmasından sonra oturma miktarının büyük oranda esnek bir davranış gösterdiği görülmektedir. Esnek davranışın sebebi ise balast agregaları arasında oluşan elastik poliüretan yapısıdır. Dinamik etki katsayısının hız artışı ile artmasından dolayı (Eşitlik 1), hattın maruz

kaldığı dinamik teker yükü de artmaktadır. Bu durum ise hatta meydana gelen oturma miktarının artmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle artan tren hızı ile elde edilen oturma miktarları artmakta (70 kg/m³ için: 2,13 mm'den 15,67 mm'ye, 140 kg/m³ için: 1,56 mm'den 13,59 mm'ye ve 210 kg/m³ için: 1,28 mm'den 11,10 mm'ye) ve poliüretan kullanımından dolayı elde edilen oturma iyileşme oranları da azalmaktadır (70 kg/m³ için: %95'ten %87,6'ya, 140 kg/m³ için: %96,6'dan %89'a ve 210 kg/m³ için: %97,2'den %91'e). Ayrıca 100 km/h tren hızının aksine 200 km/h ve 300 km/h tren hızlarında hareket eden tekerlek yükünden dolayı meydana gelen oturma miktarları statik teker yükünden daha fazla olmaktadır. Bu bulgulara dayanarak, poliüretan ile yapılacak güçlendirme çalışmalarında kullanılacak poliüretan miktarlarının yanı sıra hattı kullanacak trenlerin hızları da göz önüne alınmalıdır. Bu nedenle poliüretan ile güçlendirilmiş demiryolu hattının performansının analizinde statik teker yükünün yerine hareket eden tekerlek yükü göz önüne alınmalıdır. Ayrıca 200 km/h ve 300 km/h tren hızlarından dolayı daha fazla kalıcı deplasman gelişmesi ve bu düşey deplasmanların gelişimindeki lineer artış trendine dayanarak yüksek hızlarda yüksek poliüretan miktarlarının kullanılması gerektiği sonucuna varılmaktadır (Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8). Öte yandan bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre hareket eden tekerlek yükü altında poliüretan ile güçlendirilmiş balastlı demiryolu hattında bir trenin tam geçişinden dolayı meydana gelen oturmalar tüm poliüretan miktarları için Ulusal Demiryolu İdaresi [36] ve Zhou ve arkadaşları [37] tarafından önerilen kabul edilen oturma limitleri içinde kalmaktadır (<50 mm).

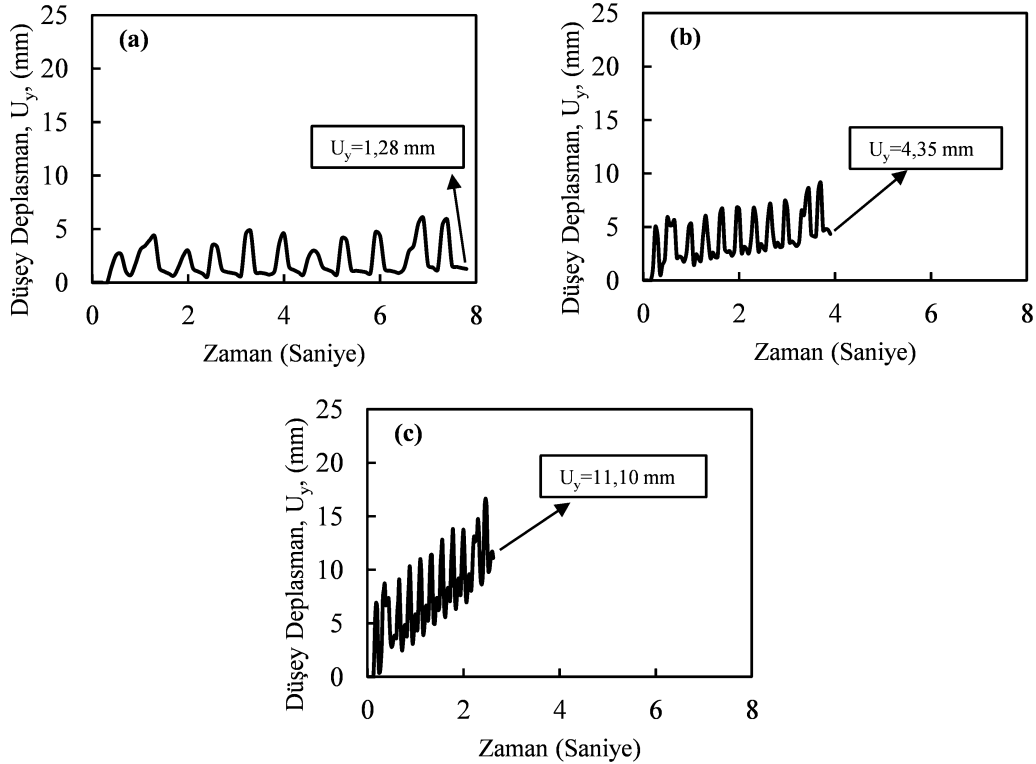
Poliüretan ile Güçlendirilmiş Balastın Hareket Eden Tekerlek Yükü Altındaki Deformasyon Davranışının Nümerik Olarak İncelenmesi



Şekil 6. 70 kg/m^3 poliüretan ile güçlendirilmiş balastlı demiryolu hattında farklı hızlar için hareket eden tekerlek yükü ve düşey deplasman ilişkisi: a) 100 km/h, b) 200 km/h ve c) 300 km/h



Şekil 7. 140 kg/m^3 poliüretan ile güçlendirilmiş balastlı demiryolu hattında farklı hızlar için hareket eden tekerlek yükü ve düşey deplasman ilişkisi: a) 100 km/h, b) 200 km/h ve c) 300 km/h



Şekil 8. 210 kg/m³ poliüretan ile güçlendirilmiş balastlı demiryolu hattında farklı hızlar için hareket eden tekerlek yükü ve düşey deplasman ilişkisi: a) 100 km/h, b) 200 km/h ve c) 300 km/h

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada farklı miktarlarda poliüretan ile güçlendirilmiş (0, 70, 140 ve 210 kg/m³) balastlı demiryolu hattının statik tekerlek yükü ve hareket eden tekerlek yükü altındaki oturma performansları PLAXIS 2D sonlu elemanlar programı ile sayısal olarak araştırılmıştır. Hareket eden tekerlek yükleri için yükleme izlerinin oluşturulmasında Winkler kiriş yöntemi kullanılmış ve farklı tren hızlarının (100, 200 ve 300 km/h) etkileri de göz alınmıştır. Bu çalışmadan çıkarılan başlıca sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1) Balastlı demiryolu hattının geoteknik tasarımında trenin hızı da göz önüne alınmalıdır. Bu nedenle geliştirilen nümerik modelin analizinde statik tekerlek yükünün yerine hareket eden tekerlek yükü uygulanmalıdır.

- 2) Poliüretan ile balastın güçlendirilmesi durumunda hareket eden tekerlek yükünden dolayı hatta meydana gelen kalıcı deformasyon miktarı önemli oranda iyileşmektedir (>%87). Diğer yandan balast agregaları arasında oluşan esnek poliüretan yapıdan dolayı hatta daha çok elastik deplasmanlar meydana gelmektedir.
- 3) Bu çalışmada kullanılan poliüretan miktarları (70, 140 ve 210 kg/m³) ile düşük tren hızında (100 km/h) benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ancak artan poliüretan miktarları ile balast agregaları arasında daha güçlü bir bağ oluşmaktadır. Bundan dolayı artan tren hızlarında yüksek poliüretan miktarları daha iyi performans sergilemektedir.
- 4) Bir demiryolu hattının farklı bölgelerindeki kritik durumlardan dolayı poliüretan kullanımı tercih edilmektedir. Bu nedenle bu çalışmadan elde edilen bulguların sahadaki mühendislere ve uygulayıcılara da fayda sağlayacağı düşünülmektedir.

5. KAYNAKLAR

1. Boler, H., 2012. On the Shear Strength of Polyurethane Coated Railroad Ballast. Yüksek Lisans Tezi, University of Illinois at Urbana Champaign, Urbana, 81.
2. Brown, S.F., Kwan, J., Thom, N.H., 2007. Identifying the Key Parameters That Influence Geogrid Reinforcement of Railway Ballast. Geotext. Geomembr., 25, 362-335.
3. Dersch, M.S., Tutumluer, E., Peeler, C.T., Bower, D.K., 2010. Polyurethane Coating of Railroad Ballast Aggregate for Improved Performance. 2010 Joint Rail Conference (JRC2010), 27-29 Nisan 2010, Urbana, IL, ABD.
4. Du Plooy, R.F., Gräbe, P.J., 2017. Characterisation of Rigid Polyurethane Foam-Reinforced Ballast Through Cyclic Loading Box Tests. J. South Afr. Inst. Civ. Eng., 59(2), 2-10.
5. Esmaili, M., Zakeri, J.A., Babaei, M., 2017. Laboratory and Field Investigation of the Effect of Geogrid Reinforced Ballast on Railway Track Lateral Resistance. Geotext. Geomembr., 45, 23-33.
6. Halefom, B., 2017. Performance Evaluation of ELASTOTRACK Polyurethane Stabilized Railroad Ballasts. Yüksek Lisans Tezi, Addis Ababa University, Etiyopya, 65.
7. Hussaini, S.K.K., Indraratna, B., Vinod, J.S., 2015. Performance Assessment of Geogrid-Reinforced Railroad Ballast During Cyclic Loading. Transp. Geotech., 2, 99-107.
8. Indraratna, B., Ngo, N.T., Rujikiatkamjorn, C., 2011. Behavior of Geogrid-Reinforced Ballast Under Various Levels of Fouling. Geotext. Geomembr., 29, 313-322.
9. Indraratna, B., Nimbalkar, S., 2013. Stress-Strain Degradation Response of Railway Ballast Stabilized with Geosynthetics. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 139, 684-700.
10. Indraratna, B., Nimbalkar, S., Christie, D., Rujikiatkamjorn, C., Vinod, J.S., 2010. Field Assessment of the Performance of a Ballasted Rail Track with and without Geosynthetics. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 136, 907-917.
11. Indraratna, B., Nimbalkar, S., Neville, T., 2014. Performance Assessment of Reinforced Ballasted Rail Track. Ground Improv., 167, 24-34.
12. Indraratna, B., Nimbalkar, S., Ngo, N.T., Neville, T., 2016. Performance Improvement of Rail Track Substructure Using Artificial Inclusions-Experimental and Numerical Studies. Transp. Geotech., 8, 69-85.
13. Indraratna, B., Nimbalkar, S., Rujikiatkamjorn, C., 2014. From Theory to Practice in Track Geomechanics-Australian Perspective for Synthetic Inclusions. Transp. Geotech., 1, 171-187.
14. Lee, S.H., Lee, S.J., Park, J.G., Choi, Y.T., 2017. An Experimental Study on the Characteristics of Polyurethane-mixed Coarse Aggregates by Large-Scale Triaxial Test. Constr. Build. Mater., 145, 117-125.
15. Navaratnarajah, S.K., Indraratna, B., 2017. Use of Rubber Mats to Improve the Deformation and Degradation Behaviour of Rail Ballast Under Cyclic Loading. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 143(6), 04017015.
16. Ngo, N.T., Indraratna, B., Rujikiatkamjorn, C., 2016. Modelling Geogrid-Reinforced Railway Ballast Using the Discrete Element Method. Transp. Geotech., 8, 86-102.
17. Nimbalkar, S., Indraratna, B., 2016. Improved Performance of Ballasted Rail Track Using Geosynthetics and Rubber Shockmat. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 142(8), 04016031.
18. Nimbalkar, S., Indraratna, B., Dash, S.K., Christie, D., 2012. Improved Performance of Railway Ballast Under Impact Loads Using Shock Mats. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 138, 281-294.
19. Qian, Y., Mishra, D., Tutumluer, E., Kazmee, H.A., 2015. Characterization of Geogrid Reinforced Ballast Behavior at Different Levels of Degradation Through Triaxial Shear Strength Test and Discrete Element Modeling. Geotext. Geomembr., 43(5), 393-402.
20. Raymond, G.P., 2002. Reinforced Ballast Behaviour Subjected to Repeated Load. Geotext. Geomembr., 20(1), 39-61.
21. Sweta, K., Hussaini, S.K.K., 2018. Effect of Shearing Rate on the Behavior of Geogrid-Reinforced Railroad Ballast Under Direct Shear Conditions. Geotext. Geomembr., 46, 251-256.

22. Woodward, P.K., El Kacimi, A., Laghrouche, O., Medero, G., Banimahd, M., 2012. Application of Polyurethane Geocomposites to Help Maintain Track Geometry for High-speed Ballasted Railway Tracks. *J. Zhejiang Univ., Sci. A (Appl. Phys. Eng.)*, 13(11), 836-849.
23. Woodward, P.K., Medero, G., Griffiths, D.V., 2009. Reducing Track Faults Using Polymer Geocomposite Technology. The 8th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, 29 Haziran-2 Temmuz, Champaign, 1273-1282.
24. Jiang, Y., Nimbalkar, S., 2019. Finite Element Modeling of Ballasted Rail Track Capturing Effects of Geosynthetic Inclusions. *Front. Built Environ.*, 5(69), 1-11.
25. Auersch, L., 2006. Dynamic Axle Loads on Tracks with and Without Ballast Mats: Numerical Results of Three-Dimensional Vehicle-track-soil Models. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F: J. Rail and Rapid Transp.*, 220(2), 169-183.
26. Anastasopoulos, I., Alfi, S., Gazetas, G., Bruni, S., Leuven, A.V., 2009. Numerical and Experimental Assessment of Advanced Concepts to Reduce Noise and Vibration on Urban Railway Turnouts. *J. Transp. Eng.*, 135(5), 279-287.
27. Keene, A., Edil, T., Fratta, D., Tinjum, J., 2013. Modeling the Effect of Polyurethane Stabilization of Rail Track Response. *Geo-Congress 2013: Stability and Performance of Slopes and Embankments III*, 3-7 Mart, San Diego, Kaliforniya, 1410-1419.
28. Punetha, P., Maharjan, K., Nimbalkar, S., 2021. Modeling of the Dynamic Response of Critical Zones in a Ballasted Railway Track. *Front. Built Environ.*, 7, 660292.
29. Kalliainen, A., Kolisoja, P., Nurmikolu, A., 2016. 3D Finite Element Model as a Tool for Analyzing the Structural Behavior of a Railway Track. *Procedia Eng. (Advances in Transportation Geotechnics 3: The 3rd International Conference on Transportation Geotechnics 2016)*, 143, 820-827.
30. Correia, A.G., Cunha, J., Marcelino, J., Caldeira, L., Varandas, J., Dimitrovová, Z., Antão, A., Gonçalves da Silva, M., 2007. Dynamic Analysis of Rail Track for High Speed Trains: 2D Approach. 5th International Workshop on Application of Computational Mechanics in Geotechnical Engineering, 1-4 Nisan, Portekiz.
31. Khan, S.N., 2018. Numerical Analysis of Deformation and Stability in the Formation for Railway Track. *Yüksek Lisans Tezi, Bauhaus-universität Weimar, Weimar*, 79.
32. Faizan, A.A., Kirtel, O., Çelebi, E., Zulfikar, A.C., Göktepe, F., 2022. Experimental Validation of a Simplified Numerical Model to Predict Train-induced Ground Vibrations. *Computer. Geotech.*, 141, 104547.
33. Mezeh, R., Mroueh, H., Hosseingholian, M., Sadek, M., 2019. New Approach for the Assessment of Train/Track/Foundation Dynamics Using in-situ Measurements of High-speed Induced Vibrations. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 116, 50-59.
34. AREMA, 2010. Manual for Railway Engineering. American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association, Lanham, 1312.
35. AREA, 1974. Manual for Recommended Practice. American Railway Engineering Association, Washington, DC, 848.
36. National Railway Administration, 2014. Code for Design of High Speed Railway (TB10621-2014). China Railway Press, Beijing.
37. Zhou, S., Wang, B., Shan, Y., 2020. Review of Research on High-speed Railway Subgrade Settlement in Soft Soil Area. *Railw. Eng. Sci.*, 28, 129-145.

Flow Characteristics and Heat Transfer Enhancement of Sinusoidal Corrugated Channels with Different Configurations

Veli ÖZBOLAT*¹ ORCID 0000-0002-1757-3054
Beşir ŞAHİN² ORCID 0000-0003-0671-0890

¹Cukurova University, Ceyhan Engineering Faculty, Mechanical Engineering Department, Adana

²Cukurova University, Engineering Faculty, Mechanical Engineering Department, Adana

Geliş tarihi: 03.01.2022

Kabul tarihi: 21.03.2022

Atıf şekli/ How to cite: ÖZBOLAT, V., ŞAHİN, B., (2022). Flow Characteristics and Heat Transfer Enhancement of Sinusoidal Corrugated Channels with Different Configurations. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37(1), 93-107.

Abstract

This study investigated flow characteristics and heat transfer enhancement in various sinusoidal corrugated channels. The channel height and the phase shift effects on the flow structures and thermal performances were examined numerically for Reynolds numbers in the range of $2500 \leq Re \leq 7500$. The geometrical configurations of this study cover three different channel heights ($H_{min}/H_{max}=0.36, 0.54, 0.72$) and three phase shift angles ($\phi=0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$). Velocity distribution, turbulence intensity, local and averaged Nusselt numbers, and friction factor were calculated for various configurations. Finally, thermal performance factors (TPF) were also calculated to determine the optimum channel configuration and operating condition.

Keywords: Corrugated channel, Heat transfer enhancement, Phase shift, Thermal performance factor

Sinüs Şeklinde Oluklu Kanalların Farklı Konfigürasyonlardaki Akış Karakteristiği ve Isı Transfer İyileştirmesi

Öz

Bu çalışma sinüs şeklindeki çeşitli kanallardaki akış karakteristiğini ve ısı transfer iyileştirmesini incelemiştir. Kanal yüksekliği ve faz açısının akış yapısı ve ısı performansına etkileri Reynolds sayısı $2500 \leq Re \leq 7500$ aralığında sayısal olarak incelenmiştir. Bu çalışmadaki geometrik konfigürasyonlar üç kanal boyu ($H_{min}/H_{maks}=0,36, 0,54, 0,72$) ve üç faz açısını ($\phi=0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$) kapsamaktadır. Hız dağılımı, türbülans şiddeti, yerel ve ortalama Nusselt sayıları ve sürtünme faktörü çeşitli konfigürasyonlar için hesaplanmıştır. Son olarak, optimal kanal konfigürasyonu ve çalışma koşulunu belirlemek için ısı performans faktörü (TPF) de hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Oluklu kanal, Isı transfer iyileşmesi, Faz açısı, Isıl performans faktörü

*Corresponding author (Sorumlu yazar): Veli ÖZBOLAT, vozbolat@cu.edu.tr

1. INTRODUCTION

Heat transfer enhancement in channels is an important topic due to its usage in numerous engineering applications such as heat exchangers, electronic cooling devices, solar collectors, air conditioning systems, etc. Using corrugated walls instead of plain plates is one of the effective methods for improving the thermal performance of channels. Moreover, attaching inserts [1,2], adding nanoparticles to working fluid [3-7], and producing pulsating flow [8-12] can also be applied for extra improvement. Heat transfer enhancement in channels with different corrugation geometries such as sinusoidal [13-17], rectangular [18-20], arc-shaped [21,22], and trapezoidal [23,24] were both studied experimentally and numerically.

Heat transfer enhancement of corrugated channels improves by creating a new boundary layer with a higher temperature gradient on the surface by replacing core fluid [25-27]. Therefore, wavy walls are very effective on heat transfer augmentation in an unsteady flow since they improve interactions between core fluid and boundary layer. On the other hand, the heat transfer rate in corrugated channels does not increase substantially if the flow is steady [17,28]. In addition, the thermal boundary layer breaks and destabilizes by the effect of wavy walls, which work as turbulence promoters to improve local heat and mass transfer [29]. External power input is not needed in this method, but additional power requirements are supplied from the power available in the system which may cause a fluid pressure drop. So using optimum surface design with meaningful pressure loss is an effective way to enhance heat transfer.

Goldstein and Sparrow [30] were probably the first who studied the local heat and mass transfers in wavy wall channels. They studied corrugated wall effects under laminar, transitional, and low Reynolds number turbulent flow regimes. Their results indicated that heat transfer rates increase three folds compared to straight channels in a low Reynolds number turbulent flow regime. However, their effect on improvement has moderate when

the flow is laminar. Another study performed by the same group [31] investigated forced convection heat transfer coefficients and friction factors for flow in a corrugated duct for Reynolds number ranging from 1500 to 25000. Their results indicated that heat transfer improved about a factor of 2.5 compared to the parallel plate channel. In addition, they found the magnitude of friction factors, averaging 0.57 which is significantly greater than that of a straight duct. Oyakawa et al. [32] investigated the effects of channel width on heat transfer and flow characteristics of 0° sinusoidal wave channel. They found that pitch (P) to width (H) ratio $P/H=2$ is optimal for heat transfer augmentation. Oviedo-Tolentino et al. [26] studied chaotic flow mixing control in 180° sinusoidal wavy channel by applying different convergence and divergence angles (0.5° , 1° , and 1.5°) in Reynolds number ranging from 200 to 1200 and compared their results with the sinusoidal wavy channel. The results indicated that diverging channels improve chaotic mixing in channel flows since the flow is more unstable. On the contrary, the flow is very stable even at a high Reynolds number in converging channels. Ramgadia and Saha [33] investigated the thermal performance for different H_{\min}/H_{\max} ratios (0.1 to 0.5) at Reynolds number range 0-600. They found that $H_{\min}/H_{\max}=0.2$ has the highest Thermal Performance Factor (TPF) and for all channel heights TPF increases with Reynolds number in unsteady flow while decreases in a steady flow. In addition, heat transfer in sinusoidally wavy channels is higher than parallel plate channels. Hossain and Islam [34] studied the effect of variations of minimum height, amplitude, and wavelength of the sine-shaped wavy channel on heat transfer rate. Their results showed that heat transfer and friction factor increases with increasing amplitude and decreasing channel height since the flow become more unstable. However, they found wavelength variations have limited effect. In a recent study performed by Kurtulmus et al. [14], heat transfer and flow characteristics in a 180° sinusoidal corrugated channel were investigated for Reynolds numbers ranging from 4000 to 10000. They varied the

channel height ($H_{min}/H_{max}=0.5, 0.35, \text{ and } 0.28$) and calculated the thermal performance factor (TPF). The results showed that TPF is maximum at $Re=4000$ for all channel height and the maximum TPF value was obtained as 1.46 for $H_{min}/H_{max}=0.5$. There are much more studies related to passive methods for improving the thermal performance of corrugated channels than mentioned above. However, they mostly investigated heat transfer augmentation using nanofluids, attaching inserts, varying geometrical parameters. In this study, flow characteristics and thermal performance of sinusoidal corrugated channel for different phase shifts and channel height while keeping sinusoidal wavy wall geometry same.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Definition of Physical Domain

Heat transfer and flow characteristics of a thirteen wavy section sinusoidal channel have been investigated. The adiabatic smooth sections were added to the inlet and the outlet of the geometry to obtain appropriate boundary conditions, and the flow was considered fully developed at the inlet of the channel [35]. The wavy sections of the geometry consist of two isothermally heated sinusoidal wavy walls with a constant wavelength of (L_w) and amplitude of (a) as seen in Figure 1.

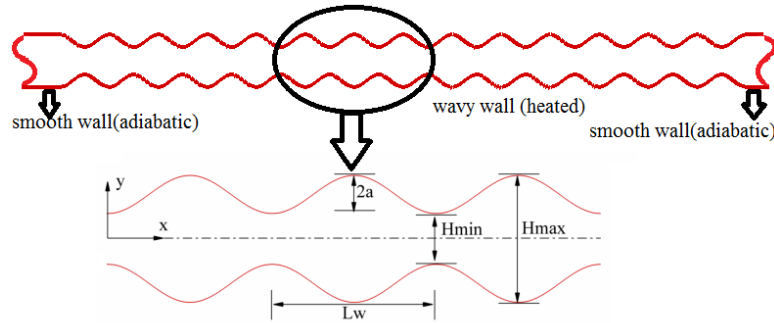


Figure 1. Schematic representation of the 180° phase shift model

The wavy surface function was defined as follow:

$$y = \frac{H_{min}}{2} + a \sin \frac{2\pi x}{L_w} \quad (1)$$

The wavelength and wave amplitude of the wavy walls are 28 mm and 3.5 mm, respectively. With moving the upper wall in x and y directions while keeping the lower wall fixed, phase shift angle ($\varphi=180^\circ, 90^\circ, \text{ and } 0^\circ$) and channel height ($H_{min}/H_{max}=0.72, 0.54 \text{ and } 0.36$) were varied, respectively.

2.2. Numerical Computation

The numerical simulations were performed by using fluid simulation software ANSYS Fluent 14.5 (Canonsburg, PA). The governing equations of flow have been discretized by a finite volume method and the pressure-velocity coupling system

has been resolved by using the SIMPLE algorithm. The main governing equations are as follows:

Continuity Equation:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

Momentum Equation:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \quad (4)$$

Energy Equation:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

Where

$$\alpha = \frac{\kappa}{\rho \cdot C_p} \quad (6)$$

The k-ε turbulence model introduced by Launder and Spalding [36] is used to solve the numerical problem due to its robustness, economy, and acceptable accuracy for turbulent flow and heat transfer simulations. The turbulent kinetic energy (k) and the rate of turbulent kinetic energy dissipation (ε) are defined, respectively, as:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (8)$$

Where the rate of turbulent kinetic energy generation is:

$$G_k = -\rho u_i u_j \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (9)$$

The turbulent viscosity, μ_t is calculated by combining k and ε as follows:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (10)$$

The following constants can be obtained by comprehensive data fitting for a wide range of turbulent flow [36]:

$$C_{\epsilon 1} = 1.4, C_{\epsilon 2} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0 \text{ and } \sigma_\epsilon = 1.3$$

Boundary conditions:

A no-slip boundary condition is imposed at the walls, where both velocity components are set to zero. Flat walls at the inlet and outlet of the channel are considered thermally isolated, and a constant wavy walls temperature is set higher than a uniform temperature of the input fluid. To reduce the computational time, a fully developed velocity profile is assigned at the inlet and the flat walls are shortened. The flow is assumed to be two-

dimensional, incompressible, and turbulent. In addition, the fluid is Newtonian.

For inlet flow,

$$u_{in} = 6\bar{u} \left[0.25 - \left(\frac{y}{H} \right)^2 \right] \text{ and } T = T_{in} \quad (11)$$

On the walls of the channel:

$$u = v = 0 \text{ and } T = T_w \text{ at sinusoidal wavy walls}$$

$$T = T_{in} \text{ at smooth walls}$$

On the axis of the channel:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} \quad (12)$$

To represent the results and characterize fluid flow and heat transfer in a wavy channel, the following parameters are presented.

Reynolds number, Re is defined as:

$$Re = \frac{\rho \cdot \bar{u} \cdot D_h}{\mu} \quad (13)$$

Heat transfer coefficient, h along the wavy surface can be calculated using the following equation:

$$h(x) = \frac{q''(x)}{T_w - T_m} \quad (14)$$

Where T_m is the bulk temperature which can be determined as:

$$T_m = \frac{\int_0^{H/2} u \cdot T \cdot dA}{\int_0^{H/2} u \cdot dA} \quad (15)$$

The local Nusselt number, Nu is defined as:

$$Nu_x = \frac{h_x \cdot D_h}{\kappa} \quad (16)$$

The average Nusselt number, \bar{Nu} along the corrugated wavy wall is calculated by integrating the local Nusselt number, Nu over the wavy section. Therefore, the average Nusselt number is defined as:

$$\overline{Nu} = \frac{1}{L} \int_0^L Nu \cdot dx \quad (17)$$

The friction factor, f for the flow in the corrugated channel is computed as:

$$f = \Delta p \frac{2D_h}{\Delta x(\rho \bar{u}^2)} \quad (18)$$

Using a corrugated wall instead of a smooth one enhances heat transfer inherently comes with additional pressure loss caused by higher friction at the walls due to the flow separation. The thermal performance factor (TPF), as functions of Nusselt number and friction factor, is used to analyze the overall performance since most of the time heat transfer and friction factor increase simultaneously. TPF is defined as:

$$TPF = \frac{\overline{Nu}/\overline{Nu}_o}{(f/f_o)^{1/3}} \quad (19)$$

Where \overline{Nu}_o and f_o are average Nusselt number and friction factor, respectively for fully developed flow in a flat channel subject to a constant wall temperature.

2.3. Grid Testing and Code Validation

In the present numerical investigation, non-staggered grids which are finer near the boundaries while coarser at the core region (seen in Figure 2) are used since higher gradients of variable values are expected near the walls. The numerical computation is ended if the sum of the absolute residual satisfies the convergence criterion of 10^{-6} for all parameters in the computational domain. A constant time step of 0.001 was used for all calculations.

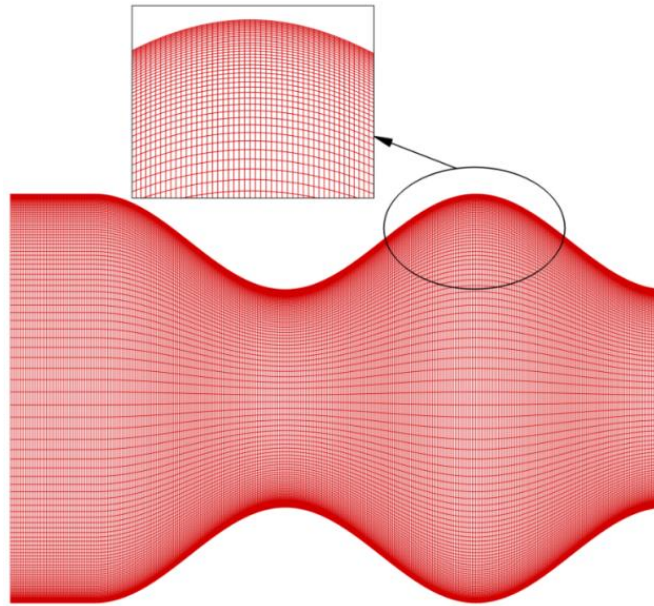


Figure 2. Schematic illustration of a non-uniform and non-orthogonal grid in the computational domain

The accuracy of results depends on the grid resolution. To ensure the accuracy of the numerical computation, the sufficiency of the grid domain for a channel with a phase shift of 180° and H_{min}/H_{max} ratio of 0.54 was tested. Three different mesh combinations (139×65 , 160×80 , 228×115) for one

wave were used to test the number of elements required. Figure 3 shows the axial velocity profiles at the middle of the third wave for $Re=2500$. Since the deviation between the medium-coarse and fine grid is very small, the results of the fine grid (228×115) are presented in this study.

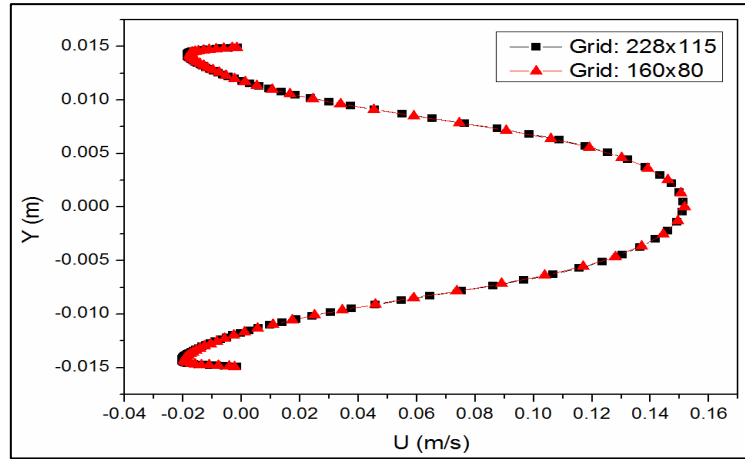


Figure 3. Comparison of velocity profiles at the widest cross-section of 3rd wave of 180° channel at Re=2500 for grids 228x115 and 160x80

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

Effects of the channel height and phase shift on heat transfer enhancement of sinusoidal corrugated channels are discussed for three Reynolds numbers. The optimum geometrical configuration and operating condition of the corrugated channel are determined by considering the thermal performance factor (TPF).

Hydrodynamics of water flow in corrugated channels with three channels heights H_1 ($H_{min}/H_{max}=0.36$), H_2 ($H_{min}/H_{max}=0.54$), and H_3 ($H_{min}/H_{max}=0.72$) are studied and the obtained results are compared with each other and that of the parallel plate channels to demonstrate the channel height effects on the thermal-hydraulic characteristics. The numerical simulations have been done for Reynolds numbers of 2500, 5000, and 7500.

Figure 4a presents streamwise velocity, u distributions along the axis in the corrugated channels with 180° phase shift angle for H_1 , H_2 , and H_3 . It is seen in this Figure that the maximum velocity is observed for H_1 since the distance between the upper and the lower walls is the shortest. Distributions of streamwise velocity component illustrate that streamwise velocity profiles along the axis of the channels are periodic. H_1 has the highest amplitude of the periodic

velocity distributions among all cases. However, streamwise velocity for H_3 seems almost straight line along the channel axis since the amplitude of sinusoidal wavy walls are very small concerning channel height. It can also be said that the periodicity of streamwise velocities eventually becomes stable in the region downstream of second cavities. Moreover, the streamwise velocity decreases in diverging sections and increases in converging sections of the wavy channel. The amplitude of streamwise velocity variation on the axis also depends on the Reynolds number. As can be seen from Figure 4b, the amplitude of the streamwise velocity on the axis is small for low Reynolds number such as Re=2500 and become bigger as the Reynolds number increases.

Using sinusoidal corrugated walls instead of parallel plates leads to magnifying turbulence intensity through the corrugated channel. The rate of turbulence intensity varies with a channel height. As can be seen from Figure 4c, the rate of turbulence intensity through the corrugated channel increases with decreasing the distance between the upper and the lower walls. Increasing the flow mixing and turbulence intensity improves the thermal transport through the corrugated channel with pressure drop penalty. Hence, additional considerations are required to find optimum design parameters.

Figure 4d illustrates the pressure distribution along the axis in the wavy part of the sinusoidal corrugated channel with a configuration of channel height H_2 ($H_{\min}/H_{\max}=0.54$) and phase shift angle, $\varphi = 180^\circ$ at the Reynolds number of 2500. As the flow moves towards the converging section of the channel, pressure decreases rapidly in the flow direction since the core flow region becomes narrow. On the other hand, rapid axial static pressure increase occurs as the fluid moves from the converging section to the diverging section due

to the expansion of the core flow after the narrowest cross-section. The periodic variations in axial static pressure occur throughout the sinusoidal corrugated channel since the channel geometry changes periodically too. Therefore, axial static pressure distribution along the wave repeats identical variation through the other waves. Moreover, the rate of pressure variations depends on the wave parameters (amplitude and wavelength), the channel height, and the Reynolds number.

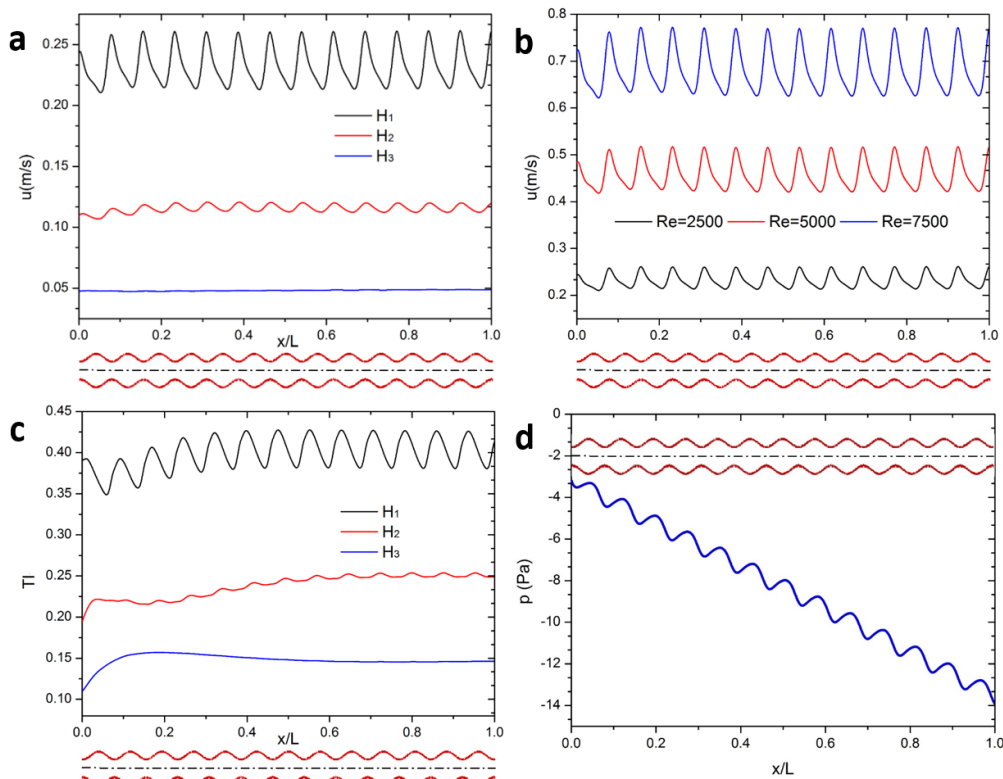


Figure 4. a) Distributions of streamwise velocities along the channel axis with 180° phase angle for $Re=2500$, b) Distributions of streamwise velocities along the axis of channel H_1 with 180° phase angle, c) Distributions of turbulence intensities along the channel axis with 180° phase angle for $Re=2500$, d) Axial static pressure distribution along the channel axis with 180° phase angle for $Re=2500$

The distance between the upper and the lower walls of a corrugated channel is an important parameter that influences the heat transfer performance and frictions. The influence of the corrugated channel height on the averaged Nusselt

number for 0° phase shift angles is illustrated in Figure 5a. For certain phase shift angles, the averaged Nusselt number is seen to increase significantly with increasing the Reynolds number. It is also shown that the averaged Nusselt number

obtained in the case of the highest channel height (H_3) is lower than that from the lower ones (H_1 and H_2) for a given phase shift angle due to the lower velocities. Reduction in the wall velocity gradients cause an increase in the thermal boundary layer. The maximum heat transfer occurs in the case of H_1 ($H_{min}/H_{max}=0.36$) at Reynolds number of 7500. As can be seen in Figure 5a, H_1 has the maximum increment rate of averaged Nusselt number, \overline{Nu} with Reynolds number for 0° phase shift angle. Recirculation develops in the corrugation troughs as the fluid flows through the corrugated surface, and improves the mixing of fluid in the boundary layer so the heat transfer in a corrugated channel enhances.

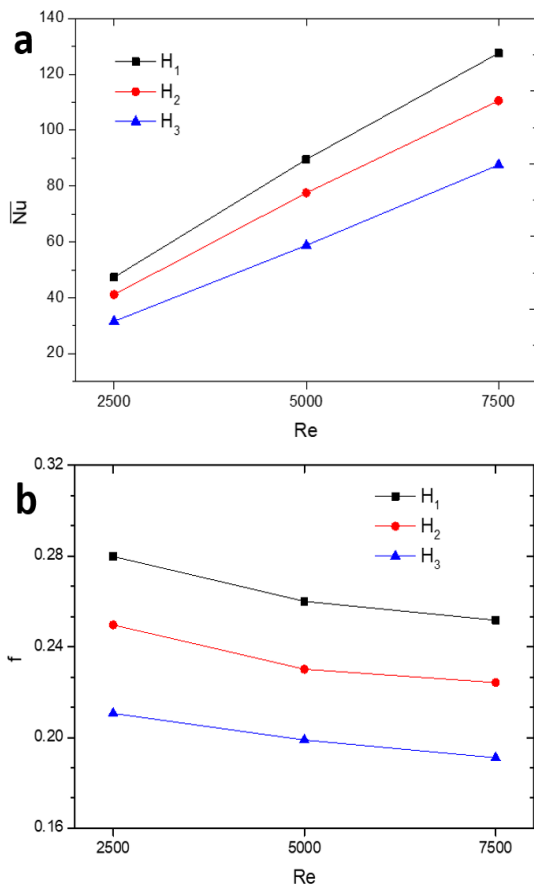


Figure 5. Variations of a) the averaged Nusselt number and b) the friction factor with Reynolds number for the corrugated channels with phase angle, $\phi=0^\circ$

The friction factor, f is a main hydraulic characteristic of flow and is influenced by the development of turbulence in corrugated channels. Therefore it is mainly affected by Reynolds number and channel configurations concerning channel height and phase shift angle. Friction factor as a function of Reynolds number for flow in 0° phase shift angle corrugated channel at different channel heights ($H_{min}/H_{max}=0.36, 0.54, \text{ and } 0.72$) are plotted in Figure 5b. This Figure shows that the friction factor gradually decreases with increasing Reynolds numbers for any value of the channel height. In addition, the friction factor gets higher values as the channel becomes narrower. The friction factors for all corrugated channel configurations have much higher than that for the straight channel since corrugations promote unstable formed vortices in the core of the corrugated channel's flow, causing a significant increase of pressure drops. It can be seen that the channel height, $H_{min}/H_{max}=0.36$ has the highest friction factor. On the other hand, the lowest values of friction factors are observed at $H_{min}/H_{max}=0.72$ for all Reynolds numbers considered.

Figure 6 shows the effects of the phase shift angle, ϕ on the streamwise velocities, u and turbulence intensities, TI from the wavy part of the channel H_1 . As shown in Figure 6(a-c), using wavy plates develops harmonic velocity distributions on the axis of the channel. For all the phase shift angles, the wavelengths and amplitudes of the velocity become stable after certain distances. The distance obtained for the same wavelength and amplitude is shortest for the 180° phase shift angle since the upper and the lower walls are symmetrical from the beginning of the channel. It is also noted that the amplitude of the velocity distribution depends on the phase shift angle and Reynolds number. The amplitude of the velocity distribution increases with the phase shift angle and Reynolds number. The highest amplitude is observed for the channel with a 180° phase shift angle at $Re=7500$. Corrugated plates lead to turbulence along the axis of the channel. In Figure 6(d-f), the strong dependence of the turbulence intensity on the phase shift angle and Reynolds number is also noticed. For all the geometric configurations tested, the turbulence intensity rate increases with Reynolds number.

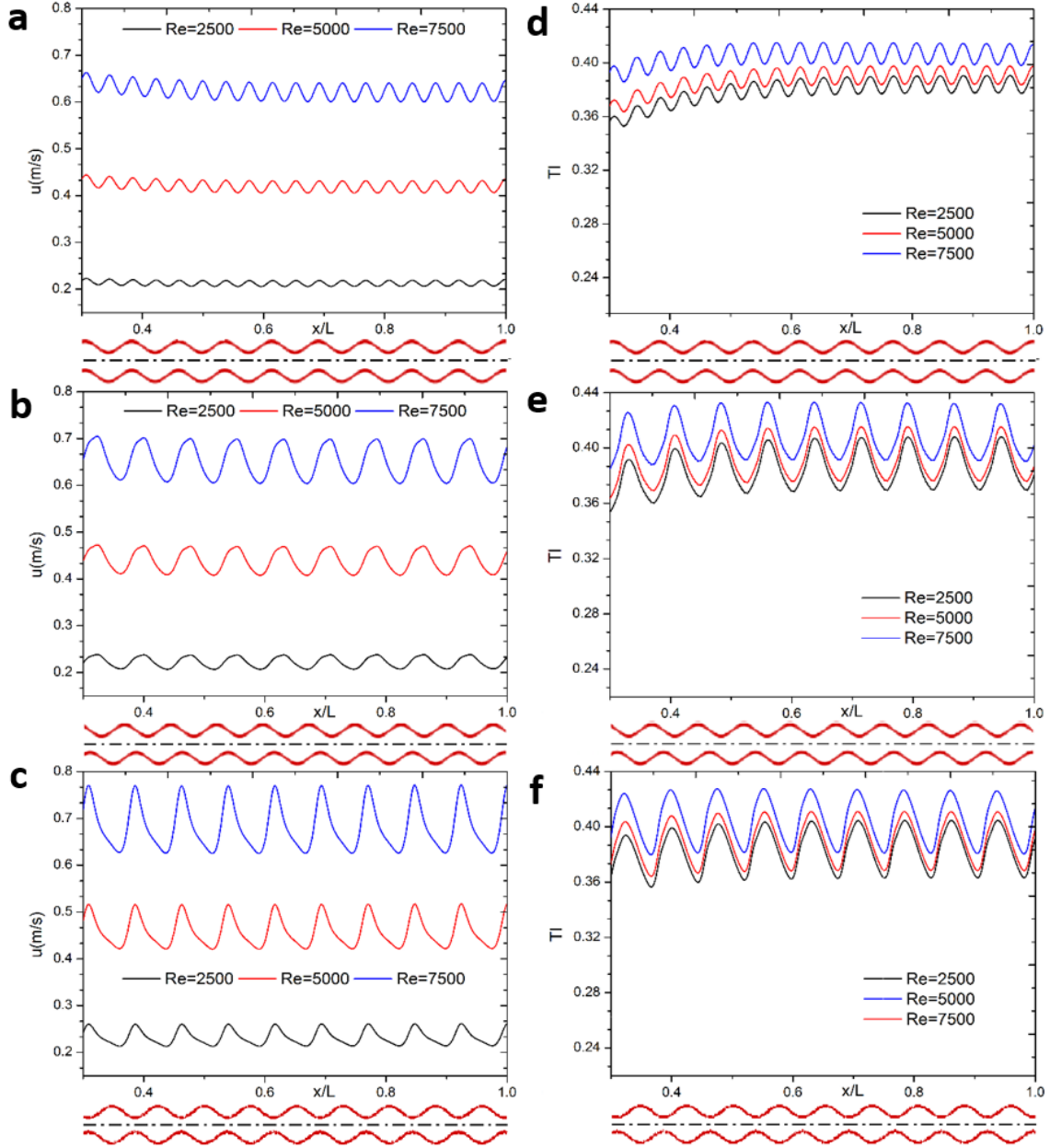


Figure 6. Distributions of streamwise velocities for phase shift angles, ϕ of a) 0° , b) 90° and c) 180° , and turbulence intensities along the channel axis for phase shift angles, ϕ of d) 0° , e) 90° and f) 180°

Figure 7 shows Nusselt number values along the straight channel for Reynolds numbers of 2500, 5000, and 7500. Nusselt number is maximum at the inlet and decreases slightly since the boundary

layer is thinnest at the inlet of the channel and its thickness increases with axial distance along the channel wall.

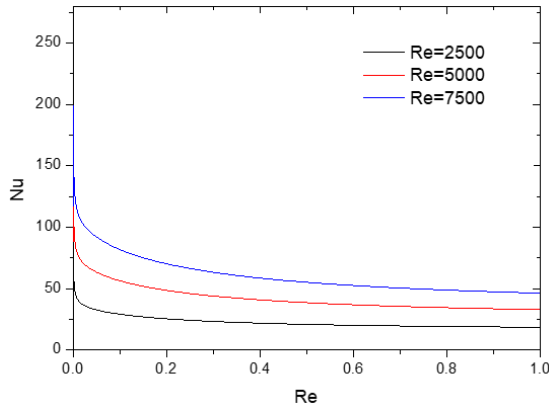


Figure 7. Variations of the local Nusselt numbers, along the lower wall of the straight channel

The variations of the local Nusselt number with Reynolds number along the lower wavy walls of

the corrugated channels with phase shift angles of 0° , 90° , and 180° are shown in Figure 8. The local Nusselt number in the converging section of each wave is higher than that in the diverging section since the channel becomes narrower over the throats resulting in a higher velocity gradient in the converging section, which increases the heat transfer ratio. Therefore, the peaks of the local Nusselt number are observed at the channel throats due to the sudden increase in velocity gradient. In addition, the local Nusselt number increases with the Reynolds number for all the phase shift angles. Although the local Nusselt number values change with Reynolds number, similar trends are observed for certain phase shift angles. Moreover, the Nusselt number of corrugated channels for all phase shift angles is higher than that of the straight channel at all the Reynolds numbers.

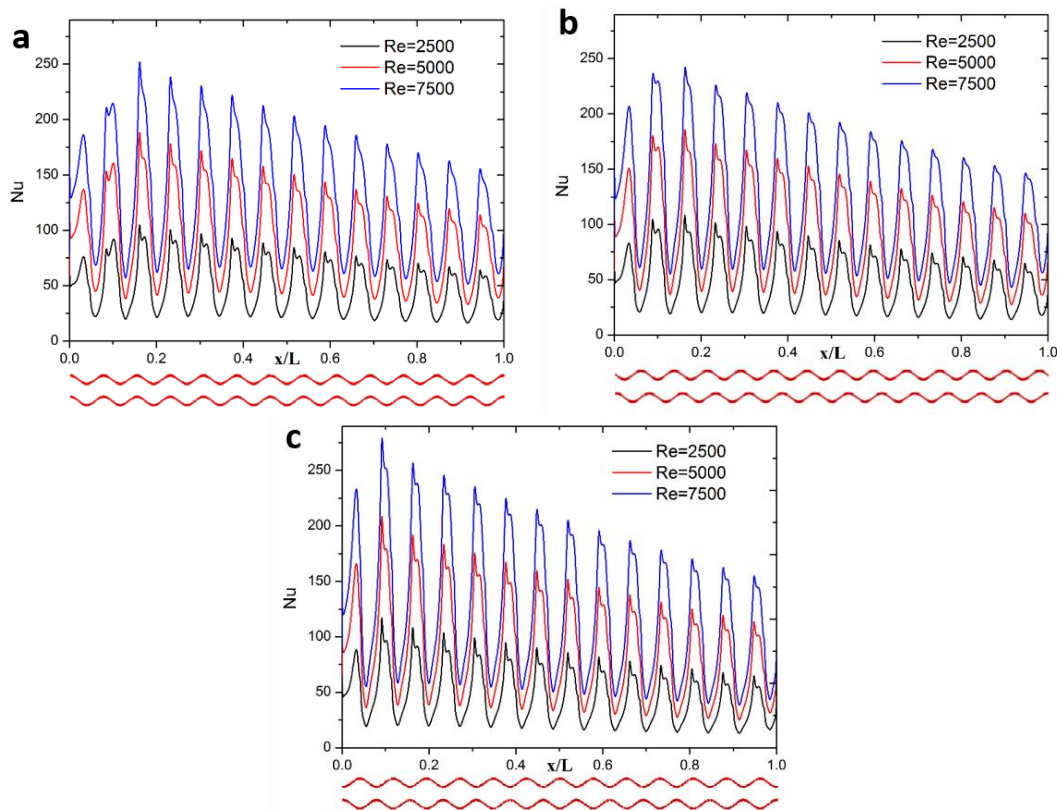


Figure 8. Variations of the local Nusselt numbers along the lower wavy walls for different phase shift angles, ϕ of the channel H_1 a) 0° , b) 90° and c) 180°

The averaged Nusselt numbers, \overline{Nu} as a function of Reynolds number for both corrugated channels ($\phi=0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$) and straight channel are presented in Figure 9a. Increasing Reynolds number increases the temperature gradients in the boundary layer region near walls, enhancing the average Nusselt number and the heat transfer from the wall. In addition, heat transfer enhancement due to using corrugated plates at a high Reynolds number is higher compared to the case of a low Reynolds number since the mixing of fluid in the corrugated channel improves with increasing

Reynolds number. Also, decreasing the phase shift angle causes a larger re-circulation region and higher swirl flows intensity in the corrugation trough which improves the averaged Nusselt number. Moreover, the averaged Nusselt number values of corrugated channels for all the phase shift angle configurations have a higher value than that of the straight channel case. It can be seen in Figure 9a, the channel with a 0° phase shift angle has the highest averaged Nusselt number at all the Reynolds numbers considered in this study.

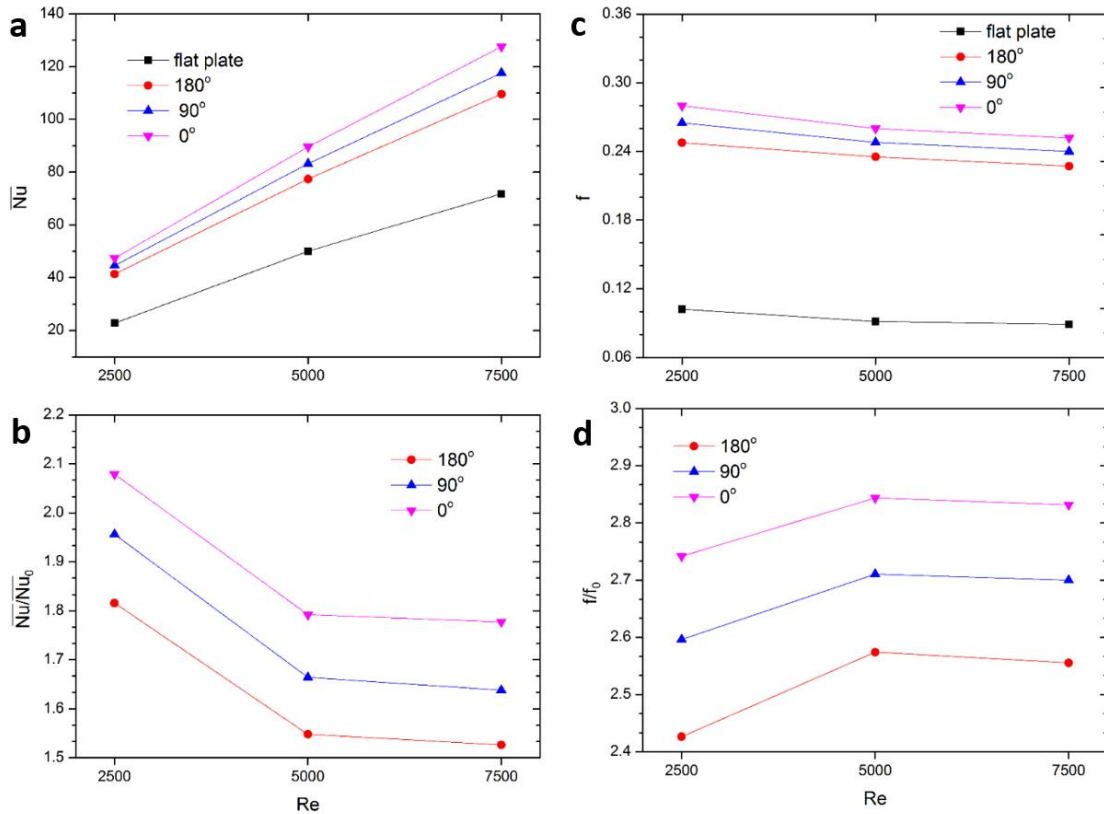


Figure 9. a) Variations of the averaged Nusselt numbers with Reynolds number for corrugated channels (H_1) and the flat plate, b) comparison of the averaged Nusselt numbers of corrugated channels with that of the flat plate, c) variations of the friction factors with Reynolds number for corrugated channels (H_1) and the flat plate, d) comparison of the friction factors of corrugated channels with that of the flat plate

The averaged Nusselt number in the corrugated channels enhances several folds, depending upon

the values of Reynolds number and phase shift angle for a given channel height. The heat transfer

rates in corrugated channels of 0° , 90° , and 180° phase shift angles are increased by a factor of 1.78, 1.64, and 1.53 compared to those of straight channel, respectively at the Reynolds number of 7500. On the other hand, the heat transfer enhancement rates increase up to 2.08, 1.96, and 1.82 for 0° , 90° , and 180° phase shift angles, respectively, at $Re=2500$ (Figure 9b).

Thermal transport is improved by increasing the rate of flow mixing which results in more pressure drops. The measured pressure drops among the simulated corrugated channels are used to predict the friction factors. The friction factor variations with Reynolds numbers for straight channel and corrugated channels ($H_{min}/H_{max}=0.36$) at different phase shift angles are shown in Figure 9c. The friction factor investigated through wavy channels is larger than that of the straight channel due to the suppression of the viscous sub-layer. In addition, the friction factor decreases with the increase of phase shift angle. It can be observed from Figure 9c that the friction factor decreases with increasing Reynolds numbers for straight channel and all the configurations of corrugated channels. For straight channel, an increase in Reynolds number results in decreasing the laminar sub-layer thickness which reduces the friction factor. Using corrugations causes to block fluid flow and increase the pressure drop, Δp along the channel. Although the pressure drop increases with increasing Reynolds number, the friction factor decreases with an increase in Reynolds number since the friction factor depends on $\Delta p/(\rho v^2)$ and it is inversely proportional with the square of the velocity. The friction factor values for phase shift angle of 0° is the highest among all configurations for all considered Reynolds numbers while the lowest values are observed for a phase shift angle of 180° . The lowest friction factor enhancement is observed at Reynolds number of 2500 for all the phase shifts. The friction factors in corrugated channels with 0° , 90° and 180° phase shift angles increase by a factor of 2.74, 2.59, and 2.43 compared to those of straight channel, respectively at Reynolds number of 2500 (Figure9d).

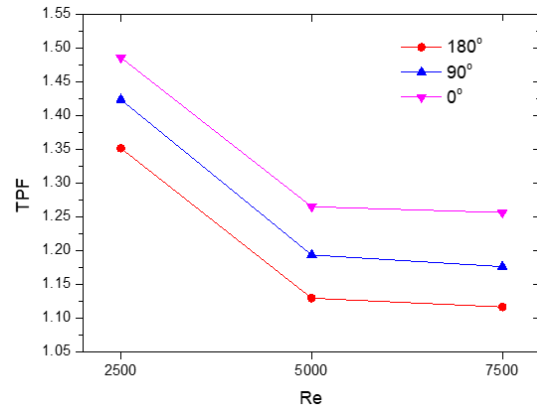


Figure 10. Variations of the thermal performance factors (TPF) with Reynolds number for a corrugated channel (H_1) with phase shifts 0° , 90° and 180°

Heat transfer enhancement in corrugated channels comes with additional frictional losses since corrugated channel disturbs the entire flow field. Therefore, it is necessary to evaluate the net enhancement obtained from using such channels. In this study, the relative thermal-hydraulic performance enhancement is evaluated by the thermal performance factor (TPF) expressed from equation 19.

The variations of the thermal performance factor (TPF) with the phase shift and Reynolds number are presented in Figure 10. A high value of TPF indicates good thermal-hydraulic performance. This Figure shows that TPF decreases with increasing Reynolds number. For the tested three regimes of Reynolds number ($Re=2500$, 5000 , and 7500), TPF decreases with increasing the phase shift angle. The highest TPF is observed for flow in a corrugated channel with a phase shift angle of 0° . The maximum TPF at the Reynolds number of 2500 for the phase shift angles 0° , 90° , and 180° are calculated as 1.48, 1.42, and 1.35, respectively. The channel of $\phi=0^\circ$ gives the best TPF at a low Reynolds number regime ($Re=2500$). Moreover, using corrugated channels at lower Reynolds numbers seems to be more efficient than at higher Reynolds numbers.

4. CONCLUSION

In the present study, numerical simulations have been performed to investigate the thermal-hydraulic characteristics of water flow in sinusoidal corrugated channels. The averaged Nusselt number, the friction factor, and the thermal performance factor (TPF) were calculated for different channel heights ($H_{\min}/H_{\max}=0.36, 0.54, 0.72$), phase shift angles ($\varphi=180^\circ, 90^\circ, 0^\circ$) over three flow regions ($Re=2500, 5000, \text{ and } 7500$). In steady flow, the large recirculation vortices in the upper and the lower waves isolated warmer fluid, which restrains mixing of the warmer fluid with cool fluid passing through the center of the channel. Therefore, the heat transfer does not enhance considerably in steady flow cases. As the Reynold number increases, the recirculation magnitude gets smaller and fresh fluid into the core region moves close to the wave furrows so that heat transfer enhances. Since the core flow is forced to follow the waves of the surrounding geometry in the channel with a phase shift angle of 0° , a higher rate of interactions occurs with recirculation. Hence, $\varphi=0^\circ$ is the case where significant mixing appears first among all shift angles investigated in this study. The main findings are summarized as follows; (i) Using a corrugated channel enhances heat transfer with an increase in friction factor. The average Nusselt number of sinusoidal corrugated channels enhances up to 2.08 folds, and the friction factor increases up to 2.74 times compared to the parallel plate channel depending on Reynolds number, phase shift angle, and height of the corrugated channel. (ii) The friction factor and Nusselt number increase with decreasing the phase shift angles and increasing Reynolds number for any channel heights considered. (iii) Among all configurations over the tested range of Reynolds numbers, the channel with $H_{\min}/H_{\max}=0.36$ and $\varphi=0^\circ$ at Reynolds number=2500 has the highest TPF.

5. REFERENCES

1. Akbarzadeh, M., Maghrebi, M.J., 2018. Combined Effects of Corrugated Walls and Porous Inserts on Performance Improvement in a Heat Exchanger Channel. *International Journal of Thermal Science*, 127, 266–276.
2. Akbarzadeh, M., Rashidi, S., Karimi, N., Omar, N., 2019. First and Second Laws of Thermodynamics Analysis of Nanofluid Flow Inside a Heat Exchanger Duct with Wavy Walls and a Porous Insert. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 135, 177-194.
3. Ahmed, M.A., Shuaib, N.H., Yusoff, M.Z. Al-Falahi, A.H., 2011. Numerical Investigations of Flow and Heat Transfer Enhancement in a Corrugated Channel Using Nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38, 1368–1375.
4. Ahmed, M.A., Shuaib, N.H., Yusoff, M.Z., 2012. Numerical Investigations on the Heat Transfer Enhancement in a Wavy Channel Using Nanofluid. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, 5891–5898.
5. Ozbolat, V., Sahin, B., 2013. Numerical Investigations of Heat Transfer Enhancement of Water-based Al_2O_3 Nanofluids in a Sinusoidal-wall Channel. *Heat Transfer and Thermal Engineering (American Society of Mechanical Engineers)* 8A, 1–6.
6. Tokgoz, N., Ozbolat, V., Sahin, B., 2016. Investigation of Heat Transfer Enhancement by Using Al_2O_3 /Water Nanofluid in Rectangular Corrugated Channel. *Kahramanmaraş Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences*, 19, 42–51.
7. Ajeel, R.K., Salim, W.S.-I.W., Hasnan, K., 2019. Thermal Performance Comparison of Various Corrugated Channels Using Nanofluid: Numerical Study. *Alexandria Engineering Journal*, 58, 75–87.
8. Jafari, M., Farhadi, M., Sedighi, K., 2015. Convection Heat Transfer of SWCNT-Nanofluid in a Corrugated Channel Under Pulsating Velocity Profile. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 67, 137–146.
9. Kurtulmuş, N., Sahin, B., 2020. Experimental Investigation of Pulsating Flow Structures and Heat Transfer Characteristics in Sinusoidal Channels. *International Journal of Mechanical Sciences*, 167, 105268.
10. Blythman, R., Persoons, T., Jeffers, N.,

- Murray, D.B., 2019. Heat Transfer of Laminar Pulsating Flow in a Rectangular Channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 128, 279–289.
11. Jafari, M., Farhadi, M., Sedighi, K., 2013. Pulsating Flow Effects on Convection Heat Transfer in a Corrugated Channel: A LBM approach. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 45, 146–154.
 12. Zhang, F., Bian, Y., Liu, Y., Pan, J., Yang, Y., Arima, H., 2019. Experimental and Numerical Analysis of Heat Transfer Enhancement and Flow Characteristics in Grooved Channel for Pulsatile Flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 141, 1168–1180.
 13. Ozbolat, V., Tokgoz, N., Sahin, B., 2013. Flow Characteristics and Heat Transfer Enhancement in 2D Corrugated Channels. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, 7, 539–543.
 14. Kurtulmuş, N., Zontul, H., Sahin, B., 2020. Heat Transfer and Flow Characteristics in a Sinusoidally Curved Converging-diverging Channel. *International Journal of Thermal Sciences*, 148, 106163.
 15. Rush, T.A., Newell, T.A., Jacobi, A.M., 1999. An Experimental Study of Flow and Heat Transfer in Sinusoidal Wavy Passages. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42, 1541–1553.
 16. Rashidi, S., Akbarzadeh, M., Masoodi, R., Languri, E.M., 2017. Thermal-hydraulic and Entropy Generation Analysis for Turbulent Flow Inside a Corrugated Channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 109, 812–823.
 17. Wang, G., Vanka, S., P., 1995. Convective Heat Transfer in Periodic Wavy Passages. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 38, 3219–3230.
 18. Tokgoz, N., Sahin, B., 2019. Experimental Studies of Flow Characteristics in Corrugated Ducts. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 104, 41–50.
 19. Tokgoz, N., Tunay, T., Sahin, B., 2018. Effect of Corrugated Channel Phase Shifts on Flow Structures and Heat Transfer Rate. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 99, 374–391.
 20. Tokgoz, N., Aksoy, M.M., Sahin, B., 2017. Investigation of Flow Characteristics and Heat Transfer Enhancement of Corrugated Duct Geometries. *Applied Thermal Engineering*, 118, 518–530.
 21. Paisarn, N., 2010. Study on the Heat-transfer Characteristics and Pressure Drop in Channels with Arc-shaped Wavy Plates. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 83, 1061–1069.
 22. Bahaidarah, H.M.S., 2007. A Numerical Study of Fluid Flow and Heat Transfer Characteristics in Channels with Staggered Wavy Walls. *Numerical Heat Transfer; Part A: Applications*, 51, 877–898.
 23. Bahaidarah, H.M., 2009. Fluid Flow and Heat Transfer Characteristics in Sharp Edge Wavy Channels with Horizontal Pitch. *Emirates Journal for Engineering Research*, 14, 53–63.
 24. Ahmed, M.A., Yusoff, M.Z., Shuaib, N.H., 2013. Effects of Geometrical Parameters on the Flow and Heat Transfer Characteristics in Trapezoidal-corrugated Channel Using Nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 42, 69–74.
 25. Oviedo-Tolentino, F., Romero-Méndez, R., Hernández-Guerrero, A., Girón-Palomares, B., 2008. Experimental Study of Fluid Flow in the Entrance of a Sinusoidal Channel. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 29, 1233–1239.
 26. Oviedo-Tolentino, F., Romero-Méndez, R., Hernández-Guerrero, A., Girón-Palomares, B., 2009. Use of Diverging or Converging Arrangement of Plates for the Control of Chaotic Mixing in Symmetric Sinusoidal Plate Channels. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33, 208–214.
 27. Tatsuo, N., Shinichiro, M., Shingho, A., Yuji K., 1990. Flow Observations and Mass Transfer Characteristics in Symmetrical Wavy-walled Channels at Moderate Reynolds Numbers for Steady Flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 33, 835–845.
 28. Nishimura, T., Ohori, Y., Kawamura, Y., 1984. Flow Characteristics in a Channel with Symmetric Wavy Wall for Steady Flow. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 17,

- 466–471.
29. Gradeck, M., Hoareau, B., Lebouché, M., 2005. Local Analysis of Heat Transfer Inside Corrugated Channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48, 1909–1915.
 30. Goldstein, L., Sparrow, E., M., 1977. Heat/Mass Transfer Characteristics for Flow in a Corrugated Wall Channel. *Journal of Heat Transfer*, 99, 187–195.
 31. O'Brien, J.E., Sparrow, E.M., 1982. Corrugated-duct Heat Transfer, Pressure Drop and Flow Visualization, *Journal of Heat Transfer*, 104, 410–416.
 32. Oyakawa, K., Shinzato, T., Mabuchi, I., 1989. The Effects of the Channel Width on Heat-transfer Augmentation in a Sinusoidal Wave Channel. *JSME International Journal*, 32, 403-410.
 33. Ramgadia, A.G., Saha, A.K., 2012. Fully Developed Flow and Heat Transfer Characteristics in a Wavy Passage: Effect of Amplitude of Waviness and Reynolds Number *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, 2494–2509.
 34. Hossain, M.Z., Islam, A.K.M.S., 2004. Fully Developed Flow Structures and Heat Transfer in Sine-shaped Wavy Channels. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 31, 887–896.
 35. Ozbolat, V., 2015. Flow Characteristics and Heat Transfer Enhancement of Sinusoidal Corrugated Channels. PhD Thesis, Cukurova University Institute of Natural and Applied Sciences, 143.
 36. Launder, B.E., Spalding, D.B., 1974. The Numerical Computation of Turbulent Flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3, 269–289.

Examination of the Physical Properties of Saturated and Dry Marbles via P-S Wave Velocity

Eshaq Ali MOHAMMADI*¹ ORCID 0000-0001-8815-372X
Özen KILIÇ² ORCID 0000-0002-8398-0897

¹Jawzjan University, Faculty of Geology and Mining, Department of Mining Engineering, Sheberghan, Afghanistan

²Çukurova University, Faculty of Engineering, Department of Mining Engineering, Adana

Geliş tarihi: 18.01.2022

Kabul tarihi: 21.03.2022

Atıf şekli/ How to cite: MOHAMMADI, E.A., KILIÇ, Ö., (2022). Examination of the Physical Properties of Saturated and Dry Marbles via P-S Wave Velocity. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37(1), 109-117.

Abstract

In this study, ten marble samples collected from different regions of Turkey were tested in the laboratory in terms of physical properties and P-S wave velocity. The destructive method used to determine the physical properties of marbles is time-consuming, can only be tested in the laboratory, and high cost of equipment. For this reason, in order to obtain an easy to apply method, not expensive and time consuming, the relationship between saturated and dry P-S wave velocity and physical properties was investigated by regression analysis. Results of regression analyses showed satisfactory correlations.

Keywords: Marble, Physical properties, P and S wave velocity

P-S Dalga Hızı ile Doymun ve Kuru Mermerlerin Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi

Öz

Bu çalışmada, Türkiye'nin farklı bölgelerinden alınan 10 farklı mermer örneği fiziksel özellikleri ve P-S dalga hızının belirlenmesi amacıyla laboratuarda deneylere tabi tutulmuştur. Fiziksel özellikleri belirlemede kullanılan deneyler zaman alıcıdır, sadece laboratuvar ortamında gerçekleştirilir ve oldukça maliyetlidir. Bu nedenle, daha kolay, ucuz ve daha az zaman alan bir yöntem elde etmek amacı ile doymun ve kuru örneklerde P-S dalga hızı ve fiziksel özellikler arasındaki ilişki regresyon analizleri ile incelenmiştir. Regresyon analizlerinin sonuçları tatmin edici korelasyonlar göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Mermer, Fiziksel özellikler, P ve S dalga hızı

* Corresponding author (Sorumlu yazar): Eshaq Ali MOHAMMADI, eshaqmohammadi@yahoo.com

1. INTRODUCTION

In designing underground and surface construction projects such as tunnels, caves, stone columns, dams and etc. it is extremely important to know the physical and mechanical properties of stones. Usually, the physical properties of rocks are determined by destructive and non-destructive methods. In the destructive method, the samples are first brought to the laboratory from the area, and after cutting to appropriate sizes, the test operation is performed. This is a long, uneconomical, and time-consuming process. The non-destructive method is based on the P and S wave velocities. P and S waves velocity is mostly used as an alternative method. Some factors affect on the speed of P and S wave such as rock type, fracture, crack, grain size and shape, porosity, water absorption, clay content, degree of erosion, texture, confining pressure, and temperature. and some mechanical properties of the rocks.

The P and S wave velocity is widely used in various sectors. In the mining is used to determine the physicommechanical properties of rocks [1], the quality of blocks [2], blast efficiency [3], blast system design [4], damage assessment of supporting pillars in an underground cave [5]. In the construction is used to evaluate the stability of walls, columns, and concrete [6]. In tunneling, is used for the reliability assessment of tunnel [7].

A number of researchers such as; Leucci and Leucci, De Giorgi [8], Khandelwal and Ranjith [9], Khandelwal and Singh [10], Moradian and Behnia [11], Kurtuluş and Çakır [12], Kurtuluş et al. [13], Karaman et al. [14], Karaman and Kesimal [15], Babacan et al. [16], Uyanık et al. [17], Boulanouar et al. [18], Karakul et al. [19], Ozdemir and Sarıcı [20], Sakcalı et al. [21], Celik [22], Kahraman et al. [23], have studied the relationship between P-wave velocity and physicommechanical properties of natural rocks. As a result, they have found equations with a high correlation coefficient.

In this study, in order to easily estimate the physical properties of marble, the relationship between saturated and dry P-S wave velocity has

been investigated. As a result, equations with high correlation coefficients are found.

2. MATERIAL AND METHOD

2.1. Material

In this research, ten different types of marble specimens have been collected from different parts of Turkey. The trade name, location, and properties of the marble specimens are described in Table 1.

2.2. Determination of Physical Properties

In order to determine the physical properties such as saturated unit volume weight (U_s), dry unit volume weight (U_d), water absorption by weight (w_w), and porosity (n'). The test was performed according to the TSE (Turkish Standards Institute) [24]. Firstly the samples were cut into cubes with dimensions of $4 \times 4 \times 4$ and $5 \times 5 \times 5$ cm³ as Figure 1. The samples are immersed in distilled water for 48 hours until completely wet and also they are dried in an oven set at (105 ± 5) °C for 24 hours until reach a constant weight. The results of the physical properties test are given in Table 3.

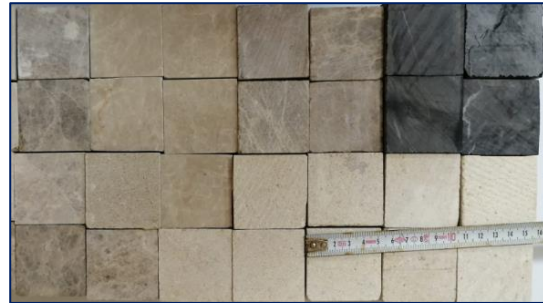


Figure 1. Specimens prepared for testing

2.3. P and S Wave Velocity

The P-wave (primary or pressure) and S-wave (secondary or shear) velocity method is a non-destructive method that is measured by Proceq Inc as shown in Figure 2. This device consists of two transducers (a transmitter and a receiver), and a time display screen. The frequency of transducers are 54 kHz for P-wave and 150 kHz for S-wave.

Samples are prepared in the form of cubes with smooth surfaces. In order to ensure complete contact between the sample surface and the converters, their surfaces are lubricated with grease. Samples that wet in water for 48 hours and dried at 24 hours in an oven set at (105 ± 5) °C are tested in terms of saturated and dry P-wave velocity (V_{ps} , V_{pd}), saturated and dry S-wave velocity (V_{ss} , V_{sd}). The velocity of P and S-wave

is obtained by Equation 1. Results are given in Table 2.

$$V = \frac{L}{t} \quad (1)$$

Where; V is the velocity (km/s), L is the traveling distance (cm) and t is the traveling time (second).



Figure 2. Ultrasonic waves tester

Table 1. The trade names, locations and properties the marble specimens

No	Trade Names	Locations	Properties
1	Marble	İskenderun/Hatay	It has cracks, its color is often black with white lines.
2	Emperador	Center/Adiyaman	It hasn't cracks, its color is often light brown.
3	Emperador	Silifke/Mersin	It hasn't cracks, its color is often light brown with white lines
4	Crema	Erdemli/Mersin	It hasn't cracks, its color is often yellowish-white with brown lines.
5	Crema	Pozanti/Adana	It has cracks, and breaks easily, its color is yellowish-white
6	Marble	Yunak/Konya	It hasn't cracks. Its color is often gray with white lines
7	Marble	Center/Karaman	It hasn't and cracks. Its color is gray.
8	Marble	Sogut/Bilecik	It hasn't cracks. Its color is gray.
9	Marble	Center/Sivas	It hasn't cracks. Its color is gray.
10	Limestone	Hani/Diyarbakır	It has a little apparent porosity but no crack. Its color is often yellowish-white

Table 3. The average amount of physical properties of marble obtained as a result of the experiment

Rock type	U_s (g/cm ³)	U_d (g/cm ³)	w_w (%)	n' (%)	V_{ps} (km/s)	V_{pd} (km/s)	V_{s_s} (km/s)	V_{s_d} (km/s)
Marble	2.734	2.731	0.155	0.462	6.048	6.015	3.828	3.808
Emperador	2.691	2.673	0.650	1.740	6.112	6.077	3.893	3.871
Emperador	2.705	2.690	0.555	1.664	6.234	6.105	3.996	3.913
Crema	2.704	2.694	0.124	0.217	6.454	6.371	4.246	4.191
Crema	2.635	2.600	0.653	0.965	5.206	5.134	3.295	3.249
Marble	2.665	2.622	0.524	0.926	5.394	5.337	3.414	3.378
Marble	2.656	2.656	0.476	0.895	5.573	5.466	3.527	3.459
Marble	2.666	2.664	0.346	0.654	5.769	5.716	3.651	3.595
Marble	2.695	2.688	0.260	0.684	6.483	6.407	4.210	4.161
Limstone	2.621	2.557	2.543	6.434	4.613	3.945	2.920	2.497

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

The relationship between physical properties with saturated and dry P-S wave velocity has been investigated by various simple regression models such as linear, logarithmic, quadratic, cubic, power, and exponential. The models are compared with each other in terms of mean square errors (MS) and correlation coefficients (R^2). The model with the least means square error and the highest correlation coefficient has been selected as the appropriate model.

The exponential model has been found for the relationship between (U_s) with (V_{ps}), (V_{pd}), and (V_{s_d}) by high correlations such as ($R^2= 0.749$), ($R^2= 0.71$) and ($R^2= 0.697$) Figure 3-5, and also for the relationship between (U_d) with (V_{pd}), the exponential model with a high correlation ($R^2= 0.834$) has been received Figure 6. The equations of these relations are given below:

$$U_s = 2.391 \times e^{0.02 \times V_{ps}} \quad (2)$$

$$U_s = 2.457 \times e^{0.015 \times V_{pd}} \quad (3)$$

$$U_s = 2.47 \times e^{0.022 \times V_{s_d}} \quad (4)$$

$$U_d = 2.314 \times e^{0.0225 \times V_{pd}} \quad (5)$$

For the relationship between (U_s) with (V_{s_s}), the power model with high correlation ($R^2= 0.716$) has been received in Figure 7. The equation of relation is as given below.

$$U_s = 2.359 \times V_{s_s}^{0.098} \quad (6)$$

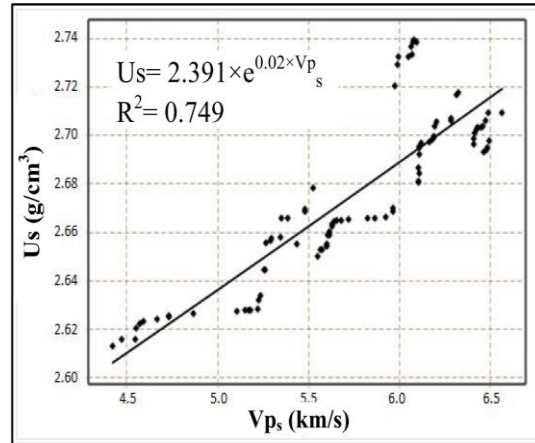


Figure 3. Graph of relationship between U_s and V_{ps}

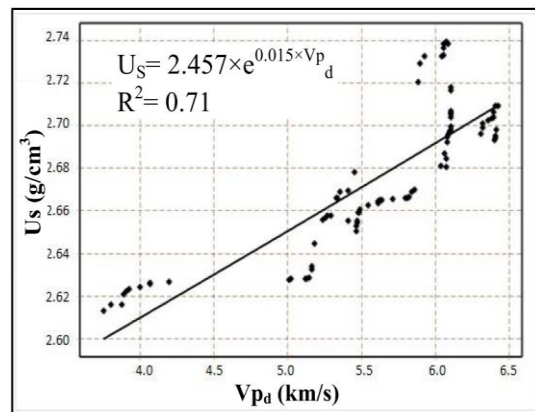


Figure 4. Graph of relationship between U_s and V_{pd}

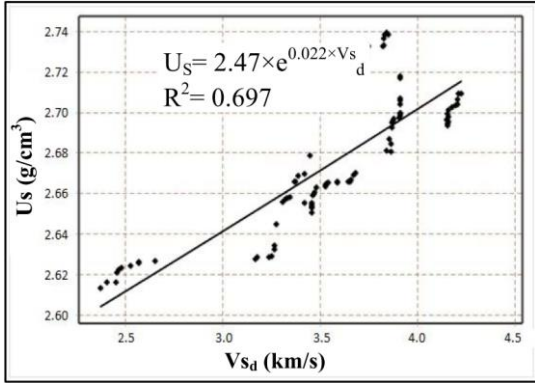


Figure 5. Graph of relationship between U_s and V_{S_d}

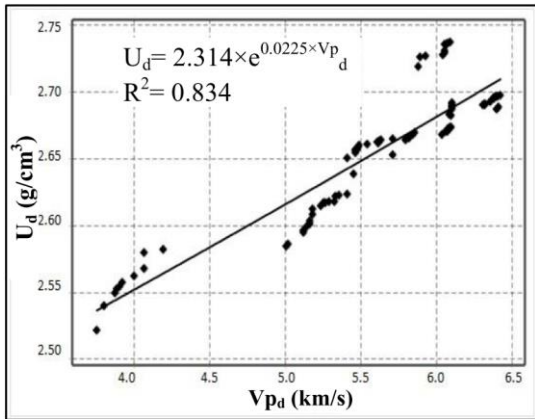


Figure 6. Graph of relationship between U_s and V_{P_d}

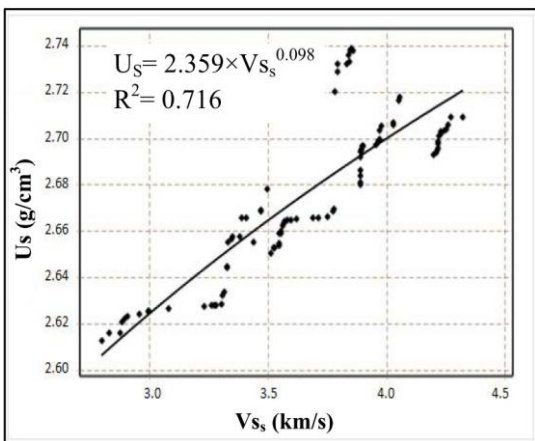


Figure 7. Graph of relationship between U_s and V_{S_s}

The power model has been found for the relationship between (U_d) with (V_{P_s}), (V_{S_s}), and (V_{S_d}) with high correlations such as ($R^2= 0.84$), ($R^2= 0.80$) and ($R^2= 0.80$) Figure 8-10., and also for the relationship between (n') with (V_{P_s}), (V_{P_d}), (V_{S_s}), and (V_{S_d}), the power model with middle correlations such as ($R^2= 0.458$), ($R^2= 0.544$), ($R^2= 0.467$), and ($R^2= 0.553$), has been received in Figure 11-14. The equations of these relations are given below:

$$U_d = 1.97 \times V_{P_s}^{0.017_d} \quad (7)$$

$$U_d = 2.314 \times V_{S_s}^{0.153} \quad (8)$$

$$U_d = 2.314 \times V_{S_d}^{0.0116} \quad (9)$$

$$n' = 24474.087 \times V_{P_s}^{-5.8} \quad (10)$$

$$n' = 48258.6 \times V_{S_s}^{-8.45} \quad (11)$$

$$n' = 2980.57 \times V_{P_d}^{-4.67} \quad (12)$$

$$n' = 288.88 \times V_{S_d}^{-4.5} \quad (13)$$

There are quadratic model for the relationship between (w_w) with (V_{P_s}), (V_{P_d}), (V_{S_s}) and (V_{S_d}) with very high correlations such as ($R^2= 0.866$), ($R^2= 0.932$), (0.935) and ($R^2= 0.938$) Figure 15-18. The equations of these relations are given below:

$$w_w = 37.7 - 12.4 \times V_{P_s} + 1.03 \times V_{P_s}^2 \quad (14)$$

$$w_w = 18 - 5.8 \times V_{P_d} + 0.47 \times V_{P_d}^2 \quad (15)$$

$$w_w = 31.8 - 16.1 \times V_{S_s} + 2.06 \times V_{S_s}^2 \quad (16)$$

$$w_w = 16.7 - 8.4 \times V_{S_d} + 1.07 \times V_{S_d}^2 \quad (17)$$

The Saturated and dry P-S wave velocity as independent variables and physical parameters as dependent variables were examined by multiple

regression analysis. As a result of the analysis, the equations obtained have high correlations such that for saturated unit volume weight ($R^2= 8188$), for

dry unit volume weight ($R^2= 0.8908$), for porosity ($R^2= 0.9135$), and for water absorption ($R^2= 0.9311$).

$$U_s = 2.2 + 0.8 \times Vp_s - 0.58 \times Vp_d - 1.1 \times Vs_s + 0.8 \times Vs_d \quad (18)$$

$$U_d = 2 + 0.5 \times Vp_s - 0.18 \times Vp_d - 0.6 \times Vs_s + 0.26 \times Vs_d \quad (19)$$

$$W_w = 1.8 + 6.2 \times Vp_s - 5.9 \times Vp_d - 5.8 \times Vs_s + 4.86 \times Vs_d \quad (20)$$

$$n' = -0.4 + 22.9 \times Vp_s - 19 \times Vp_d - 22 \times Vs_s + 16 \times Vs_d \quad (21)$$

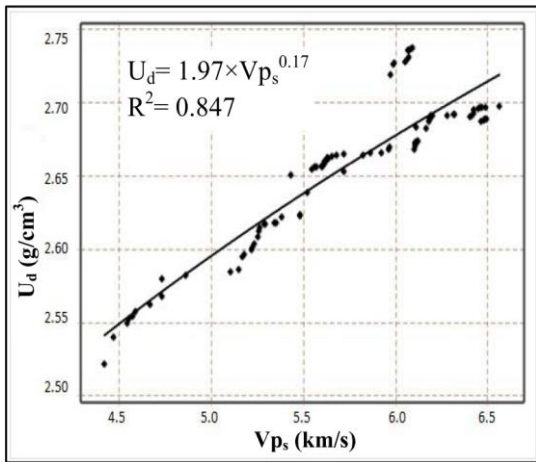


Figure 8. Graph of the relationship between U_d and Vp_s

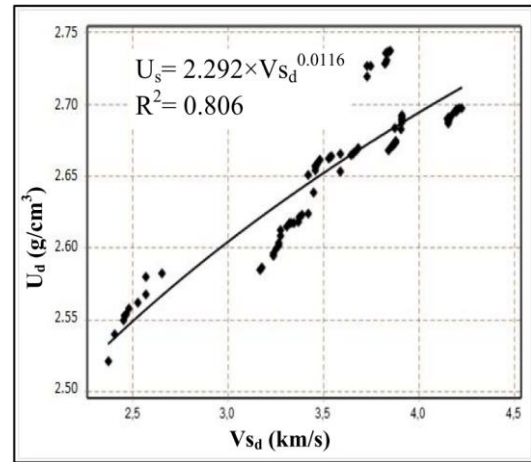


Figure 10. Graph of the relationship between U_s and Vs_d

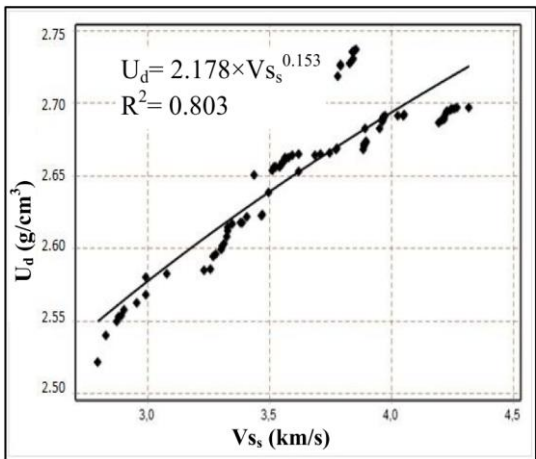


Figure 9. Graph of the relationship between U_d and Vs_s

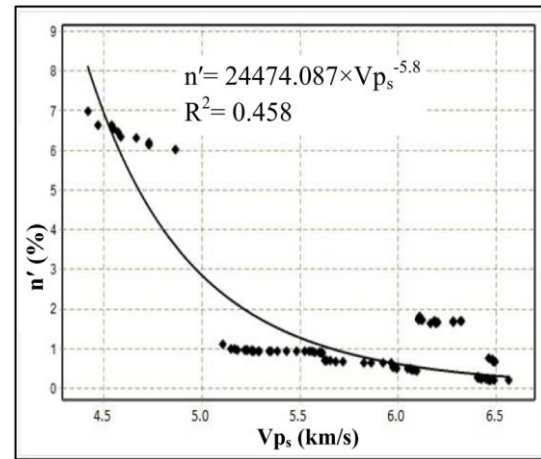


Figure 11. Graph of the relationship between (n') and Vp_s

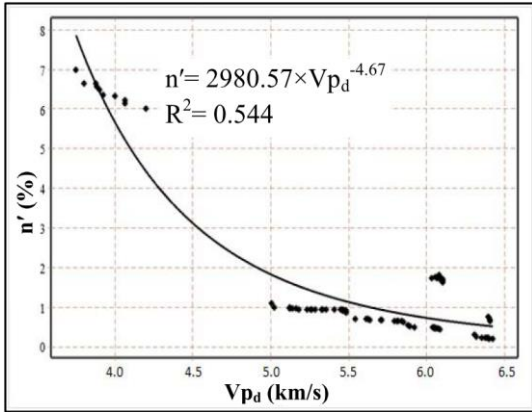


Figure 12. Graph of the relationship between (n') and V_{pd}

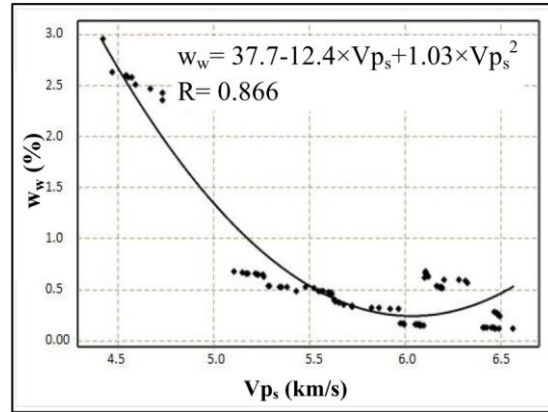


Figure 15. Graph of the relationship between w_w and V_{ps}

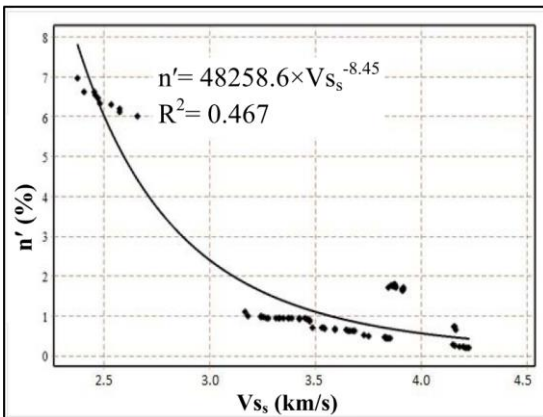


Figure 13. Graph of the relationship between (n') and V_{ss}

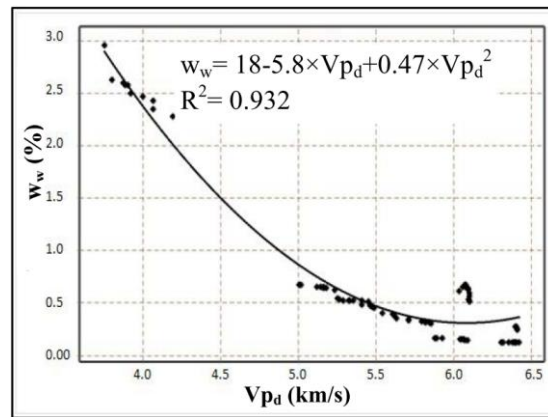


Figure 16. Graph of the relationship between w_w and V_{pd}

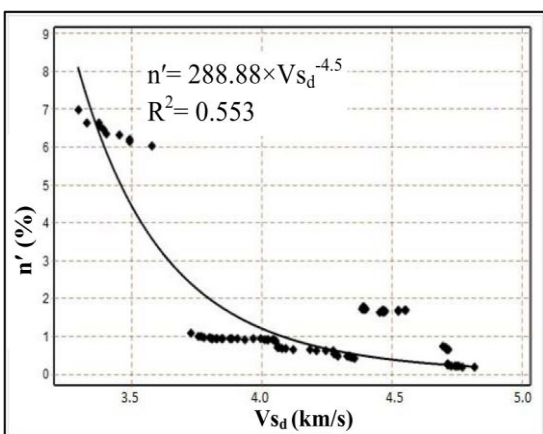


Figure 14. Graph of the relationship between (n') and V_{sd}

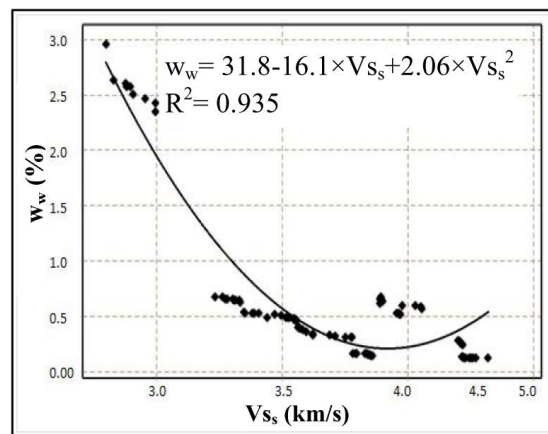


Figure 17. Graph of the relationship between w_w and V_{ss}

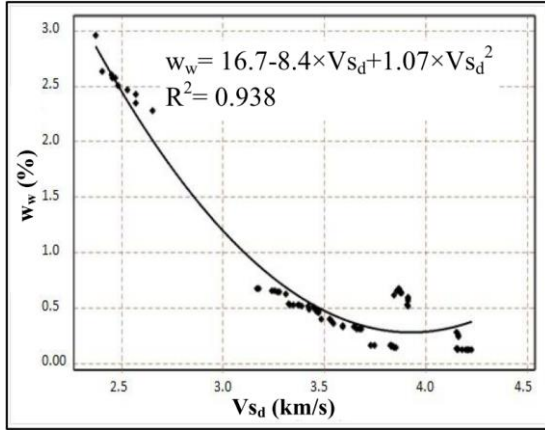


Figure 18. Graph of the relationship between w_w and V_{s_d}

4. CONCLUSIONS

As a result, among the samples, Diyarbakir limestone has the most water absorption and porosity, which does not adapt to the standard of TSE-1469. The relationship between the saturated and dry P-S wave velocity with saturated and dry unit volume weight is direct but inverse with porosity and water absorption. The equations obtained as a result of simple and multiple regression analysis have a high correlation coefficient and a lower mean square error that can be used in practice. The equations obtained as a result of multiple analyses have the lowest mean square error than simple regression, so its use is recommended if possible.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

We thank the officials of Imgi International Marble and Granit, Fimar Marble, Tecmoron Marble, and Arimar Marble companies who helped in preparing the samples of this research. Also, we thank the Head of Department of Mining Engineering for providing us the equipment of laboratory.

6. REFERENCES

1. Kilic, O., Kahraman, E., Kilic, A. M., 2018. Examination of the Relationship between P

Wave Velocity and Physico-mechanical Properties of Limestone Marbles. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Cukurova University, 33(2), 9-16.

2. Kilic, A.M., Kahraman, E., Kilic, Ö., 2017. The Use of Ultrasonic Measurements Determining the Quality of the Dimension Stone Blocks. Int J Nat Eng Sci, 11, 28-33.
3. Kahraman, E., Kilic, A.M., 2020. Evaluation of Empirical Approaches in Estimating Mean Particle Size After Blasting by Using Nondestructive Methods. Arabian Journal of Geosciences, 13(14), 1-8.
4. Talhi, K., Bensaker, B., 2003. Design of a Model Blasting System to Measure Peak P-wave Stress. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 23, 513-519.
5. Carrier, A., Bottelin, P., Fabre, L., Mathy, A., 2022. Damage Assessment of Supporting Pillars in an Underground Cave Using Joint Inversion of Electrical Resistivity and P-wave Velocity. Pure Appl. Geophys, 179, 45-67.
6. Naji, S., Khayat, K.H., Karray, M., 2016. Assessment of Static Stability of Concrete Using Shear Wave Velocity Approach. ACI Materials Journal, 114(1), 105-115.
7. Zhou, X.P., Huang, X.C., Li, J.X., 2018. Reliability Assessment of Tunnel Based on P-wave Seismic Velocity. International Journal of Geomechanics, 18(11), 06018030.
8. Leucci, G., De Giorgi, L., 2006. Experimental Studies on the Effects of Fracture on the P and S Wavevelocity Propagation in Sedimentary Rock (Calcarenite del Salento). Engineering Geology, 84(3-4), 130-142.
9. Khandelwal, M., 2010. Ranjith, P. G., 2010. Correlating Index Properties of Rocks with P-wave Measurements. Journal of Applied Geophysics, 71(1), 1-5.
10. Khandelwal, M., Singh, T.N., 2009. Correlating Static Properties of Coal Measures Rocks with P-wave Velocity, International Journal of Coal Geology, 79(1-2), 55-60.
11. Moradian, Z.A., Behnia, M., 2009. Predicting the Uniaxial Compressive Strength and Static Young's Modulus of Intact Sedimentary Rocks Using the Ultrasonic Test. Int. J. Geomech., 9(1), 14-19.

12. Kurtuluş, C., Çakır. Ş., 2009. The Definition of Physical Properties of İzmit Formation (Low Triassic) Sandstones with P-wave Velocity, *Journal of Applied Earthsciences*, 8(1), 18 – 24 (in Turkish).
13. Kurtuluş, C., Yazan, K., Üçkardeş, M., Turan, O.K., 2010. Examination of Variation of Seismic P-Velocity with the Joint Density in Rocks, *Journal of Applied Earthsciences*, 2, 10-18 (in Turkish).
14. Karaman, K., Kesimal, K., 2013. Evaluation of the Relationship between Uniaxial Compressive Strength and Ultrasonic Pulse Velocity of Rocks. *Journal of Underground Resources*. 4, 9-17.
15. Karaman, K., Kesimal, K., 2013. Evaluation of the Relationship Between Uniaxial Compressive Strength and Ultrasonic Pulse Velocity of Rocks. *Journal of Underground Resources*.
16. Babacan, A.E., Ersoy, H., Gelişli, K., 2010. Determination of Physical, Mechanical and Elastic Properties of the Rocks with Ultrasonic Velocity Technique and Time-frequency Analysis: A Case Study on the Beige Limestones (NE Turkey). *Journal of Geological Engineering*, 36(1), 63-73.
17. Uyanık, O., Cathıoglu, B., Sabbag, N., Oncu, Z., Uyanık, N. A., 2012. Relationships Between Seismic Ultrasonic Velocities and Physical Properties of Rocks. 1st Earth Sciences Symposium Süleyman.
18. Boulanouar, A., Rahmouni, A., Boukalouch, M., Samaouali, A., Géraud, Y., Harnafi, M., Sebbani, J., 2013. Determination of Thermal Conductivity and Porosity of Building Stone from Ultrasonic Velocity Measurements. *Geomaterials*, 03(04), 138-144.
19. Karakul, H., Ulusay, R., 2013. Empirical Correlations for Predicting Strength Properties of Rocks from P-wave Velocity Under Different Degrees of Saturation. *Rock Mech Rock Eng.*, 46, 981–999.
20. Ozdemir, E., Sarıcı, E.D., 2015. Investigation of Relationship between Ultrasonic Wave Velocity and Mechanical Properties of Rocks at Different Water Saturation Degree. 9th Proceedings of International Industrial Minerals Symposium, 14-15 Mayıs 2015, 543-552, İzmir, Türkiye.
21. Sakcalı, A., Yavuz, H., Shahin, S., 2015. Analysis of Plate Efficiency by Ultrasonic Measurement on Marble, Beige and Travertine Blocks. 24th International Mining Congress and Exhibition, 14-1. Antalya, Turkey.
22. Celik, M.Y., 2017. The Relationship of Physico-mechanical Properties with Ultrasonic Wave Velocity of Afyonkarahisar Tuffs, *Journal of Polytechnic*, 20(4), 961-970.
23. Kahraman, S., Fener, M., Kilic, C.O., 2017. Estimating the Wet-rock P-wave Velocity from the Dry-rock P-wave Velocity for Pyroclastic Rocks. *Pure Appl Geophys*, 174(7), 2621-2629.
24. TS 699, 2009. Natural Building Blocks- Examination and Laboratory Test Methods. TSE, Ankara.

A Content-Based Product Recommendation Approach

Yıldıran BİTİRİM*¹ ORCID 0000-0002-1780-2806

¹Eastern Mediterranean University, Faculty of Engineering, Computer Engineering
Department, Famagusta, North Cyprus

Geliş tarihi: 21.01.2022

Kabul tarihi: 21.03.2022

Atıf şekli/ How to cite: BİTİRİM, Y., (2022). A Content-Based Product Recommendation Approach. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37(1), 119-128.

Abstract

In this study, a content-based recommendation approach is proposed. It utilizes the preprocessed 245 top movie summaries of IMDB and the favorite movie genres of the user elicited with the questionnaire method and then, recommends potential products -from a product pool- that the user can “like”. For testing; a test dataset that consists of real products from Amazon.com was created, and a Web application that uses the proposed approach and leads the users to evaluate the results of this approach was designed and developed. 52 volunteered subjects attended the test. The subject examined and graded each of the 10 products displayed. Grading was based on the five-level Likert-type scale “Not at all” (0%), “Slightly” (25%), “Moderate” (50%), “Very” (75%), and “Extremely” (100%). It is possible to say that the subjects are moderately liked the products. When the product evaluations are categorized in two categories as “liked” and “disliked”, it is possible to say that the subjects liked ~78.65% of the products. This approach could be integrated into e-commerce applications like Amazon.com for recommending potential products that the user can “like”.

Keywords: Recommendation systems, Content-based, Text mining, Information filtering, Information retrieval, E-commerce

Bir İçerik-Tabanlı Ürün Öneri Yaklaşımı

Öz

Bu çalışmada, bir içerik-tabanlı öneri yaklaşımı önerilmektedir. Bu yaklaşım, IMDB'nin ön işlenmiş 245 en iyi film özetlerini ve anket yöntemiyle ortaya çıkan kullanıcının favori film türlerini kullanmakta ve daha sonra, -bir ürün havuzundan- kullanıcının “beğenebileceği” potansiyelde ürünleri önermektedir. Test için; Amazon.com'dan gerçek ürünleri içeren bir test veri seti yaratılmıştır, ve önerilen yaklaşımı kullanan ve kullanıcıları bu yaklaşımın sonuçlarını değerlendirmek için yönlendiren bir Web uygulaması tasarlanıp geliştirilmiştir. 52 gönüllü denek teste katılmıştır. Denek, görüntülenen 10 ürünün her birini ayrı ayrı incelemiş ve derecelendirmiştir. Derecelendirme, “Hiç” (%0), “Biraz” (%25), “Orta” (%50),

* Corresponding author (Sorumlu yazar): Yıldıran BİTİRİM, yiltan.bitirim@emu.edu.tr

“Çok” (%75) ve “Son derece” (%100) olarak beş-seviyeli Likert-türü ölçüye dayalı yapılmıştır. Deneklerin ürünleri orta derecede beğendiğini söylemek mümkündür. Ürün değerlendirmeleri “beğenilen” ve “beğenilmeyen” olarak iki kategoride kategorize edildiğinde, deneklerin ürünlerin yaklaşık %78,65’ini beğendiğini söylemek mümkündür. Bu yaklaşım, kullanıcının “beğenebileceği” potansiyelde ürünler önermek için Amazon.com gibi e-ticaret uygulamalarına entegre olabilir.

Anahtar Kelimeler: Öneri sistemleri, İçerik-tabanlı, Metin madenciliği, Bilgi filtreleme, Bilgi erişim, E-ticaret

1. INTRODUCTION

E-commerce applications like Amazon.com make recommendations to users from the database in order to help them to reach relevant products. However, both the academics and the companies work to improve this mechanism. Furthermore, each of these e-commerce applications contains lots of products and these products are described by people in the way that the information such as “title” and “about” could be entered with a not-well-definition. Hence, it is believed that working to “let these e-commerce applications to find out relevant products for a user from the database and then recommend them to the user” is necessary.

Recommendation systems guide the users to the items that might be of their interest [1]. The service providers as well as the users get benefit of recommendation systems [2]. Recommendation systems have been studied in various areas such as news (e.g., [3-5]), job (e.g., [6,7]), movie (e.g., [8-10]), publication (e.g., [11,12]), and music (e.g., [13,14]). Recommendation systems can be roughly categorized as content-based, collaborative filtering, knowledge-based, and hybrid [8]. Content-based recommendation systems are one of the most successful recommendation systems [1]. They use content to build a model for recommendation [15]. They describe the items that may be recommended, create a profile of the user that describes the types of items the user likes, and compare items to the user profile to determine what to recommend [16].

“An e-commerce recommendation system learns from a customer and recommends products that the customer will find most valuable among the available products” [17]. Various studies have

been done on e-commerce recommendation systems such as [18-23].

In this study, we propose a content-based recommendation approach which utilizes the preprocessed 245 top movie summaries of IMDB and the favorite movie genres of the user elicited with the questionnaire method and then, recommends potential products -from a product pool- that the user can “like”. In the approach: “Like” is considered instead of “interest” since “interest” is for the things that the user is looking for himself or someone else but “like” is for the things that are only for the user; “user profile” is a group of the movie summaries which are decided based on the favorite movie genres elicited with the questionnaire method (the one-time explicit user feedback method); and furthermore, a score for every product is calculated based on the user profile and the product definition, and the first n products are given to the user. Our approach could be integrated into e-commerce applications like Amazon.com. The approach produces a list of potential products that the user can “like”, in order to use for recommendation. In the list, the products are ordered based on priority. This gives opportunity to decide display order of the products; besides, makes possible to get the potential product that the user can “like” most for using in the similar logic with “I’m Feeling Lucky” button of Google. In addition, this approach supports various product pools.

The rest of this paper is structured as follows: Section 2 describes the proposed approach; section 3 explains the methodology for testing the approach; the next section gives results of the test and discussion; and conclusion in brief and future work are given in the last section.

2. PROPOSED APPROACH

2.1. Main Dataset

First of all, “Top 1000” movies with user rating between 5.0 and 10 for the 19 years (release date: 01/01/2000-31/12/2018) were searched on “Advanced Title Search” of IMDb.com for each of 26 genres (shown on the search page) on 24/10/2018 and the movies in details were collected per genre. Note that no result returned from 6 genres. Afterwards, the author formed another collection by filtering the collected movies which have release date after 01/01/2009. This filtered collection consists of 20 genres and each genre has the corresponding movies in details. The genres and number of movies per genre are shown in Figure 1. There are total 797 movies; however, indeed there are 245 unique movies. Every unique

movie is included by 1-7 genres. Almost all unique movies are included in more than one genre.

While searching movies per genre on “Advanced Title Search” of IMDb.com, all genres of each movie are given in the search results but, for the movies that have more than three genres, only three genres are given for each. For the movies with more than three genres, only three genres are also displayed on top of their individual movie pages in IMDb.com. All genres of this type of movies are always given in their individual movie pages’ details. For the movies with three or less genres, all genres are seen in the search results, on top of their individual movie pages, and in their individual movie pages’ details. This situation did not affect our study since the searches were done based on the genres and the movies in details were collected per genre.

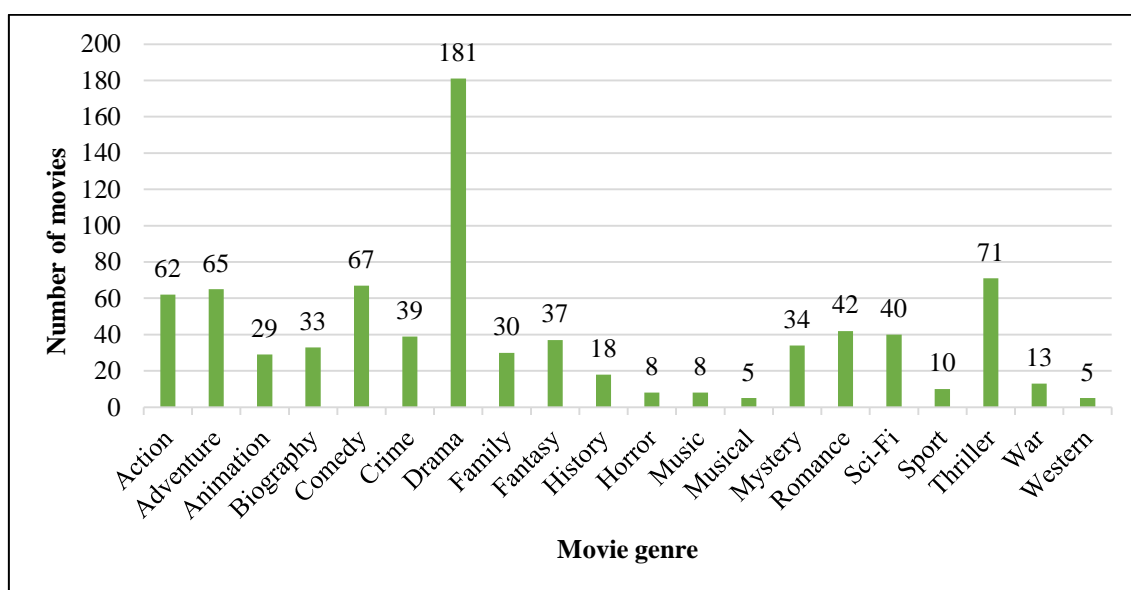


Figure 1. The genres along with the number of movies in the filtered collection

When the filtered collection was examined, it was seen that every movie was always included in its all genre groups separately. In this study, “all genres” of the movies are considered. For each of 245 unique movie, IMDb.com summary and the genres it belongs were gathered from the filtered collection into a new dataset. This dataset has 245 records.

Afterwards, the summaries in the dataset were preprocessed. In the preprocessing, various operations were done such as parenthesis removal, conversion to lowercase, stop words removal by using the English stop words list [24], private name removal, and lemmatization with the English lemmatization list [25]. (Some words have more than one lemma in the lemmatization list. When a

word is this kind, the first corresponding lemma was considered. For example, when “better” word came, “good” lemma was used because “better” word has two lemmas (i.e., “good” and “well”) and “good” comes before.)

When the preprocessing was finished, the preprocessed dataset named Movie Summary Dataset (MSD) was obtained. MSD consists of records for 245 unique movies with user rating 7.5 and above from 20 genres. For each movie, there is one record that consists of 1-7 genres and a preprocessed summary. Furthermore, every record has number of words between 6 and 30 in total. MSD is available at <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.19213821.v1> (file name is “MSD.txt”).

2.2. Architecture

The proposed approach’s architecture is given in Figure 2. The user selects her/his favorite movie genres on the questionnaire that consists of all the genres mentioned in MSD (20 genres) and submits the filled out questionnaire to Decision Module (DM). (Questionnaire method is an example of explicit user feedback method for user profiling information [26].) Our questionnaire method is one-time explicit user feedback method that elicits the favorite movie genres of the user. These genres (profiling information) are utilized by DM in order

to gather every record from MSD that has at least one of these genres and then, by using these records, produce the user profile that consists of the unique movie summaries and their individual genres. So, every record in the user profile has a unique movie summary with the corresponding genres. Afterwards, DM updates the user profile; in each record, the genres are appended into the summary and the genres are removed. This is done for enriching the summaries in terms of information. Later, DM updates the user profile one more time by making all words unique in each summary. Finally, the user profile is ready-to-use and named as Double Updated User Profile (DUUP). DM also saves DUUP for using again when the corresponding user comes back.

DM gets the products stored one by one. For each of them: DM preprocesses the product’s definition with various operations (such as removing special symbols, removing stop words by using the English stop words list [24], lemmatization with the English lemmatization list [25] (Some words have more than one lemma in the lemmatization list. When a word is this kind, the first corresponding lemma was considered.), and making all words unique) and then, calculates the product’s score with the following equation by using the PreProcessed Definition (PPD) of the product and DUUP.

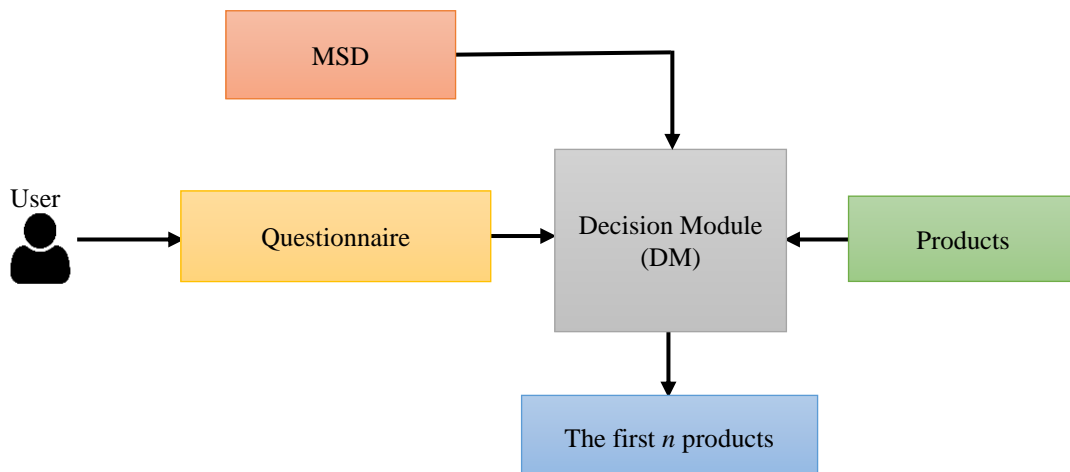


Figure 2. The architecture of the proposed approach

$$\text{score}_{P_i} = \sum_{k=1}^m \text{cosine_similarity}(\text{PPD}_{P_i}, \text{Su}_k_in_DUUP) \quad (1)$$

where m is the number of summaries in DUUP, P_i is the abbreviation of “Product”, and Su is the abbreviation of “Summary”. As a result, DM obtains a score for each of the products. Then, it ranks the products in descending order based on their scores and produces the output with the first n products which are potential products that the user can “like”. The value of n can be decided according to aim of using the approach. For example, if the most potential product is wanted, then 1 can be assigned to n . Furthermore, instead of giving all the products stored to DM, the products can be filtered (e.g., based on category and date range) -according to a strategy- and then, those products can be given to DM.

3. TEST METHODOLOGY

In order to be able to test the proposed approach, three steps were followed: (1) Create a test dataset that consists of real products; (2) design and develop a Web application for test that uses the proposed approach and leads the users to evaluate the results of the proposed approach; and (3) preparation of the application and use of it by some number of subjects.

Step 1: Test dataset

A test dataset consists of real products from Amazon.com was created.

19 categories (departments) were determined from Amazon.com. These categories are “Arts & Crafts”, “Automotive”, “Baby”, “Beauty & Personal Care”, “Computers”, “Electronics”, “Women’s Fashion”, “Men’s Fashion”, “Health & Household”, “Home & Kitchen”, “Industrial & Scientific”, “Luggage”, “Pet Supplies”, “Software”, “Sports & Outdoors”, “Tools & Home Improvement”, “Toys & Games”, “Video Games”, and “Deals”. Except “Women’s Fashion”, “Men’s Fashion”, and “Luggage” categories, the first 24 products displayed in every category were collected. For “Luggage” category, Amazon.com

displayed 12 subcategories only; therefore, each subcategory was visited and the first 2 products were collected from each. For “Men’s Fashion” category, 8 subcategories were displayed and the same was done with the first 3 products. Amazon.com displayed 12 subcategories for “Women’s Fashion”. The subcategory “Maternity” was ignored and the first 2 products were collected from the rest of the subcategories by visiting each. As a result, 22 products were collected from “Women’s Fashion” and 24 products from each of the other categories. This process was done between 18/02/2019 and 26/02/2019 and total 454 products were collected. Note 1: 2 products (one from “Sports & Outdoors” category and one from “Deals” category) was skipped since they had not “about” part, and 1 product (from “Women’s Fashion”) was skipped because of its picture. Note 2: In “Deals” category, 2 separate “deal of the day” (that each was for a particular group of products) came instead of 2 products. When a “deal of the day” was clicked, the group of products came. So, for each “deal of the day”, the product that is the same with picture of the “deal of the day” was chosen. Note 3: For 2 products related to magazines, “Print Magazine” phrase shown along with their titles. So, this phrase was considered as a part of their titles.

Afterwards, product titles were considered and all duplicate products were removed. The remaining 388 unique products have formed the test dataset. Every product in the test dataset contains “title”, “about”, and “URL”. The dataset is available at <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.19213821.v1> (file name is “TheTestDataset.txt”).

Step 2: Web application for test

A Web application for test that uses the proposed approach and leads the users to evaluate the results of this approach was designed and developed. The application was developed with PHP. It uses NlpTools [27] for tokenization and cosine similarity calculation.

First of all, the user enters username & password pair on the first page to log in. Every username & password pair is one-time use and expires when

the necessary details are saved since one-time attendance for each user is needed. Afterwards, the page on Figure 3 comes. The user chooses her/his favorite movie genres that can be one or more. For every genre, its definition, which was taken from IMDb.com, can be seen. When the user finishes choosing her/his favorite genres, she/he clicks "SUBMIT" button. Then, based on the proposed approach, the page on Figure 4 comes (on the figure, products are sample products). (Note that the combination of "title" and "about" fields of a product is considered as "product definition" of the product by the proposed approach in the application.) Here, n products are displayed. For each product; the user clicks the product link that contains the product title, examines the product from its own page on the Web (opened as another page), and grades the product by telling how much she/he liked it based on the five-level Likert-type scale "Not at all", "Slightly", "Moderate", "Very", and "Extremely". At last, the user clicks "SUBMIT" button. So, the necessary details are saved and the final page that contains thank and close-the-browser message is displayed. Note 1: The written instructions are given on all the application pages. Note 2: The users use the test-Web-application only one-time; therefore, DM -in the application- do not save DUUP for decreasing the computation time.

Step 3: Preparation and use of the test-Web-application

The Web application for test was published on an Apache Web server and the test dataset of real products mentioned in step 1 was entered into it. n is configured as 10 for the proposed approach.

Total 52 volunteered subjects were found. 39 of them were from computer engineering (CMPE), software engineering (CMSE), electrical and electronic engineering, and information systems engineering undergraduate students of Eastern Mediterranean University (EMU). The rest was from CMPE and CMSE instructors of EMU and CMPE graduate students of EMU.

In order to use the application, login is required. Some amount of username & password pairs were

generated randomly and given to the application before. Each subject drew a pair of username & password from the bag that contains all generated username & password pairs and used for login. It was decided to generate username & password pairs randomly and deliver them by drawing from the bag; the reason was to let the subjects to attend the test anonymously which means without stress and so, to obtain more reliable results. Note that any personal information was not kept for the test.

In order to be sure that the subjects attended the test as required, two type of instructions were given for the test: The oral instructions (e.g., "while you are evaluating a product, please consider the product itself, not the information such as its price and stock status" and "if any trouble, please tell us") were given before the login; and the written instructions were given on all the application pages.

All subjects attended the test on 21/03/2019. Every subject logged-in, continued to use the application as it is required, and successfully finalized.

4. RESULTS AND DISCUSSION

Total 52 subjects attended the test. For each subject, 10 products were displayed from the test dataset (which has 388 Amazon.com products) based on the corresponding subject's DUUP (which is obtained from MSD according to the subject's favorite movie genres).

Every subject selected 1-14 (averagely ~7.79) of the movie genres. The most selected three genres are "Action", "Adventure", and "Comedy"; 44 subjects selected "Action", 37 subjects selected "Adventure", and 36 subjects selected "Comedy". The least selected three genres are "Music", "Musical", and "Western"; each was selected by 5 subjects only. Each of the rest was selected by 9-32 subjects.

The first 10 products with the highest scores were displayed for each subject. The product scores for every top 10 were between ~1.65% and ~2.64%. For all 52 subjects, total 29 products from the test

dataset were displayed. This means ~7.47% of the test dataset was displayed. In the test dataset, products are from 19 categories. From the categories “Arts & Crafts”, “Electronics”, and “Health & Household”, no product was displayed. From each of the other categories “Automotive”, “Baby”, “Beauty & Personal Care”, “Computers”, “Women’s Fashion”, “Men’s Fashion”, “Home &

Kitchen”, “Industrial & Scientific”, “Luggage”, “Pet Supplies”, “Software”, “Sports & Outdoors”, “Tools & Home Improvement”, “Toys & Games”, “Video Games”, and “Deals”, 1-5 (averagely ~1.81) products were displayed. The individual display frequency range of every product displayed is from 1 to 52.

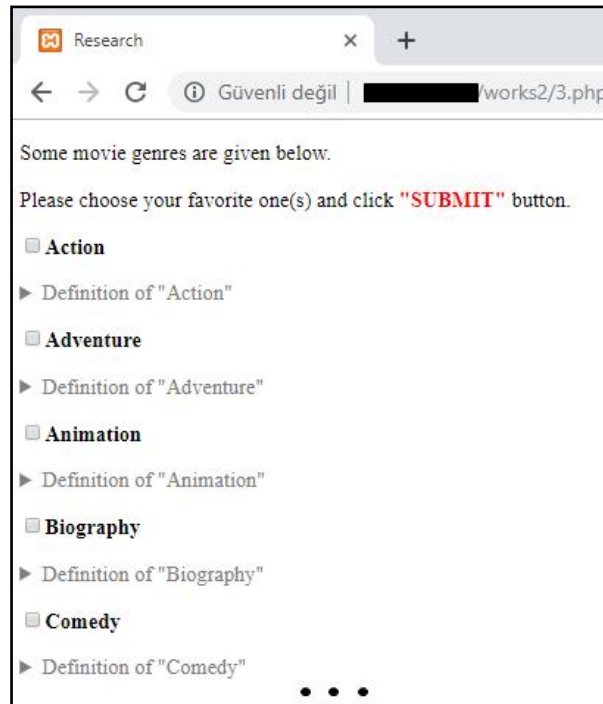


Figure 3. Genres list-page

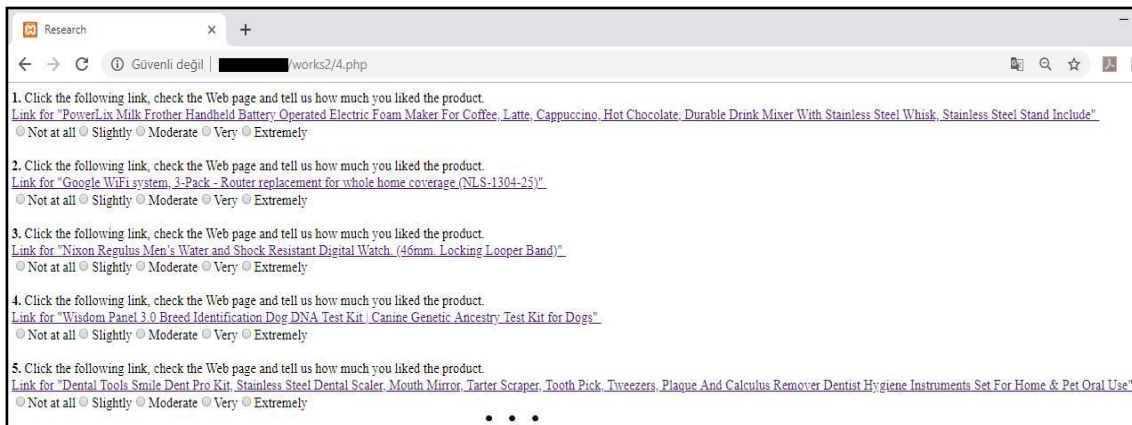


Figure 4. Products list-page with sample products

The subject examined and graded each of the 10 products displayed. Grading was based on the five-level Likert-type scale “Not at all” (0%), “Slightly” (25%), “Moderate” (50%), “Very” (75%), and “Extremely” (100%). Total 520 products were evaluated by all the subjects: 111 products were evaluated as 0% (“Not at all”), 86 products were evaluated as 25% (“Slightly”), 152 products were evaluated as 50% (“Moderate”), 113 products were evaluated as 75% (“Very”), and 58 products were evaluated as 100% (“Extremely”). For each subject, the average grade varies between 7.50% and 85%. The average product grade (or the average of the average grades of 52 subjects) is ~46.20% and so, it is possible to say that the subjects are moderately liked the products. When the product evaluations are categorized in two categories as “liked” (for “Slightly”, “Moderate”, “Very”, and “Extremely” - 100%) and “disliked” (for “Not at all” - 0%), the followings can be said: 409 out of 520 products were liked; for each subject, the average grade varies between 10% and 100%; the average product grade (or the average of the average grades of 52 subjects) is ~78.65% and hence, it is possible to say that the subjects liked ~78.65% of the products.

For creating the test dataset, the real products were used. These products were taken from Amazon.com. Amazon.com’s product descriptions are given by the sellers with the subheadings such as “title”, “about”, and “description”. For the test dataset, only “title” and “about” fields and “URL” were collected for each product. The combination of “title” and “about” fields of a product in the test dataset was considered as “product definition” of the product by the proposed approach in the test-Web-application. However, it is observed in the test dataset that the product definition for a product might not contain fully sufficient definition. It is believed that this affected the overall success negatively. Despite of this effect, it is still reasonable since it is found as “~46.20%” and “~78.65%” (as given above).

After the test, it was encountered that two products from the test dataset had the same PPD. These are different products in the test dataset that has 388 unique products; however, they have very slight

differences in their product definitions such as number of items in the package. When the product definition of each were preprocessed by DM, the things that create the difference were removed and so, each had the same PPD. These products are not from 29 products that were displayed to the subjects. If one of them would have been displayed, the first listed one in the test dataset would have been displayed in the products list-page; if two of them would have been displayed, the first listed one in the test dataset would have been displayed before the other one. Our approach can be used with various product pools and having the same PPD by more than one product is always possible. DM could easily be revised in order to act differently for this type of situations, if wanted.

Isinkaye, Folajimi, and Ojokoh [28] stated that although explicit feedback requires more effort from the user, it provides more reliable data. They stated this by considering user feedback as continuing process. However, in our approach, explicit user feedback is taken one time and therefore, reliability comes forward. Furthermore, Kramer [29] mentioned that explicit methods of eliciting user preferences caused higher acceptance rates for recommendations than implicit and opaque methods. As a result, it could be said that the questionnaire-based explicit user feedback method used supports our proposed approach positively.

Our approach recommends products from a product pool. Various product pools are possible with this approach. The product pool can have products from one or more categories and the categories can be from a variety of fields (from “baby” to “holiday tour”).

5. CONCLUSION AND FUTURE WORK

In this study, it is aimed to have a content-based recommendation approach which utilizes the preprocessed 245 top movie summaries of IMDB and the favorite movie genres of the user elicited with the questionnaire method and then, recommends potential products -from a product

pool- that the user can “like”. This approach supports various product pools.

52 volunteered subjects attended the test. Based on the five-level Likert-type scale, it is possible to say that the subjects are moderately liked the products with ~46.20% average product grade. Based on the two-level (“liked” and “disliked”), it is ~78.65% which means that the subjects liked about 79% of the products.

According to the test results and the features of this approach, it can be said that the approach has potential and is promising for the e-commerce applications.

In order to have more success with the proposed approach: Preprocessing for MSD and preprocessing for PPD would be improved; and subtitles of the movies would be considered for MSD. Various product sets with different sufficient-definition-levels would be considered for test in order to find out the effect of product definition quality on the success of the proposed approach.

6. REFERENCES

1. Son, J., Kim, S.B., 2017. Content-Based Filtering for Recommendation Systems Using Multiattribute Networks. *Expert Systems with Applications*, 89, 404-412. doi: 10.1016/j.eswa.2017.08.008.
2. Pu, P., Chen, L., Hu R., 2011. A User-Centric Evaluation Framework for Recommender Systems. *The 5th ACM Conference on Recommender Systems*, Chicago, Illinois, USA, 157-164. doi: 10.1145/2043932.2043962.
3. Zihayat, M., Ayanso, A., Zhao, X., Davoudi, H., An, A., 2019. A Utility-Based News Recommendation System. *Decision Support Systems*, 117, 14-27. doi: 10.1016/j.dss.2018.12.001.
4. Ma, M., Na, S., Wang, H., Chen, C., Xu, J., 2021. The Graph-based Behavior-aware Recommendation for Interactive News. *Applied Intelligence*, 1573-7497. doi: 10.1007/s10489-021-02497-x.
5. Symeonidis, P., Kirjackaja, L., Zanker, M., 2021. Session-Based News Recommendations Using Simrank on Multi-modal Graphs. *Expert Systems with Applications*, 180, article no. 115028. doi: 10.1016/j.eswa.2021.115028.
6. Giabelli, A., Malandri, L., Mercorio, F., Mezzanatica, M., Seveso, A., 2021. Skills2Job: A Recommender System that Encodes Job Offer Embeddings on Graph Databases. *Applied Soft Computing*, 101, article no. 107049. doi: 10.1016/j.asoc.2020.107049.
7. Yang, S., Korayem, M., Aljadda, K., Grainger, T., Natarajan, S., 2017. Combining Content-Based and Collaborative Filtering for Job Recommendation System: A Cost-Sensitive Statistical Relational Learning Approach. *Knowledge-based Systems*, 136, 37-45. doi: 10.1016/j.knsys.2017.08.017.
8. Chen, M.H., Teng, C.H., Chang, P.C., 2015. Applying Artificial Immune Systems to Collaborative Filtering for Movie Recommendation. *Advanced Engineering Informatics*, 29(4), 830-839. doi: 10.1016/j.aei.2015.04.005.
9. An, H., Kim, D., Lee, K., Moon, N., 2021. Movie DIRec: Drafted-input-based Recommendation System for Movies. *Applied Sciences*, 11(21), article no. 10412. doi: 10.3390/app112110412.
10. Reddy, S., Nalluri, S., Kuniseti, S., Ashok, S., Venkatesh, B., 2019. Content-based Movie Recommendation System Using Genre Correlation. In: Satapathy, S.C., Bhateja, V., Das, S. (eds) *Smart Intelligent Computing and Applications*. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 105, 391-397, Springer, Singapore. doi: 10.1007/978-981-13-1927-3_42.
11. Wang, D., Liang, Y., Xu, D., Feng, X., Guan, R., 2018. A Content-Based Recommender System for Computer Science Publications. *Knowledge-Based Systems*, 157, 1-9. doi: 10.1016/j.knsys.2018.05.001.
12. Kang, Y., Hou, A., Zhao, Z., Gan, D., 2021. A Hybrid Approach for Paper Recommendation. *IEICE Transactions on Information and*

- Systems, E104D(8), 1222-1231. doi: 10.1587/transinf.2020BDP0008.
13. Sassi, I.B., Yahia, S.B., Liiv, I., 2021. MORec: At the Crossroads of Context-aware and Multi-Criteria Decision Making for Online Music Recommendation. *Expert Systems with Applications*, 183, article no. 115375. doi: 10.1016/j.eswa.2021.115375.
 14. Cruz, A.F.T., Coronel, A.D., 2020. Towards Developing a Content-based Recommendation System for Classical Music. In: Kim, K.J., Kim, H.-Y. (eds) *Information Science and Applications. Lecture Notes in Electrical Engineering*, 621, 451-462, Springer, Singapore. doi: 10.1007/978-981-15-1465-4_45.
 15. Hwangbo, H., Kim, Y.S., Cha, K.J., 2018. Recommendation System Development for Fashion Retail E-commerce. *Electronic Commerce Research and Applications*, 28, 94-101. doi: 10.1016/j.elerap.2018.01.012.
 16. Pazzani, M.J., Billsus, D.J., 2007. Content-Based Recommendation Systems. In: Brusilovsky, P., Kobsa, A., Nejdl, W. (eds) *The Adaptive Web. Lecture Notes in Computer Science*, 4321, 325-341, Springer, Berlin, Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-540-72079-9_10.
 17. Guo, Y., Wang, M., Li, X., 2017. Application of an Improved Apriori Algorithm in a Mobile E-commerce Recommendation System. *Industrial Management & Data Systems*, 117(2), 287-303. doi: 10.1108/imds-03-2016-0094.
 18. Sabitha, R., Vaishnavi, S., Karthik, S., Bhavadharini, R.M., 2022. User Interaction Based Recommender System Using Machine Learning. *Intelligent Automation and Soft Computing*, 31(2), 1037-1049. doi: 10.32604/iasc.2022.018985.
 19. Zhang, Y., 2021. The Application of E-commerce Recommendation System in Smart Cities Based on Big Data and Cloud Computing. *Computer Science and Information Systems*, 18(4), 1359-1378. doi: 10.2298/CSIS200917026Z.
 20. Gwadabe, T.R., Liu, Y., 2022. Improving Graph Neural Network for Session-based Recommendation System via Non-sequential Interactions. *Neurocomputing*, 468, 111-122. doi: 10.1016/j.neucom.2021.10.034.
 21. Kottage, G.N., Jayathilake, D.K., Chankuma, K.C., Ganegoda, G.U., Sandanayake, T., 2018. Preference Based Recommendation System for Apparel E-commerce Sites. *IEEE/ACIS 17th International Conference on Computer and Information Science*, Singapore, 122-127. doi: 10.1109/icis.2018.8466382.
 22. Zhou, N., Tian, J., Li, M., 2021. Online Recommendation Based on Incremental-input Self-organizing Map. *Electronic Commerce Research and Applications*, 50, article no. 101096. doi: 10.1016/j.elerap.2021.101096.
 23. Zheng, J., Li, Q., Liao, J., 2021. Heterogeneous Type-specific Entity Representation Learning for Recommendations in E-commerce Network. *Information Processing & Management*, 58(5), article no. 102629. doi: 10.1016/j.ipm.2021.102629.
 24. Porter, M., Boulton, R., The English (Porter2) Stemming Algorithm: English Stop Words List (UTF-8 Encoding), Snowball, Available at <http://snowballstem.org/algorithms/english/stemmer.html> - Access Date: 7 December 2018.
 25. Měchura, M., Lemmatization-Lists: lemmatization-en.txt, Available at <https://github.com/michmech/lemmatization-lists>, Access Date: 8 December 2018.
 26. Adomavicius, G., Tuzhilin, A., 2005. Toward the Next Generation of Recommender Systems: A Survey of the State-of-the-art and Possible Extensions. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 17(6), 734-749. doi:10.1109/TKDE.2005.99.
 27. NlpTools, Available at <http://php-nlp-tools.com>, Access Date: 18 January 2019.
 28. Isinkaye, F.O., Folajimi, Y.O., Ojokoh, B.A., 2015. Recommendation Systems: Principles, Methods and Evaluation. *Egyptian Informatics Journal*, 16(3), 261-273. doi: 10.1016/j.eij.2015.06.005.
 29. Kramer, T., 2007. The Effect of Measurement Task Transparency on Preference Construction and Evaluations of Personalized Recommendations. *Journal of Marketing Research*, 44(2), 224-233. doi:10.1509/jmkr.44.2.224.

Comparative Safety Analyses of Slope-Shallow Foundation Interaction under Static and Dynamic Loading Conditions

Zülal AKBAY ARAMA¹ ORCID 0000-0001-8185-7329

İlknur DALYAN^{*2} ORCID 0000-0001-6436-7109

Muhammed Selahaddin AKIN³ ORCID 0000-0003-1980-1812

¹Istanbul University-Cerrahpaşa, Faculty of Engineering, Civil Engineering Department, Istanbul

²Çanakkale Onsekiz Mart University, Faculty of Engineering, Civil Engineering Department, Çanakkale

³Kartal Municipality, Istanbul

Geliş tarihi: 17.07.2021

Kabul tarihi: 21.03.2022

Atıf şekli/ How to cite: AKBAY ARAMA, Z., DALYAN, İ., AKIN, M.S., (2022). Comparative Safety Analyses of Slope-Shallow Foundation Interaction under Static and Dynamic Loading Conditions. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37(1), 129-141.

Abstract

This study is focused on the safety analysis of the shallow foundations located on cohesive homogenous slopes that has different shear strength characteristics. Static and dynamic analyses have been conducted with a well-known commercial finite element logic-based two dimensional numerical software. Dynamic analyses are performed with regard to the consideration of the Samos-İzmir earth-quake that happened in 30 October 2020. The change of the slope geometry depending on the differentiation of the slope height and inclination is also considered. The interaction between the slope-shallow foundation is investigated regarding different relative distances of the foundation from the slope edge and considering various loading magnitudes for the foundation. The results of the analyses are evaluated in terms of the factor of safety values to interpret the degree of the effects of foreseen variants on the integrated system stability.

Anahtar Kelimeler: Finite element, Slope, Shallow foundation, Interaction, Safety, Dynamic loading

Statik ve Dinamik Yükleme Koşulları Altında Şev-Yüzeysel Temel Etkileşiminin Karşılaştırmalı Güvenlik Analizi

Öz

Bu çalışma, farklı kayma dayanımı özelliklerine sahip kohezyonlu homojen şevler üzerinde yer alan yüzeysel temellerin güvenlik analizine odaklanmıştır. İyi bilinen bir ticari sonlu elemanlar mantığı tabanlı

*Corresponding author (Sorumlu yazar): İlknur DALYAN, ilknur.dalyan@comu.edu.tr

iki boyutlu sayısal bir yazılım kullanılarak statik ve dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. 30 Ekim 2020'de meydana gelen Samos-İzmir depremi dikkate alınarak dinamik analizler uygulanmıştır. Şev yüksekliği ve eğiminin farklılaşmasına bağlı olarak şev geometrisinin değişimi de dikkate alınmıştır. Şev-yüzeysel temel etkileşimi, temelin şev kenarından farklı göreceli mesafeleri ve temel için çeşitli yükleme büyüklükleri dikkate alınarak incelenmiştir. Analiz sonuçları, öngörülen değişkenlerin bütünsel sistem stabilitesi üzerindeki etkilerinin derecesini yorumlamak için güvenlik faktörü değerleri açısından yorumlanmıştır.

Keywords: Sonlu elemanlar, Şev, Yüzeysel temel, Etkileşim, Güvenlik, Dinamik yükleme

1. INTRODUCTION

The problems that arise due to the placement of the structures adjacent to the existing slopes are a frequently encountered and still researched issue in civil engineering applications. In such a case, the determination of the ultimate bearing capacity of the foundation and the interpretation of its effect on the stability of the slope forms an important engineering problem. The evaluation of the related literature studies shows that the direction and type of the loading acting on the foundation, the embedment depth of the foundation, the inclination and height of the slope, the hydrogeological situation, and the shear strength characteristics of the soil are the effective parameters on the bearing capacity of a foundation built on a slope [1,2]. In addition, the examination of the slope-foundation interaction behavior under dynamic loading conditions further raises the number of the design components and makes this engineering problem more complicated [3]. Several types of studies have been conducted and lots of methods were applied considering this challenging situation to ease the evaluation process of the mentioned complicated behavior and discover the unforeseen hazardous cases. In this context, Yamamoto et al. (2010) presented an analytical study which was using the upper-bound limit analysis and the pseudo-static approach for the determination of the seismic bearing capacity of embedded and spread foundations that are built near a slope. As the result, the researchers proposed a non-symmetrical failure mechanism for the interacted system, and also some design chart forms for the prediction of seismic bearing capacity factors are given [4]. Cascone and Casablanca (2016) evaluated static and dynamic bearing capacity factors for shallow

strip foundations. In their study, the characteristics method was used to derive the bearing capacity factors for both smooth and rough foundations. The results of their analyses were compared with the finite element analysis and the effect of seismic acceleration on the generated plastic mechanisms was highlighted. In addition, the researchers have proposed empirical formulas for computing static values of bearing capacity coefficients [5]. Cong et al. (2018) investigated the dynamic behavior of the shallow foundation on the slope with 3D simulation. The boundary conditions on the seismic response of the shallow foundation on the top of the slope are emphasized [6]. Raj et al. (2018) investigated the seismic bearing capacity of shallow strip foundations built on a slope using finite element limit analysis. The seismic effects on the soil and foundation were taken into account with the pseudo-static approach. In the study, the effect of parameters such as foundation embedment depth ratio, slope angle, horizontal seismic coefficient, and angle of internal friction on the bearing capacity of the foundation was investigated. It was emphasized that the results obtained from the study were well consistent with the results obtained from previous studies [7]. Xiao et al. (2019) investigated the undrained bearing capacity behavior of strip foundations built adjacent to two-layered slopes. They used adaptive finite-element limit analysis to calculate the lower and upper limits of the undrained bearing capacity factor for strip foundations. The results were compared with the previous studies and the failure mechanisms were also investigated. The results showed that the conclusions obtained from the study were compatible with the existing solutions. The charts and tables were created for engineers to use in design calculations [8]. Yang et al. (2019) proposed an analytical approach to estimate the

bearing capacity of shallow foundations affected by the slope. In their study, the researchers determined the bearing capacity of shallow foundations constructed near slopes using the modified bearing capacity factors with the traditional bearing capacity equation developed by Terzaghi [9]. Izadi et al. (2019) applied the limit equilibrium method coupled with Coulomb failure mechanism to search for the effect of variation of undrained shear strength with depth on seismic bearing capacity of shallow foundations on heterogeneous marine deposits [10]. Fatahi et al. (2020) investigated the effects of slopes on the seismic behavior of nearby buildings by conducting three dimensional numerical analyses. They conducted the analysis with the nonlinear differentiations of the soil stiffness and damping varying distances between the edge of the building and crest of the slope [11]. Yang et al. (2021) conducted analytical determinations depending on upper-bound kinematic limit analysis. They aimed to isolate the mechanism of failure and bearing capacity factors for shallow foundations near slopes subject to seismic action without utilizing the principles of superposition. As the result of their study, the analytical determinations of ultimate seismic bearing capacity present good accuracy compared with numerical solutions. The authors also assessed the seismic bearing capacity factors regarding the changes of soil properties and finite configurations of both slope and foundation geometry [12]. These studies generally represent that the evaluation process of the dynamic behavior of the interacted slope-shallow foundation systems was generally focused on the determination of ultimate bearing capacity values of the foundations.

The present study has diverged from other studies which have been regarding the dynamic interaction of slope-foundation system by considering the change of the safety degrees in terms of the Factor of Safety (FoS) values under both static and dynamic situations respectively performing strength reduction method by the commercial software Plaxis 2D V2021. Within this context, several cases were fictionalized to reflect the probable effects of design variables on safety. In addition, the dynamic analyses are performed with

regard to the consideration of the actual Samos-İzmir earth-quake that happened in 30 October 2020. The undrained shear strength of the soil slope, the geometry of the slope, the interaction distance of the slope- foundation system, the amount of the structural static loading was considered in both static and pseudo-static analysis. As the result of the parametrical analyses, comparative interpretations were performed to reflect the change of the safety degrees obtained for static and dynamic analysis under different conditions that can be probable.

2. MATERIAL AND METHODS

The dynamic numerical analyses were performed with the use of the pseudo-static analysis method that can be defined as one of the main and keep-up-to-date seismic stability analysis methods used for slopes. The pseudo-static analysis method evaluates the earthquake loads as a constant single force that is acting directly to the center of the sliding slope mass [13,14]. Thereafter, the factor of safety value of the slope can be determined with the use of the traditional limit equilibrium method. In this connection, the Plaxis software utilizes the Newmark implicit time history integration scheme to determine the equilibrium equation (dynamics) of the system [15]. Characteristically, a factor of safety against sliding of bigger than 1 is necessitated for the ground motion that is caused by the safety evaluation of the earthquake [16]. The finite element analyses were conducted within the mentioned perspective and the results of the analyses were presented considering the change of FoS values throughout the study. In addition, plain strain conditions were considered to model the system and 15-noded triangular elements were used. The boundaries of the slope-foundation system were modeled enough large to reflect but not restrict the possible distributions of stress and strains for all the considered cases. The clayey soil was defined with the use of elastic-perfectly plastic constitutive material model (Mohr-Coulomb). The phases of all the analysis were started from the initial condition which represents the initial virgin condition of the slope to model an existing structure. Then, a weightless plate element was used to model the shallow foundation structure and

additional structural static loads were applied on the plate considering different magnitudes with the assumption of undrained loading in the plastic situations. A representative cross-section and related geometrical and geotechnical parameters of the slope-shallow foundation system are presented in Figure 1. In Figure 1, the width of the foundation, the height of the slope, the inclination of the slope, the magnitude of the structural static loading, the interaction distance of the slope-shallow foundation, the undrained shear strength of the soil, the unit weight of the soil, the Young Modulus of the soil, the poisson ratio of the soil is represented by $B, H, \beta, q, L, c_u, \gamma, E, \nu$ respectively.

The foundation width is selected as a constant value at 24 m. The slope height is assumed to be 3 m, 6 m and 9 m and the inclination of the slope is 30° and 45° . The interaction distance of the slope-foundation system is selected 0, B/8, B/4, B/2 and B as the function of the width of the foundation. The structural static loads were applied as uniform surcharge with the magnitude of 20, 60, 120 kPa respectively. The undrained shear strength of the soil is assumed to be 50 kPa and 100 kPa. The fine meshed model of the interacted system has been given in Figure 1 for $H=3\text{ m}, \beta=45^\circ$ and $L=3\text{ m}$.

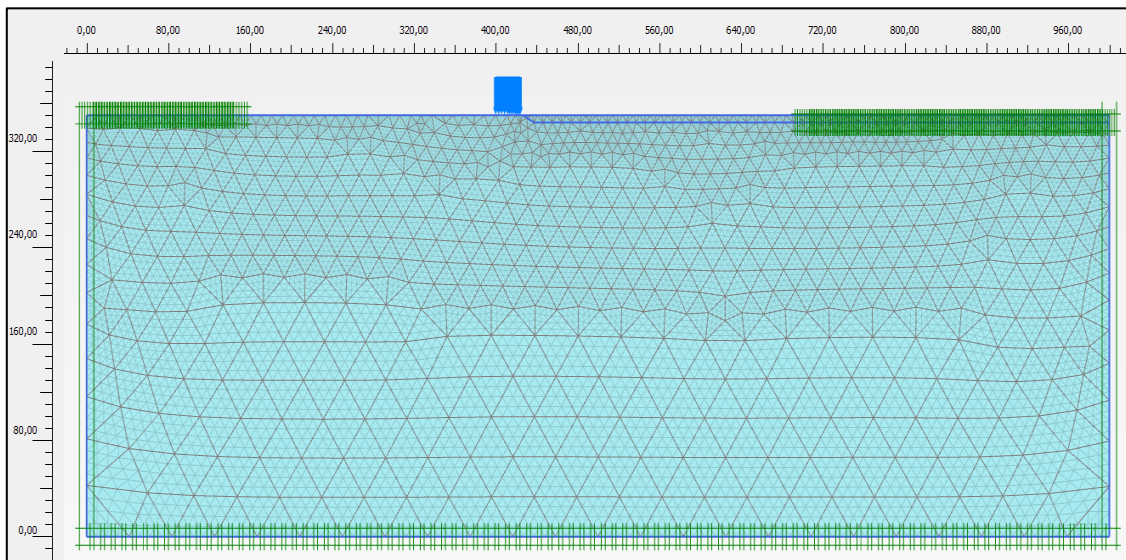
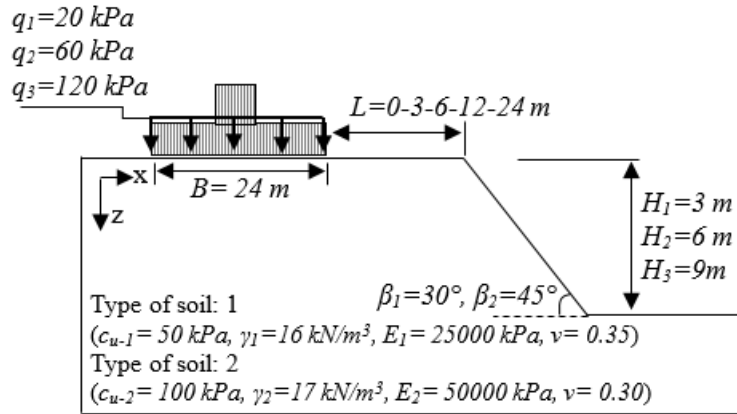


Figure 1. The cross section and the variables of the slope-shallow foundation system

The other geotechnical parameters were selected according to the envisaged limit values given by Bowles (1988) depending on the selected undrained shear strength values [17]. Besides, it is significant to obtain the characteristics of the evaluated earthquake on the soil surface for the field examined in seismic hazard analysis. These characteristics require to be achieved using a

detailed soil investigation and acceleration records consistent with local seismic hazard findings. In the scope of current research, the effects of the Samos-Izmir earthquake were used to be modeled in the dynamic analysis of the slope-foundation system. The accelerogram of the mentioned earthquake is presented in Figure 2 considering acceleration, velocity, and displacement.

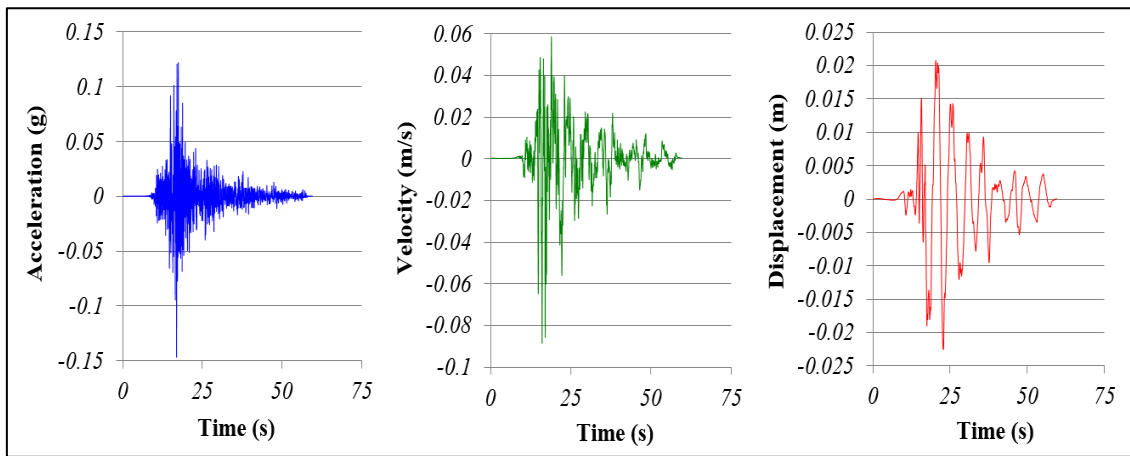


Figure 2. The accelerogram of the Samos-Izmir earthquake [18]

3. RESULTS AND DISCUSSION

In the context of this study, a total of 720 numerical analyses was performed to compare the static and dynamic safety degrees determined considering the interaction of slope-foundation. The outcomes of the conducted analyses were separated and presented according to the foreseen special cases to ease to form selective perception. The drawn graphs are given according to the change of the FoS values against the change of the interaction distance in the whole of the study. The effects of the changes in loading type, shear strength, the height of slope, the inclination of the slope, the magnitude of structural static load on the FoS values are interpreted into sub-sections with the use of variable couples as an integrated presentation.

3.1. The Effects of Loading Type and Undrained Shear Strength Angle Change

In Figure 3, the evaluation of the change of loading type and also the change of undrained shear strength is done. In such a case, some other variables of the design problem are selected as constant ($H=3$ m, $q=20$ kPa, $\beta=30^\circ$). Within the parameters considered, it can be clearly seen in Figure 3 that as a result of the doubling of the undrained shear strength value, the system safety level increases approximately twice for both under static and dynamic conditions. In addition, the increase of the interaction distance of the slope-foundation system leads to a significant increase in the degree of safety especially after exceeding a distance nearly the same as the foundation width B . Apart from this situation, the increase in the degree of safety happens gradually and linearly with the increasing L . It is an important situation

that the percentage of the decrease of safety during dynamic loading is determined approximately the same for both considered undrained shear strength values.

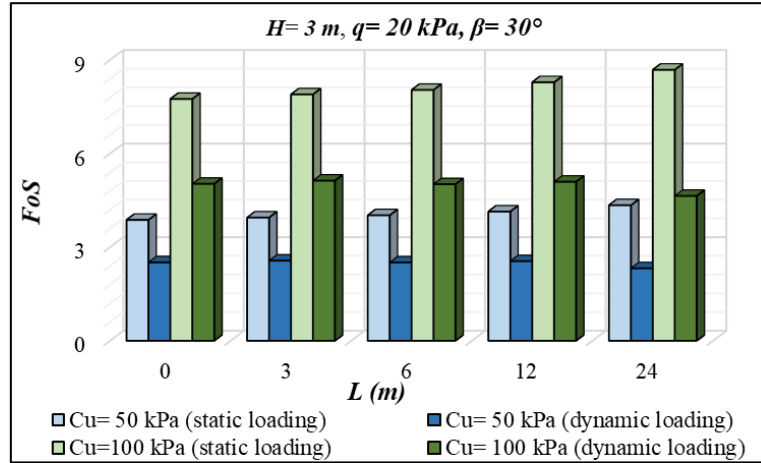


Figure 3. The change of FoS values against L for H= 3 m, q= 20 kPa

Therefore, it can be said that the value of the undrained shear strength is not effective on the rate of the decrease in safety that happened while dynamic loading. These ratios changed 35%, 35%, 37%, 38%, 47% for L= 0, 3, 6, 12, 24 meters respectively. In Figure 4, the constant parameters of the design are changed. It is assumed that H= 6 m, q= 60 kPa, $\beta= 30^\circ$. The height of the slope and the structural static loading magnitude are increased compared with Figure 3. If Figure 3 and Figure 4 are compared, the decrease in the value of safety can be understood from the decrease in the numerical values on the vertical axis. Besides, the change of the safety ratios depending on the static and dynamic conditions foreseen for Figure 4 are determined 31%, 32%, 33%, 36%, 40% for L= 0, 3, 6, 12, 24 meters respectively. The differentiation between the static and dynamic conditions in terms of safety is decreased with the increase of slope height and structural static loading magnitude.

In Figure 5, it is assumed that H= 9 m, q= 120 kPa, $\beta= 30^\circ$. In such a case, the change of the safety ratios depending on the static and dynamic conditions foreseen for Figure 5 is determined 4%, 6%, 10%, 17% for L= 3, 6, 12, 24 meters respectively. This mentioned case is dissimilar to the case considered in Figure 3 and Figure 4

according to the rate of the change of the safety degrees between static and dynamic situations. The increase of both the height of the slope and the amount of loading leads the system to be failed when the foundation is located at the edge of the slope. Besides, the static safety of the slope is almost in danger too when the undrained shear strength is 50 kPa. The increase of the shear strength angle prevented to be a failure of the system in both static and dynamic conditions.

3.2. The Effects of Slope Geometry Change

The slope inclination and slope height are evaluated as the geometric variables of the analysis and they are also taken into consideration throughout the conducted analysis. To address the steepening of the slope, the slope angle has been set to 45° . The change of the slope angle to 45° from 30° is investigated in Figure 6, Figure 7, and Figure 8 in connection with the change of the slope height 3 m, 6 m, 9 m respectively. In this part of the study, critical situations are evaluated and visualized in terms of the safety values obtained. Therefore, the analyses which consider the undrained shear strength 50 kPa, and the structural static loading magnitude 120 kPa are evaluated.

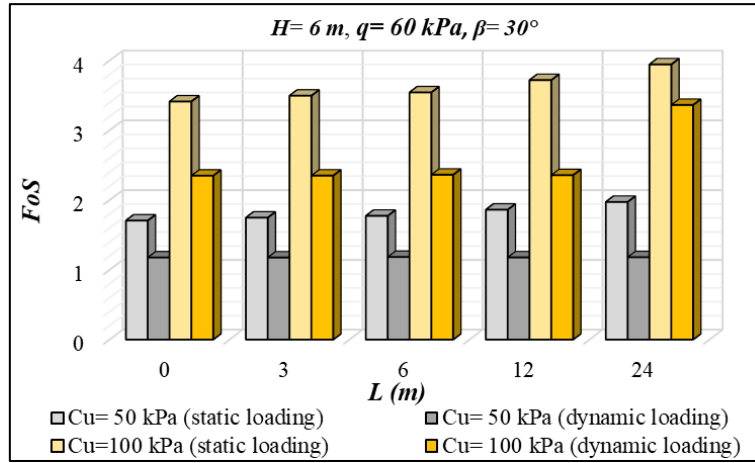


Figure 4. The change of FoS values against L for H= 6 m, q= 60 kPa

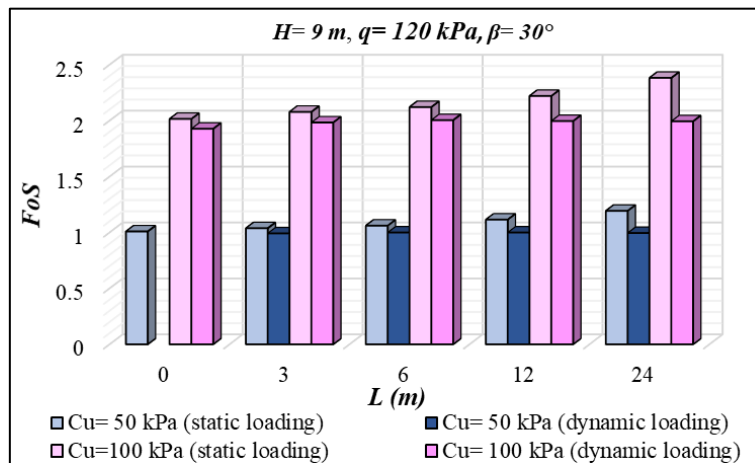


Figure 5. The change of FoS values against L for H= 9 m, q= 120 kPa

The reason for choosing this case is the determination of the minimum safety values within all the performed analyzes. In Figure 6, the height of the slope is 3 m, and also both static and dynamic analysis results are shown into the same graph depending on the change of the slope inclination.

The increase of the slope angle leads to a decrease in the FoS value, especially for the case that the L distance is relatively small during static analysis. The relative difference between the FoS values at static conditions approximately determined equally when the L value becomes the quarter width of the foundation base (6 meters). This might be the

result of the decrease of the interaction between slope and foundation when static conditions were evaluated it the slope height is relatively small (for this case H= 3 m) the safety of the shallow foundation becomes independent from the stability of the slope. But dynamic loading conditions change the trend of the interacted response of the slope-foundation system. In the case in which dynamic loading conditions dominate the system, the safety level decreased with the increase of the slope angle.

The FoS values approximately determined at the same degree when L becomes 3 meters for both inclinations.

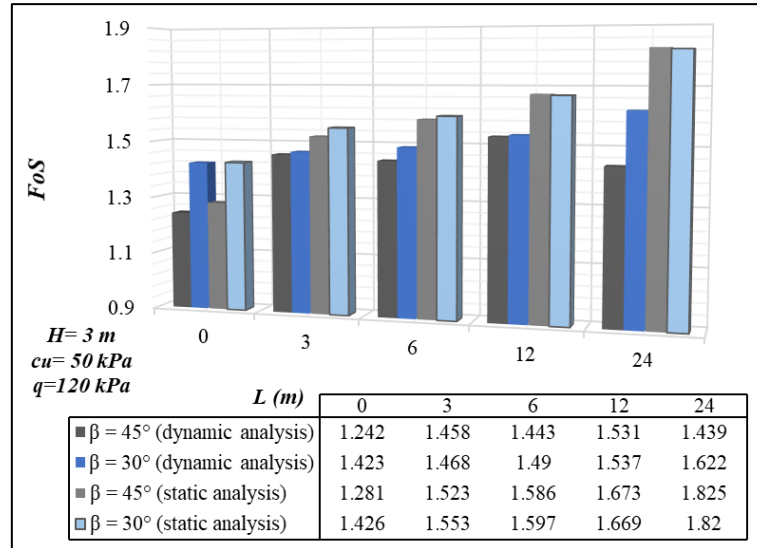


Figure 6. The change of FoS values against H= 3 m

But an interesting situation has been arising at L= 24 meters. In such a case, the FoS value significantly decreases when the the inclination of the slope is increased. The relative change between the calculated values of FoS at L= 0 and L= 24 meters has been the same at 12 %. This might be the response of the slope which dynamic response is dominantly found more dangerous than the safety of the foundation. It is thought that the finite element analysis considered the FoS value depending on the stability of slope at L=0 and L= 24 meters. At L= 0 and L= 24 meters distance, the interaction of the slope-foundation system depended on the stability of the slope but at L=0 the effective forces on the system stability were activated via the earthquake loading, foundation weight, and the soil mass which forms the slope but at L=24 meters the effective forces on the system stability were activated only the earthquake loading and the soil mass which forms the slope. The increase of the interaction distance leads to the absence of the foundation weight and increases the FoS value. In addition, the relative difference between the determined values of FoS for static and dynamic conditions at the same inclination, has been determined maximum for L= 24 meters. In Figure 7, the height of the slope is assumed to be 6 m. The increase of the H causes to decrease the FoS values as expected but the FoS values

have been determined bigger than 1.0 considering all envisaged situations.

The increase of the height of the slope leads to an increase in the effect of the slope mass depending on the distribution of the stresses to a large area. If the static loading conditions and dynamic conditions have been considered individually, it can be seen that although the L distance tends to increase, the relative difference between the calculated values of FoS for both inclination values cannot intersect at a certain value. But this situation changes for dynamic loading conditions and FoS values have been accessed to a common value only at L=12 meters. At L=24 meters, the same characteristic behavior trend (Figure 6) has been followed again in dynamic conditions. In addition, it is a remarkable condition that FoS=1.061 for L=0, $\beta=45^\circ$ for dynamic analysis. This mentioned value of FoS shows that the system is almost at the limit loading situation. On the other hand, the relative maximum difference between the FoS values that have been obtained for the case that L= 24 meters comparing static and dynamic loading conditions. This relative difference has been calculated as 23 % for $\beta=45^\circ$ and 20% for $\beta=30^\circ$. In Figure 8, the height of the slope is assumed to be 9 m.

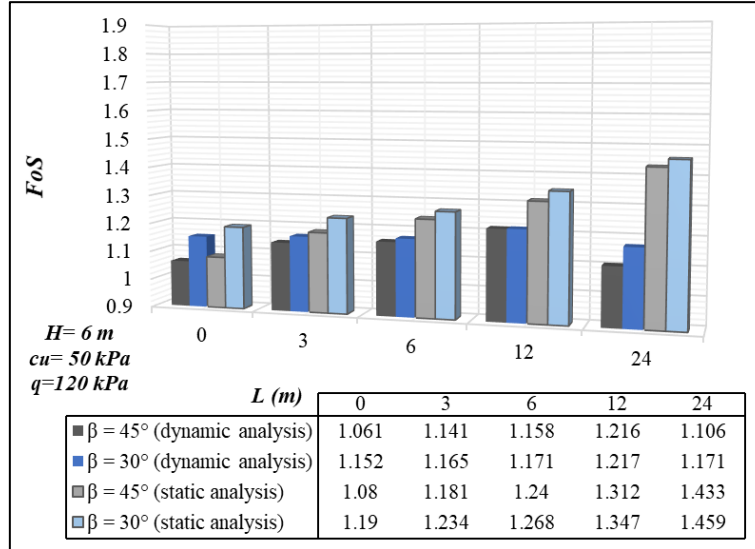


Figure 7. The change of FoS values against L at H= 6 m

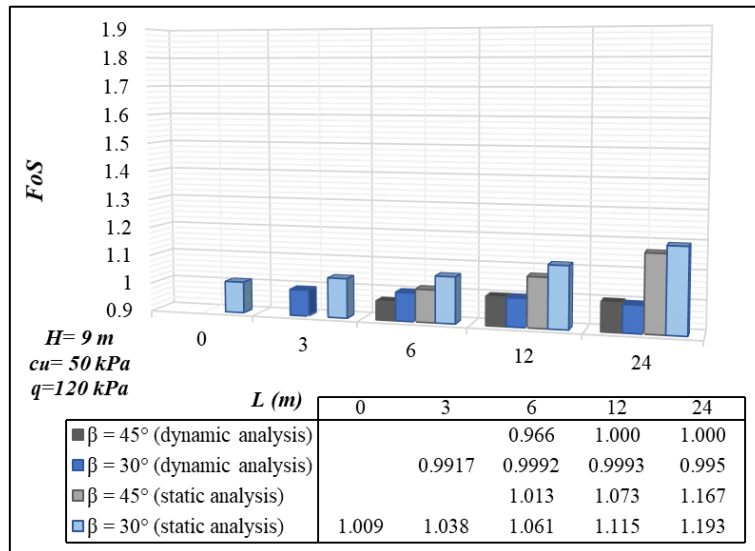


Figure 8. The change of FoS values against L at H= 9 m

The increase of the slope height leads some interaction cases to fail or reach a condition almost to fail. The maximum value of the FoS value has been calculated for L=24, $\beta=30^\circ$ for static analysis. But depending on the closeness of the obtained values from the numerical analysis, it can be possible to say that the effect of the inclination of the slope is decreased depending on the increase of the slope height. The increase in the slope height

has more effect than the increase in the slope inclination and after the slope height reaches a certain value, the effect of the slope inclination on the behavior becomes negligible.

Considering the data used in this study, it can be argued that the presence of slope has a very significant effect on the failure behavior of shallow foundations located within a quarter of the width

of the foundation and should be carefully examined for both static and dynamic loading conditions. In addition, it can be stated that the safety of a shallow foundation, which is behind the slope by the width of the foundation, is not affected by the presence of the slope.

3.3. The Effect of the Magnitude of Structural Static Load Change

The effect of the change of the static loading magnitude has been considered with the use of

three different values of surcharge. The magnitude of the static loading has been assumed to be 20 kPa, 60 kPa and 120 kPa respectively. Evaluations have been conducted considering the case that $c_u=50$ kPa. In this context, Figure 9 and Figure 10 are prepared to reflect the interaction behavior of slope-foundation at $H=6$ meters and $H=9$ meters respectively. The sub-divisions of the figures have been drawn individually to separate the static and dynamic responses of the system.

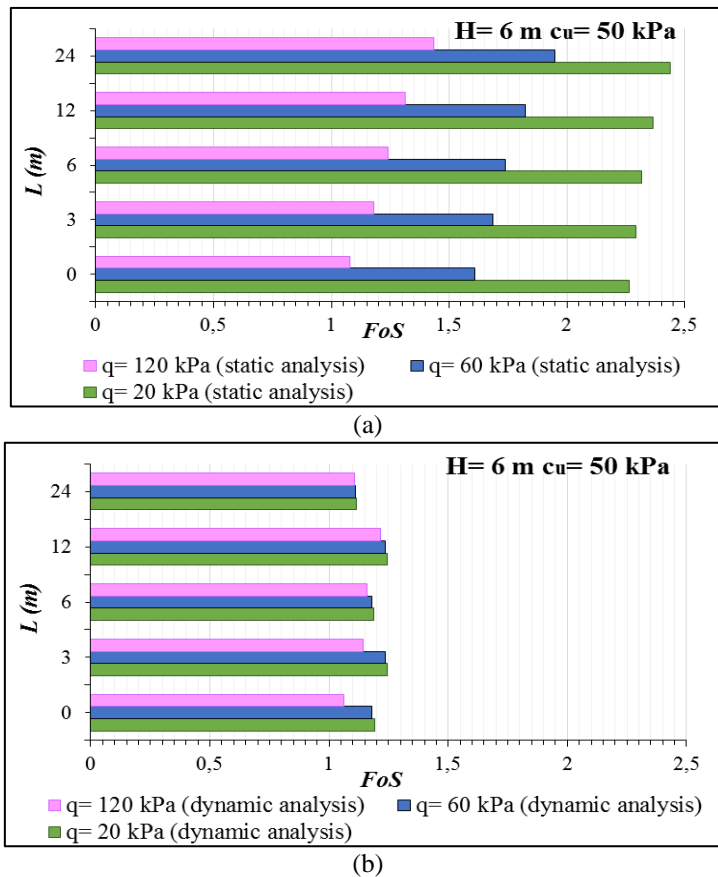


Figure 9. The change of FoS values against L at H= 6 m

It can be seen from Figure 9 that the dominant effect of the surcharge magnitude can be perceived in static conditions. For static conditions, the increase of the surcharge magnitude leads to decrease the FoS value as expected. Besides, the

increase of the L distance increases the system safety.

There can be calculated a directly proportional relationship between the increase of the FoS value

with the increasing L distance for static conditions. The increasing tendency of the FoS value depending on the increase of L decreases with the decrease of the loading magnitude. The remarkable point in these analysis is that even when the load magnitude was at the lowest level, the increase in the interaction distance L could not equalize the safety number values obtained.

Therefore, it can be said that determining the foundation load at the correct level is of great importance in determining the slope-foundation

interaction distance for static conditions. The dynamic response of the interacted system has been obtained very differently from the static response. The FoS values have been significantly decreased for all cases considered if a comparison is conducted between static and dynamic analysis. Besides, the increase of the magnitude of the loading has minimal effect on the safety in dynamic conditions and this effect can be neglected when the L= 24 meters. Figure 10 represents the response of the system when H becomes equal to 9 meters.

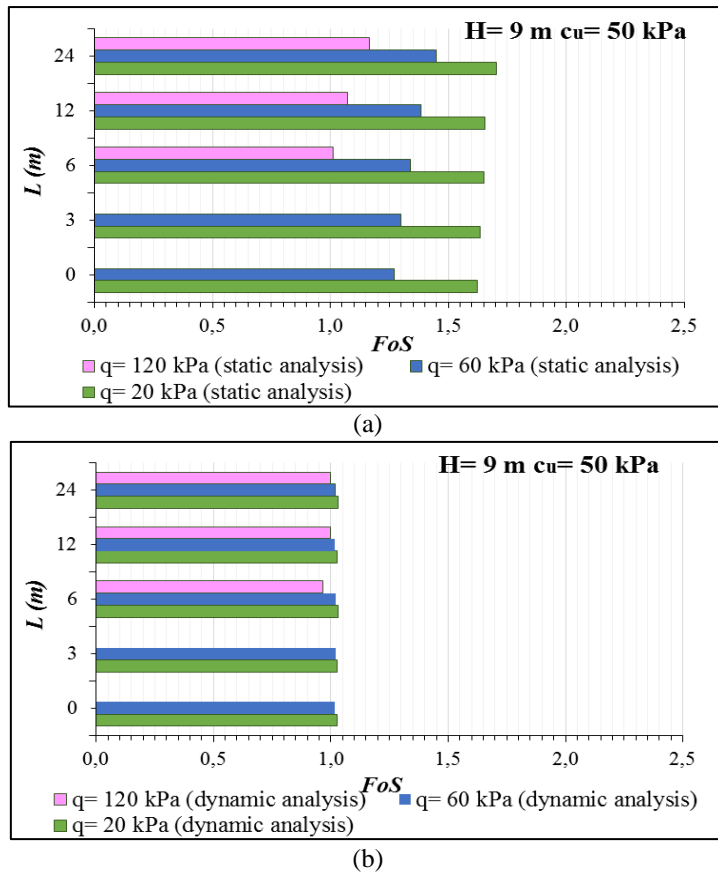


Figure 10. The change of FoS values against L at H= 9 m

A similar behavior manner as Figure 9 has been followed in Figure 10 for both static and dynamic responses. Besides, it can be a special result to determine FoS values smaller than 1.0 for L= 0 and L= 3 meters when the load is 120 kPa for both

static and dynamic loading conditions. In such a case that the foundation has been located closer to the slope crest, the increase of the loading magnitude has led the system to fail. Therefore, the magnitude of the surcharge loading is especially an

important state to be evaluated throughout the static analysis.

4. CONCLUSIONS

The aim of this study is to compare both the static and dynamic responses of interacted slope-shallow foundation systems considering the changes of probable effective factors on design. The variables of the analyses have been selected as the undrained shear strength of the soil, the geometry of the slope and the magnitude of the static surcharge loading. Besides, the dynamic loading has been considered by the use of the accelogram data of the Samos-İzmir earthquake. Numerical analyses were conducted with two dimensional Plaxis software regarding finite element solution logic to reflect the safety response of the foundation-slope system located adjacent to each other. The main special evaluations are obtained considering only the performed cases within this study and given as follows:

- The doubling of the c_u value leads the system safety level to be increased approximately twice for both under static and dynamic conditions.
- The increase of L leads to a significant increase in the degree of safety especially after exceeding a distance nearly the same as the foundation width B.
- It is an important situation that the percentage of the decrease of safety during dynamic loading is determined approximately the same for all considered c_u values. Therefore, it can be said that the value of c_u is not effective on the rate of the decrease in safety that happened while dynamic loading for the considered cases.
- The differentiation between the static and dynamic conditions in terms of safety is decreased with the increase of H and q.
- The increase of both H and q leads the system to be failed when the foundation is located at the edge of the slope.

- The increase of β leads to a decrease in the FoS value, especially for the case that the L distance is relatively small during static analysis.
- The relative difference between the FoS values at static conditions approximately determined equally when the L value becomes the quarter width of the foundation base (6 meters).
- In such a case that the dynamic loading conditions dominate the system, the safety level decreased with the increase of the slope angle.
- The increase in H has more effect than the increase in β and after H reaches a certain value, the effect of β on the behavior becomes negligible.

As the result, considering the data used in this study, it can be argued that the presence of slope has a very significant effect on the failure behavior of shallow foundations located within a quarter of the width of the foundation and should be carefully examined for both static and dynamic loading conditions. It can be stated that the safety of a shallow foundation, which is behind the slope by the width of the foundation, is not affected by the presence of the slope. For static conditions, the increase of q leads to decrease the FoS value as expected. Besides, the increase of the L distance increases the system safety. There can be calculated a directly proportional relationship between the increase of the FoS value with the increasing L distance for static conditions. The increasing tendency of the FoS value depending on the increase of L decreases with the decrease of the loading magnitude. In addition, the remarkable point in these analysis is that even when the load magnitude was at the lowest level, the increase in the interaction distance L could not equalize the safety number values obtained. Therefore, it can be said that determining the foundation load at the correct level is of great importance in determining the slope-foundation interaction distance for static conditions. In such a case that the foundation has been located closer to the slope crest, the increase of the loading magnitude has led the system to fail. Therefore, the magnitude of the surcharge loading

is especially an important state to be evaluated throughout the static analysis.

5. REFERENCES

1. Dey, A., Acharyya, R., Alammyan, A. 2019. Bearing Capacity and Failure Mechanism of Shallow Footings on Unreinforced Slopes: a State-of-the-art Review, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 1-14.
2. Akbay Arama, Z., Akın, M.S., Çinicioğlu, S.F., 2018. Komşu Zemin Yapılarının Parametrik Analizi "Dolgu-Şev Etkileşimi". *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 23(2), 109-128.
3. Peters, R.G., 2011. Advanced Analysis of Shallow Foundations Located Near Slopes, University of Southern Queensland, Faculty of Engineering and Surveying, Dissertation Thesis, Queensland, 170.
4. Yamamoto, K., 2010. Seismic Bearing Capacity of Shallow Foundations Near Slopes Using the Upper-bound Method, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 4(2), 255-267.
5. Cascone, E., Casablanca, O., 2016. Static and Seismic Bearing Capacity of Shallow Strip Footings, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 84(2016), 204-223.
6. Cong, S., Tang, L., Ling, X., Geng, L., Lu, J. 2018. Boundary Effect on the Seismic Response of a Three-dimensional Soil Slope with a Shallow Foundation on Top, *KSCCE Journal of Civil Engineering*, 22(4), 1130-1140.
7. Raj, D., ASCE, S.M., Singh, Y., ASCE, M., Shukla, S.K., ASCE, M., 2018. Seismic Bearing Capacity on Strip Foundation Embedded in $c-\phi$ Soil Slope, *Int. J. Geomech.*, 18(7), 04018076-1-16.
8. Xiao, Y., Zhao, M., Zhang, R., Zhao, H., Wu, G., 2019. Undrained Bearing Capacity of Strip Footings Placed Adjacent to Two-layered Slopes, *Int. J. Geomech.*, 19(8), 06019014-1-18, Technical Note.
9. Yang, S., Leshchinsky, B., ASCE, M., Cui, K., Zhang, F., Gao, Y., 2019. Unified Approach Toward Evaluating Bearing Capacity of Shallow Foundations near Slopes, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 145(12), 04019110-1-16.
10. Izadi, A., Soumehsaraei, M.N.S., Chenari, R.J., Ghorbani, A., 2019. Pseudo-static Bearing Capacity of Shallow Foundations on Heterogeneous Marine Deposits Using Limit Equilibrium Method, *Marine Georesources & Geotechnology*, 37(10), 1163-1174.
11. Fatahi, B., Huang, B., Yeganeh, N., Terzaghi, S., Banerjee, S., 2020. Three-dimensional Simulation of Seismic Slope-foundation-Structure Interaction for Buildings Near Shallow Slopes, *Int. J. Geomech.*, 20(1), 04019140-1-20.
12. Yang, S., Leshchinsky, B., Cui, K., Zhang, F., Gao, Y. 2021. Influence of Failure Mechanism on Seismic Bearing Capacity Factors for Shallow Foundations Near Slopes, *Geotechnique*, 71(7), 594-607.
13. Maula, B.H., Zhang, L., 2011. Assessment of Embankment Factor Safety Using Two Commercially Available Programs in Slope Stability Analysis, *Procedia Engineering* 14, 559-566.
14. Özmen, B.O., 2019. Modelling the Variability in Seismically Induced Slope Displacements Due to Ground Motion Selection. MSc. Thesis, Middle East Technical University.
15. PLAXIS, Connect edition V21.01 Scientific Manual, BENTLEY.
16. Wieland, M., 2018. Application of Pseudo-static Analysis in Seismic Design and Safety Evaluation of Embankment Dams. 16th European Conference on Earthquake Engineering.
17. Bowles, J.E., 1988. *Foundation Analysis and Design*. New York, McGraw-Hill.
18. AFAD, 2020. <https://tadas.afad.gov.tr/waveform-detail/215676>, Access date: 08.04.2021.

Yünlü ve Pamuklu Kumaşların Yer Fıstığı Tohum Kabuğuyla Boyanması ve Renk Haslıklarının İncelenmesi

Halil ÖZDEMİR*¹ ORCID 0000-0001-8575-7317

¹Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Osmaniye Meslek Yüksekokulu, Tekstil, Giyim, Ayakkabı ve Deri Bölümü, Osmaniye

Geliş tarihi: 04.01.2022

Kabul tarihi: 21.03.2022

Atıf şekli/ How to cite: ÖZDEMİR, H., (2022). Yünlü ve Pamuklu Kumaşların Yer Fıstığı Tohum Kabuğuyla Boyanması ve Renk Haslıklarının İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37(1), 143-157.

Öz

Çalışma kapsamında ilk önce ham ve kurutulmuş fıstık tohum kabukları tedarik edilmiş, daha sonra kabuklar temizlenmiş, öğütülmüş ve ekstrakte edilmiştir. Daha sonra elde edilen doğal boyarmadde ile IR numune boyama makinesinde çektirme boyama yöntemine göre yünlü ve pamuklu kumaşlar boyanmıştır. Boyama işleminde farklı mordan (demir, bakır ve alüminyum sülfat) ve farklı mordan teknikleri (ön, birlikte ve son) kullanılmıştır. Boyanan numuneler için spektrofotometrede renk analizleri ve boyalı kumaşlara sürtünme, yıkama ve ışığa karşı renk dayanımlarını tespit edebilmek için haslık testleri yapılmıştır. Spektrofotometrik renk değerleri ve haslık değerlerine mordan, mordanlama tekniği ve pH değerinin etkisi istatistiksel olarak belirlenmiştir. Boyamalar sonucunda fıstık kabuğundan genel itibariyle kahverengi ve tonlarında renkler elde edilmiş, mordan kullanılarak yapılan boyamalar neticesinde özellikle yünlü kumaşlar için daha yüksek K/S değerlerine ve daha koyu tonlara ulaşıldığı tespit edilmiştir. Haslık testleri değerlendirildiğinde ise doğal boyamalar için yüksek sayılabilecek değerlere ulaşılmıştır. Mordan ve mordanlama tekniğinin L* (açıklık-koyuluk) ve K/S (renk kuvveti) değerleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkisi olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak fıstık tohum kabuğunun tekstil terbiyesinde boyarmadde olarak kullanılabileceği ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Yer fıstığı tohum kabuğu, Doğal boyama, Mordanlama, Renk ölçümü, Haslık

Dyeing of Wool and Cotton Fabrics with Peanut Seed Shell and Investigation of Color Fastness

Abstract

In this context, raw and dried peanut seed shells were supplied firstly, then the shells were cleaned, ground and extracted. Then, wool and cotton fabrics were dyed according to the exhaust dyeing method

in the IR sample dyeing machine. Different mordant (ferrous, copper and alum sulfate) and different mordant techniques (pre, simultaneous and post mordanting) were used in the dyeing process. The color analyzes were made for the dyed samples in the spectrophotometer. The fastness tests were performed in order to determine the color resistance of rubbing, washing and light to dyed fabrics. The effects of mordant, mordanting technique and pH value on spectrophotometric color and fastness values were determined statistically. As a result of dyeing, the brown and shades of colors were obtained from peanut shell. It was found that higher K/S values and darker tones were achieved, especially for woolen fabrics using mordant. When the fastness tests are evaluated, high values have been reached for natural dyeing. It was determined that mordant and mordanting technique had a significant effect on L* (lightness-darkness) and K/S (color strength) values statistically. As a result, it has been revealed that peanut seed shell can be used as a dyestuff in textile finishing.

Keywords: Peanut seed shell, Natural dyeing, Mordanting, Color measurement, Fastness

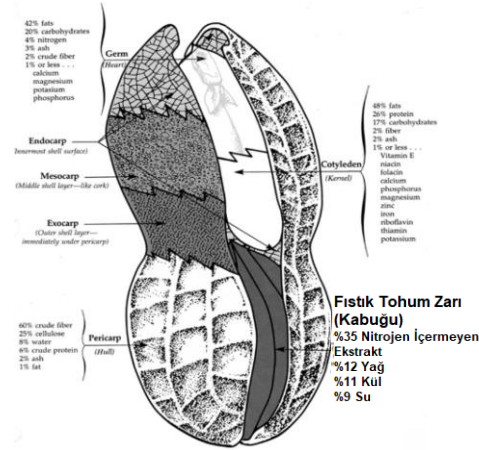
1. GİRİŞ

Tarih öncesi çağlardan beri doğal boyalar tekstil, gıda ve deri sektöründe renklendirme amaçlı yaygın olarak kullanılmakta, özellikle yün, ipek, pamuk gibi protein ve selülozik elyaflarının boyanmasında tercih edilmektedir. Doğal boyarmaddeler, çoğunlukla bitkilerin kök, gövde ve yapraklarından, bazı asalak böceklerden, deniz kabuklularından, yosun ve mantarlardan ekstrakte edilen (özütlenen) renkli maddelerdir. Dünyada ekseriyetle geleneksel ev tekstil ürünlerinde tercih edilen doğal boyarmaddelerin çoğunun bitkisel kaynaklı olduğu söylenebilmektedir. 1. sanayi devriminin sonlarına doğru tekstil boyarmaddelerinin kimyasal olarak sentezlenerek üretilmesiyle tekstil sanayisinde doğal boyarmaddelerin kullanımı giderek azalmış, geçtiğimiz yüzyılda ise doğal boyarmaddeler daha çok geleneksel ürünlerin boyamalarında tercih edilmiş ve kaybolma noktasına gelmiştir. Ancak son yıllarda, özellikle tekstil terbiye işletmelerindeki birçok yardımcı kimyasalla birlikte kullanılan sentetik boyarmaddelerin zehirli, kanserojen özellikler göstermesi ve çevre kirliliğine neden olması sebebiyle, yaşanabilir bir çevre ve insan sağlığını önceleyen bir yaklaşım sergileyen çoğu gelişmiş ülkeler ve toplumlar hem farkındalığın artması hem de sürdürülebilir üretim için doğal boyarmaddelerin kullanımlarını yeniden gündeme getirmişlerdir. Bu sebeple, biyolojik olarak bozulabilir olması (parçalanabilir), zehirli (toksik) olmaması, insan sağlığı ve atık su kirliliği

(kontaminantı) için bir sorun teşkil etmemesi nedeniyle doğadaki bitkilerden elde edilen doğal boyarmaddelerin kullanımı artmaya başlamıştır [1-3].

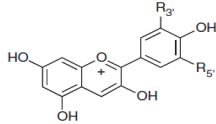
Türkiye’de Akdeniz ikliminin görüldüğü bölgeler olmak üzere özellikle Osmaniye ve çevresinde büyük oranda tarımsal üretimi yapılan Baklagiller familyasındaki yer fıstığının, atıştırmalık çerez, fıstık yağı, fıstık ezmesi, şekerleme ve katkı maddesi (tatlıcılıkta) üretimleriyle gıda sanayisine ve istihdama büyük katkısı bulunmaktadır (Şekil 1). İçerik olarak ağırlıklı lifsi yapıdaki selülozdan oluşan yerfıstığı dış kabuğu; mobilya sektöründe sunta yapımında, sığır yetiştiriciliğinde kaba yem olarak, mantar yetiştiriciliğinde ve odun yapımında dolgu maddesi olarak, yapay kömür imalatında, kümes hayvancılığında altlık, malç olarak ve karbonizasyon tekniğiyle adsorban elde etmek üzere kullanılabilen değerli bir bitkidir [4].

Yerfıstığı tohumunun kabuğu ise hem fıstık yağı hem de kabuksuz fıstık üretiminde kabuk kırma ve ayırma işlemi ile atık ürün haline gelebilmektedir. Yerfıstığının yağı çıkarıldıktan sonra geriye kalan küspede protein ve diğer maddelerin yanı sıra, doğal boyarmadde içerdiği düşünülen yer fıstığı kabuğu da bulunmaktadır. İç fıstık üretiminde ayıklama (sorting) makinesinde yapılan üretim aşamasında fıstık iç kabuğu atık olarak ayrılıp elde edilebilmektedir. Fıstık iç kabuğu günümüzde genellikle hayvan yemi olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 1. Yer fıstığının kimyasal bileşenleri [5]

Bu çalışma kapsamında atık halde tedarik edilen yer fıstığı kabuk zarlarından ekstrakte edilen, önceki çalışmalar bölümünde özetlenen ve yapısında olduğu tespit edilen Antosiyanin (Cyanidin) (Şekil 2) doğal boyarmaddesiyle yünlü ve pamuklu kumaşlar, farklı mordan maddeleri kullanılarak laboratuvar ortamında Infrared (IR) numune boyama makinesinde çektirme yöntemine göre boyanmış, elde edilen renkler spektrofotometrik olarak değerlendirilmiş ve bazı haslık özellikleri belirlenmiştir.



İsim	R ₃	R ₅	λ _{max} ^a (nm)	Renk
Pelargonidin	H	H	520	Turuncu
Cyanidin	OH	H	535	Kırmızı Turuncu
Delphinidin	OH	OH	545	Mor
Peonidin	OCH ₃	H	532	Kırmızı
Petunidin	OCH ₃	OH	543	Mor
Malvidin	OCH ₃	OCH ₃	542	Mor

a: %0,01 HCl içeren metanolde görünür spektrumda maksimum absorpsiyon

Şekil 2. Antosiyaninlerin moleküler yapısı, antosiyanidin [6]

1.1. Önceki Çalışmalar

Fıstık kabuğundan doğal boyarmadde eldesi ve doğal boyama konusunda yapılan bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir;

Chhipa ve arkadaşları, (2017a) çalışmalarında, pamuk, keten, jüt, pamuk/jüt, ipek, saten ve polyester esaslı çeşitli dokuma kumaşları bakır sülfat mordanı kullanarak yer fıstığı tohumu kabuğundan elde edilen doğal boyarmadde ile farklı renk yüzdelerinde boyanmış, doğal boyama sonrası renkli kumaşlara yıkama, sürtünme ve ışık gibi haslık testleri yapılmıştır. Kahverengi, yeşil ve tonlarında renkler elde edilmiş, pamuk ve keten başta olmak üzere kumaşların yüksek haslık değerleri gösterdiği belirtilmiştir [7].

Chhipa ve arkadaşları, (2017b) diğer benzer bir çalışmalarında ise, %100 pamuklu kumaşlar yer fıstığı kabuğundan ekstrakte edilmiş doğal boyarmadde ile farklı mordanlama teknikleri (ön, birlikte ve son) ve farklı mordanlar kullanarak farklı renk yüzdelerinde boyanmış ve sonrasında kumaşlara haslık testleri uygulanmıştır. Sonuçta, bakır sülfat mordanı ile yeşil ve tonlarında, demir sülfat mordanı ile kahve/sarı tonlarında ve alüminyum sülfat mordanı ile ise pembe tonlarında renkler elde edilmiştir. Ön mordanlama tekniğinin ve demir sülfat mordanının spektrofotometrik renk değerleri (K/S-renk kuvveti gibi) ve haslık değerleri açısından en uygun olduğunu belirtmişlerdir [8].

Karen E. Constanza ve arkadaşları, (2012), Wanida E. Lewis ve arkadaşları, (2013) ve Jianmei Yu ve arkadaşları, (2005 ve 2006)'nın fıstık kabuğu ile ilgili çalışmalarında, Jin Hwan

Lee ve arkadaşları, (2009)'nın aynı familyadan olan soya fasulyesi ile ilgili çalışmasında ve Huayin Wang ve arkadaşları, (2016) ve Chuanguang QIN ve arkadaşları, (2010)'nın antosiyaninleri konu alan çalışmalarında HPLC analizleri ve elde edilen kromatogram absorbans değerleri ve alıkonma zamanları incelendiğinde [9-15], M. Monica Giusti and Taylor C. Wallace (2009) "Hanbook of Natural Colorants" isimli kitabının "Flavonoids as Natural Pigments" bölümünde grafiklerle belirtilen UV-spektrumları ve λ_{max} değerleri göz önüne alındığında fıstık kabuğundaki boyarmaddenin Flavanoid pigment grubuna ait Antosiyanin/Siyanidin olduğu belirlenmiştir [6].

2. MATERYAL VE METOT

Osmaniye'de bulunan fıstık üreticileri üzerinden tedarik edilen fıstık iç kabukları güneşte bekletilip üzerindeki neminin giderilmesi ve kuruması sağlanmış, daha sonra kaba elekten geçirilerek fıstık haricindeki yabancı maddelerden arındırılmıştır. Daha sonra kabuklar, ekstraksiyon ve laboratuvarında yapılacak numune boyama işlemleri için laboratuvar tipi öğütücüden ve ardından tekrar elekten geçirilerek son halini almıştır. Fıstık kabuğundan elde edilen doğal boyarmaddenin farklı kumaşlardaki boyanabilirliğini görmek, boyama prosesindeki pH değerinin, kullanılan mordan ve mordanlama yönteminin etkisini belirleyebilmek ve bazı haslık özelliklerini tespit edebilmek amacıyla bir optimizasyon çalışması yapılarak, yünlü ve pamuklu kumaşlara laboratuvar ortamında boyama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Numune boyama çalışması için metanol ve/veya etanol gibi kimyasallar ile ekstraksiyon yapmak yerine, çevreci ve sağlığa duyarlı olması sebebiyle su ile ekstraksiyon yapmaya karar verilmiştir.

Yünlü veya pamuklu numune kumaş ağırlığına göre %200 oranında öğütülmüş ham (kavrulmamış) fıstık kabuğu (normal çile boyama için %100 kullanılmakta, kumaş daha sıkı, kompakt bir yapıya sahip olduğu için iki katı alınmıştır), 1/50 flotte oranına göre saf su içerisinde 1 (bir) saat kaynatılıp, süzülerek

ekstraksiyon tamamlanmış ve buzdolabında muhafaza altına alınmıştır.

Boyamalarda kullanılan yün test kumaşı (James Heal) yaklaşık 80 gr/m² ağırlığında, bezayağı dokusuna sahip, TS 4458 ISO 105-F01 renk haslığı testlerinde kullanılabilen bir refakat kumaştır. Pamuklu test kumaşı ise yün ile benzer şekilde yaklaşık 80 gr/m² ağırlığında, bezayağı dokusuna sahip, ISO 105-F09 sürtünmeye karşı renk haslığı testlerinde kullanılabilen bir refakat kumaştır. 3 gram ağırlığındaki yünlü ve pamuklu numune kumaşların boyanmasında kullanılmak üzere ayrı ayrı ekstraksiyon işlemleri yapılmıştır.

2.1. Boyama ve Renk Ölçümü

Boyamalar, IR Numune Boyama Makinesinde 200 ml hacmindeki paslanmaz çelik tüplerin içinde gerçekleştirilmiştir. Boyamalar için mordanın etkisini tespit edebilmek amacıyla 3 farklı mordan maddesi (Demir Sülfat, Bakır Sülfat ve Potasyum Alüminyum Sülfat (Şap)) ve 3 farklı mordanlama tekniği (Ön Mordanlama - Birlikte Mordanlama ve Son Mordanlama) kullanılmıştır. Yün ve pamuk boyamasında pH'nın etkisini de görmek amacıyla 5 (beş) farklı pH değeri kullanılmış, böylece toplamda 56 boyama gerçekleştirilmiştir (Çizelge 1). Pamuklu kumaşlar 60 °C'de, Yünlü kumaşlar ise 90 °C'de boyanmıştır. pH ayarlanmaları için asetik asit ve sodyum hidroksit kullanılmıştır.

Boyanmış ipliklerin renk koordinatlarının belirlenmesi için Minolta CM 3600 D model spektrofotometre ile 400-700 nm dalga boyu arasında, D65/10° ışık kaynağında ölçümler gerçekleştirilmiştir. Boyama kuvveti olarak değerlendirilen K/S (Color Strength) değerleri Kubelka Munk (1) eşitliğine göre hesaplanmıştır. Ölçümlerde hatayı minimize etmek ve en doğru renk değerlerini tespit etmek amacıyla numunelerinin 5 farklı bölgesinden alınan ölçümlerin ortalaması değerlendirilmiştir [16].

$$K/S = (1 - R^2) / 2R \quad (1)$$

Eşitlikte K; ışık absorpsiyonu ile ilgili bir sabit olup, çoğunlukla boyarmaddeye bağlıdır. S; ışık

saçılımı (yansıması) ile ilgili bir sabit olup, sadece tekstil materyaline bağlıdır. R ise maksimum ışık absorpsiyonunun dalga boyunda (400 nm) ölçülen boyalı numunenin yansıma değeridir [16].

Renk farkının tespit edilmesinde ise CIELab formülasyonu (2) kullanılmış (DIN 6174), L*; açıklık-koyuluk, a*; kırmızılık-yeşillik, b*, sarılık-mavilik değerleridir. Örneklerin ΔE^* değeri, renk farklılığının ifadesidir. $\Delta E^* < 1$ ise, karşılaştırılan iki renk arasında farkın az olduğunu; $\Delta E^* > 1$ ise daha fazla olduğunu ifade etmektedir. ΔL^* değerinin (-) olması, örneğin standarda göre daha koyu olduğunu, (+) olması ise daha açık olduğunu göstermektedir. ΔC^* değerinin (+) olması ise yüksek kromayı yani doygunluğu ifade eder. a* değeri arttıkça renk kırmızıya, azaldıkça yeşile, b* değeri arttıkça renk sarıya, azaldıkça maviye dönmektedir [16].

$$\Delta E^* = \left[(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 + (\Delta L^*)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

Boyamalar sonucu elde edilen renkler (Şekil 3), PANTONE sistemine göre standart renk katalogları üzerinden belirlenmiştir [17].

Çizelge 1. Boyama planı

Uygulama		pH	Yün	Pamuk
Mordan kullanılmamış		-----	+	
Mordan kullanılmamış		-----		+
Mordanlama	Mordan	pH	Yün	Pamuk
1. Ön mordanlama	Demir Sülfat FeSO ₄ .7H ₂ O	asidik (~3)	+	
		asidik (~5)	+	
		nötr	+	+
		bazik (~9)		+
		bazik (~11)		+
2. Birlikte mordanlama	Bakır Sülfat CuSO ₄ .5H ₂ O	asidik (~3)	+	
		asidik (~5)	+	
		nötr	+	+
		bazik (~9)		+
		bazik (~11)		+
3. Son mordanlama	P. Alümin. Sülfat AlK(SO ₄) ₂ . 12H ₂ O	asidik (~3)	+	
		asidik (~5)	+	
		nötr	+	+
		bazik (~9)		+
		bazik (~11)		+

2.2. Haslık Testleri

Tekstil de kullanım haslığı; kullanım sırasında ürünün maruz kalacağı etkilere karşı dayanımını ifade eden bir kavramdır. Genellikle günümüzde doğal boyarmaddelerle yapılan boyamalar için ürünün kullanılacağı yere göre sürtünme, yıkama ve ışık haslıklarının ön plana çıktığı görülmektedir.

Boyanmış numune kumaşların sürtünmeye karşı renk haslığı tayini TS EN ISO 105-X12 standardına göre "Crockmeter" cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir [18]. Yıkamaya karşı renk haslığı tayini TS EN ISO 105-C06 standardına göre "Yıkama haslığı test cihazı" kullanılarak yapılmıştır. [19]. Işığa karşı renk haslığı tayini ise TS EN ISO 105-B02 standardına göre "ATLAS marka Xenotest ALPHA model" yapay ışığa ve yapay hava şartlarına karşı renk haslığı test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir [20].

2.3. İstatistiksel Çalışma

Laboratuvar ortamında boyanan yün ve pamuklu kumaşların istatistiksel analizi IBM SPSS 22 programı kullanılarak yapılmıştır. Bağımsız değişkenler olarak seçilen mordan, mordanlama tekniği ve pH değerlerinin, bağımlı değişken olarak spektrofotometrik olarak tespit edilen renk değerleri (L*, K/S vb.) ile haslık değerlerine etkisi istatistiksel olarak belirlenmeye çalışılmış, belirlenen gruplar arasındaki farklılıkların belli düzeylerdeki anlamlılık durumları analiz edilmiş ve yorumlanmıştır.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

3.1. Spektrofotometrik Ölçüm Bulguları

Yünlü ve pamuklu kumaşların spektrofotometrik ölçüm sonuçları Çizelge 2 ve 3'te belirtilmiş, fıstık kabuğu ekstraktı ile boyanmış yünlü ve pamuklu kumaş örnekleri de Şekil 3'de gösterilmiştir.

Yünlü kumaş için mordan kullanmadan yapılan boyama sonucunda açık kahverengi tonu elde edilirken demirsülfat ve bakır sülfat mordanlarının kullanımı ile rengin koyulaştığı Çizelge 2'teki renk farkı (ΔE^*) değerlerinden açıkça görülmektedir.

Üç farklı mordanın (demirsülfat-bakır sülfat-Potasyum Alüminyum Sülfat) kullandığı boyamalarda, genel olarak Alüminyum Sülfat mordanı ile yapılan boyamaların K/S değerlerinin daha düşük ve L* değerlerinin daha yüksek olduğu ve rengin diğer boyamalara nazaran daha açık olduğu belirlenmiştir. K/S değerleri (Renk kuvveti) incelendiğinde ise en yüksek değerlere ön ve son mordanlama tekniğiyle demirsülfat ve bakır sülfat mordanlarıyla ulaşıldığı ve en düşük K/S değerlerinin ise birlikte mordanlama tekniğiyle yapılan boyamalar sonucunda ortaya çıktığı görülmektedir. pH değeri incelendiğinde ise pH'ın yükselmesi yani nötre yaklaşmasıyla açıklık-koyuluk (L*) değerlerinin yükseldiği ve rengin açıldığı gözlenmiştir. Yünlü kumaşların boyanmasında pH değerinin düşürülmesinin rengi fazla değiştirmede, literatürde de belirtildiği gibi yapılan deneysel çalışmayla pH 4-5 civarındaki

boyamaların renk açısından uygun olabileceği belirlenmiştir (Şekil 4).

Pamuklu kumaşlar için mordan kullanmadan yapılan boyama sonucunda ise kestane rengi elde edilirken, üç farklı mordan (demirsülfat-bakır sülfat-Potasyum Alüminyum Sülfat) kullandığında genel olarak K/S ve L* değerlerinde yündeki gibi çok aşırı bir farklılık olmadığı ancak Potasyum Alüminyum Sülfat mordanı ile yapılan boyamalarda K/S değerlerinin düştüğü belirlenmiştir (Çizelge 3). Buna rağmen pH değerinin yükseltilmesi ile açıklık-koyuluk (L*) değerlerinin düştüğü, yani rengin koyulaştığı tespit edilmiş, K/S değerleri açısından bütün boyamalar için en yüksek değere, pH 9 ile ulaşıldığı belirlenmiş, pH değerinin daha da yükseltilmesinin önemli bir fark oluşturmadığı sonucu çıkarılmıştır (Şekil 5).

Doğal Boyama (Mordansız)				Doğal Boyama (Mordansız)			
Mordan	Ön Mordanlama	Birlikte Mordanlama	Son Mordanlama	Mordan	Ön Mordanlama	Birlikte Mordanlama	Son Mordanlama
FeSO ₄ ·7H ₂ O	1	10	19	FeSO ₄ ·7H ₂ O	1	10	19
	2	11	20		2	11	20
	3	12	21		3	12	21
CuSO ₄ ·5H ₂ O	4	13	22	CuSO ₄ ·5H ₂ O	4	13	22
	5	14	23		5	14	23
	6	15	24		6	15	24
AlK(SO ₄) ₃ ·12H ₂ O	7	16	25	AlK(SO ₄) ₃ ·12H ₂ O	7	16	25
	8	17	26		8	17	26
	9	18	27		9	18	27

Şekil 3. Fıstık kabuğu ekstraktı ile boyanmış yünlü kumaş (sol) ve pamuklu kumaş (sağ) örnekleri (1-9; ön mordanlama, 10-18; birlikte mordanlama ve 19-27; son mordanlama)

3.2. Haslık Bulguları

Yünlü ve pamuklu kumaşlara ait haslık sonuçları Çizelge 4 ve Çizelge 5’de yer almaktadır.

Sürtmeye Karşı Renk Haslığı:

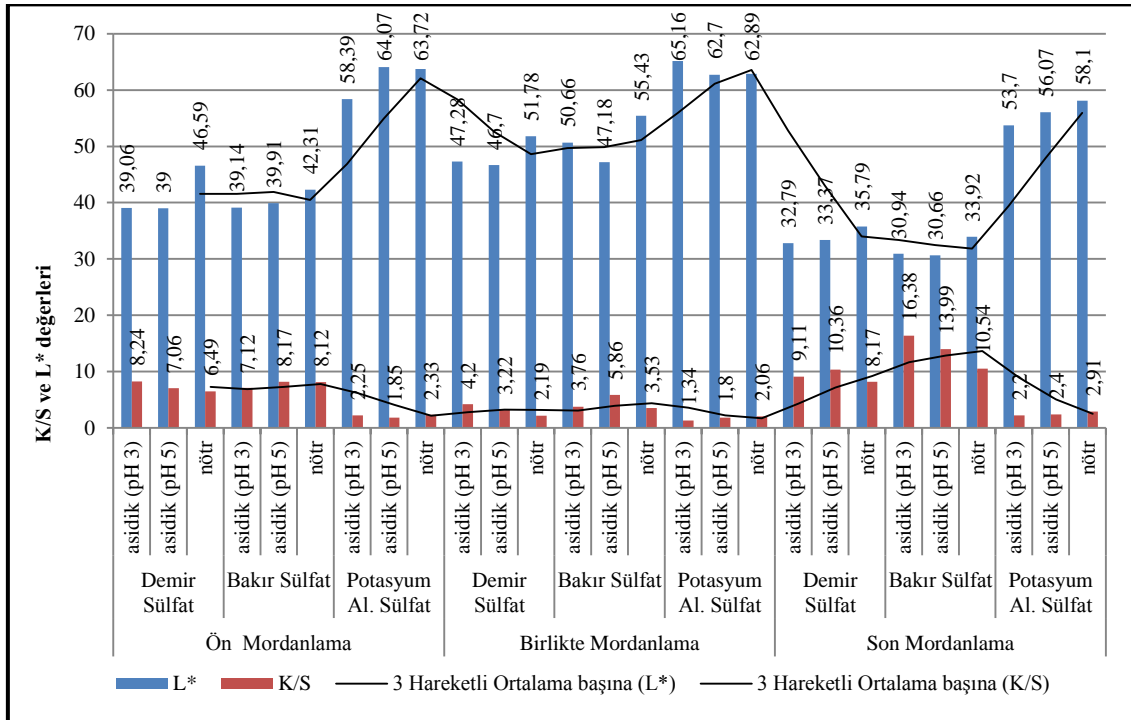
Yünlü kumaşların sürtme haslığı sonuçlarına göre demir sülfat mordanı kullanımı hariç genel olarak 4 civarında haslık değerleri bulunmuştur. Demir sülfat mordanı kullanımı ile yapılan boyamalarla haslık değerinin 2/3 değerine kadar düştüğü görülmektedir. pH değerinin ve mordanlama tekniğinin haslık üzerinde çok etkili olduğu söylenememekle beraber genel olarak pH 7 (nötr) de ki haslık değerlerinin daha düşük olduğu gözlenmiştir.

Pamuklu kumaşların sürtme haslığı sonuçları incelendiğinde ise en düşük haslık değerinin bakır sülfat mordanı kullanımı ile nötr ortamda boyanmış kumaşta olduğu, genel olarak haslık değerlerinin 4 civarında olduğu tespit edilmiştir.

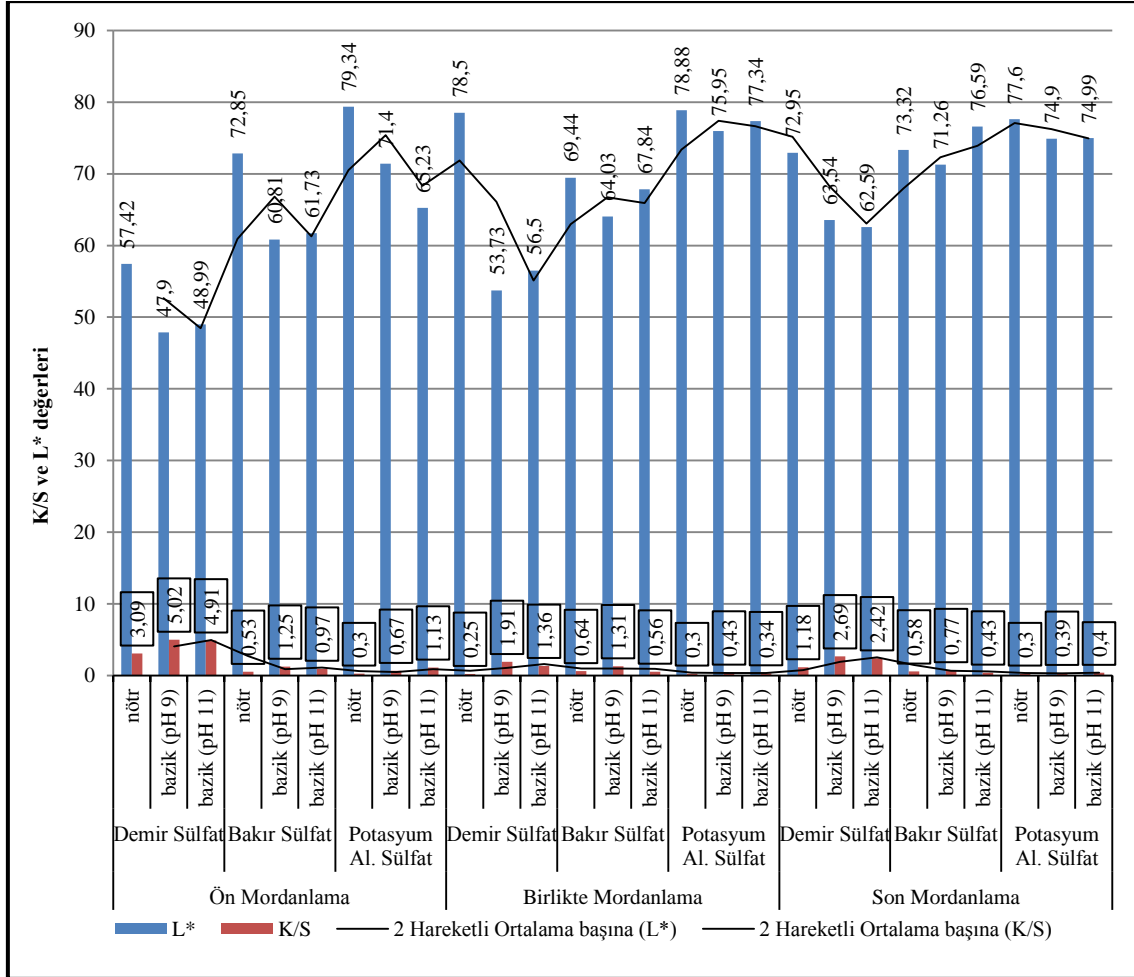
pH değerinin ve mordanlama tekniğinin haslık üzerinde çok etkili olduğu söylenememekle beraber, genel olarak pH 7 (nötr) de yapılan boyalarda özellikle ön mordanlama tekniğinde haslık değerlerinin daha düşük olduğu gözlenmiştir.

Yıkamaya Karşı Renk Haslığı:

Yünlü kumaşların yıkama haslığı sonuçlarına göre pamuklu refakat bezini lekeleme haslık derecesinin mordanlama tekniği ve pH değerlerinden etkilenmeyerek 4/5 değerinde olduğu tespit edilmiştir. Ancak yünlü refakat bezi lekeleme haslık derecesine bakıldığında mordanlama tekniğinin önemli olduğu tespit edilmiş, en düşük haslık değerleri ön mordanlama ile yapılan boyamalar sonucu ortaya çıktığı belirlenmiştir. Çok lifli refakat bezi kullanılarak yapılan deneyde pamuk ve yün haricindeki Asetat, PA (poliamid), PES (polyester), Akrilik refakat kumaşlarda lekelenme tespit edilmeyip haslık değerleri 5 değerinde belirlenmiştir.



Şekil 4. Yünlü kumaşlara ait K/S ve L* değerleri



Şekil 5. Pamuklu kumaşlara ait K/S ve L* değerleri

Pamuklu kumaşların yıkama haslığı sonuçları incelendiğinde ise yünlü refakat bezini lekeleme haslık derecesinin mordanlama tekniği ve pH değerlerinden etkilenmeyerek 4/5 değerinde olduğu, ancak demir sülfat ön mordanlama yapılan kumaşların haslık değerinin 4 değerine düştüğü tespit edilmiştir. Pamuklu refakat bezi lekeleme haslık derecesine bakıldığında genel olarak mordanlama tekniğinin önemli olduğu ve en yüksek haslık değerlerinin “birlikte mordanlama” ile yapılan boyamalar sonucu ortaya çıktığı belirlenmiştir. Çok lifli refakat bezinin kullanıldığı deneyde pamuk ve yün haricindeki Asetat, PA (poliamid), PES (polyester), Akrilik elyaf bantlarında lekelenme tespit edilememiştir.

Yapay Işığa Karşı Renk Haslığı:

Yünlü ve pamuklu kumaşların ışık haslığı sonuçları incelendiğinde, mordan kullanılarak yapılan boyamaların mordan kullanmadan yapılan standart boyamaya nazaran genel olarak daha yüksek ışık haslık değerine sahip olduğu belirlenmiştir.

Mordanlama tekniğinin ve pH değerinin yünlü ve pamuklu kumaşların ışık haslığı üzerindeki etkisi bir sonraki “İstatistiksel Bulgular” bölümünde açıklanmaya çalışılmıştır.

Çizelge 2. Mordan kullanımının ve pH değerinin yünlü kumaşın boyanmasındaki etkileri, renk ölçüm ve renk farkı değerleri

Mordanlama tekniği	Mordan	pH	L*	a*	b*	C*	h	K/S	*ΔE	D65 (ışık kaynağı)	Renk
Mordan yok	-----	-----	43,22	16,16	14,35	21,61	41,62	5,37			Açık kahve
Ön mordanlama	FeSO ₄ .7H ₂ O	Asidik (pH 3)	39,06	8,28	12,74	15,2	56,98	8,24	9,05	numune koyu, yeşil, mavi ve zayıf	Koyu kahve
		Asidik (pH 5)	39	8,47	10,72	13,66	51,68	7,06	9,5	numune koyu, yeşil, mavi ve zayıf	Koyu kahve
		Nötr	46,59	6	15,09	16,24	68,3	6,49	10,72	numune açık, yeşil, sarı ve zayıf	Açık sarı
	CuSO ₄ .5H ₂ O	Asidik (pH 3)	39,14	13,36	10,8	17,18	38,96	7,12	6,08	numune koyu, yeşil, mavi ve zayıf	Kızıl kahve
		Asidik (pH 5)	39,91	11,92	13,54	18,04	48,64	8,17	5,44	numune koyu, yeşil, mavi ve zayıf	Kızıl kahve
		Nötr	42,31	11,91	16,45	20,31	54,09	8,12	4,82	numune koyu, yeşil, sarı ve zayıf	Açık kızıl kahve
	AlK(SO ₄) ₂ .12H ₂ O	Asidik (pH 3)	58,39	16,45	16,08	23	44,34	2,25	15,27	Numune açık, kırmızı, sarı ve kuvvetli	Kestane rengi
		Asidik (pH 5)	64,07	11,01	16,7	20	56,59	1,85	21,61	numune açık, yeşil, sarı ve zayıf	Kestane rengi
		Nötr	63,72	9,38	19,46	21,6	64,27	2,33	22,19	numune açık, yeşil, sarı ve zayıf	Açık kahve
Birlikte mordanlama	FeSO ₄ .7H ₂ O	Asidik (pH 3)	47,28	2,72	7,28	7,77	69,53	4,2	15,72	numune açık, yeşil, mavi ve zayıf	Yeşilimsi kahve
		Asidik (pH 5)	46,7	2,14	2,69	3,44	51,47	3,22	18,57	numune açık, yeşil, mavi ve zayıf	Yeşilimsi kahve
		Nötr	51,78	2,22	1,93	2,94	40,95	2,19	20,54	numune açık, yeşil, mavi ve zayıf	Bej (ekru)
	CuSO ₄ .5H ₂ O	Asidik (pH 3)	50,66	7,87	11,92	14,28	56,59	3,76	11,4	numune açık, yeşil, mavi ve zayıf	Koyu bej (ekru)
		Asidik (pH 5)	47,18	9,7	15,61	18,38	58,14	5,86	7,68	numune açık, yeşil, sarı ve zayıf	Koyu bej (ekru)
		Nötr	55,43	10,53	18,08	20,92	59,79	3,53	13,95	numune açık, yeşil, sarı ve zayıf	Bej (ekru)
	AlK(SO ₄) ₂ .12H ₂ O	Asidik (pH 3)	65,16	7,93	10,87	13,46	53,89	1,34	23,69	numune açık, yeşil, mavi ve zayıf	Kestane rengi
		Asidik (pH 5)	62,7	8,46	13,53	15,96	57,97	1,8	20,96	numune açık, yeşil, mavi ve zayıf	Kestane rengi
		Nötr	62,89	8,98	16,93	19,17	62,05	2,06	21,1	numune açık, yeşil, sarı ve zayıf	Koyu bej (ekru)
Son mordanlama	FeSO ₄ .7H ₂ O	Asidik (pH 3)	32,79	6,93	6,68	9,63	43,97	9,11	15,9	numune koyu, yeşil, mavi ve zayıf	Yeşilimsi kahve
		Asidik (pH 5)	33,37	5,15	8,23	9,71	57,99	10,36	15,99	numune koyu, yeşil, mavi ve zayıf	Koyu kahve
		Nötr	35,79	7,9	8,49	11,6	47,09	8,17	12,56	numune koyu, yeşil, mavi ve zayıf	Kurşuni yeşil
	CuSO ₄ .5H ₂ O	Asidik (pH 3)	30,94	11,33	13,82	17,87	50,65	16,38	13,2	numune koyu, yeşil, mavi ve zayıf	Kızıl kahve
		Asidik (pH 5)	30,66	11,88	12,04	16,91	45,38	13,99	13,47	numune koyu, yeşil, mavi ve zayıf	Kızıl kahve
		Nötr	33,92	9,98	11	14,85	47,79	10,54	11,65	numune koyu, yeşil, mavi ve zayıf	Koyu kahve
	AlK(SO ₄) ₂ .12H ₂ O	Asidik (pH 3)	53,7	12,82	10,21	16,39	38,55	2,2	11,76	numune açık, yeşil, mavi ve zayıf	Kestane rengi
		Asidik (pH 5)	56,07	10,92	12,89	16,89	49,74	2,4	13,96	numune açık, yeşil, mavi ve zayıf	Kestane rengi
		Nötr	58,1	6,75	14,31	15,82	64,74	2,91	17,6	numune açık, yeşil, mavi ve zayıf	Açık kahve

*standart = mordan kullanılmamış

Çizelge 3. Mordan kullanımının ve pH değerinin pamuklu kumaşın boyanmasındaki etkileri, renk ölçüm ve renk farkı değerleri

Mordanlama tekniği	Mordan	pH	L*	a*	b*	C*	h	K/S	*ΔE	D65 (ışık kaynağı)	Renk	
Mordan yok	-----	-----	67,05	9,47	8,86	12,96	43,09	0,83			Kestane rengi	
Ön mordanlama	FeSO ₄ ·7H ₂ O	Nötr	57,42	8,03	16,22	18,1	63,65	3,09	12,2	numune koyu, yeşil, sarı, kuvvetli	Bej (ekru)	
		Bazik (pH 9)	47,9	9,84	15,79	18,61	58,06	5,02	20,38	numune koyu, kırmızı, sarı, kuvvetli	Koyu bej (ekru)	
		Bazik (pH 11)	48,99	11,35	16,98	20,43	56,25	4,91	19,89	numune koyu, kırmızı, sarı, kuvvetli	Koyu bej (ekru)	
	CuSO ₄ ·5H ₂ O	Nötr	72,85	6,06	6,56	8,93	47,3	0,53	7,11	numune açık, yeşil, mavi, zayıf	Açık kestane rengi	
		Bazik (pH 9)	60,81	12,74	9,67	15,99	37,2	1,25	7,1	numune koyu, kırmızı, sarı, kuvvetli	Kestane rengi	
		Bazik (pH 11)	61,73	11,68	5,77	13,03	26,31	0,97	6,54	numune koyu, kırmızı, mavi, kuvvetli	Kestane rengi	
	AlK(SO ₄) ₂ ·12H ₂ O	Nötr	79,34	3,04	6,62	7,28	65,3	0,3	14,04	numune açık, yeşil, mavi, zayıf	Açık mor	
		Bazik (pH 9)	71,4	8,62	10,65	13,7	51,02	0,67	4,78	numune açık, yeşil, sarı, kuvvetli	Kestane rengi	
		Bazik (pH 11)	65,23	11,94	12,92	17,59	47,25	1,13	5,09	numune koyu, kırmızı, sarı, kuvvetli	Kestane rengi	
	Birlikte mordanlama	FeSO ₄ ·7H ₂ O	Nötr	78,5	2,12	2,43	3,22	48,95	0,25	15,05	numune açık, yeşil, mavi, zayıf	Gümüş rengi
			Bazik (pH 9)	53,73	5,34	5,56	7,71	46,14	1,91	14,33	numune koyu, yeşil, mavi, zayıf	Kurşuni yeşil
			Bazik (pH 11)	56,5	3,21	2,4	4,01	36,84	1,36	13,87	numune koyu, yeşil, mavi, zayıf	Kurşuni yeşil
CuSO ₄ ·5H ₂ O		Nötr	69,44	7,98	6,7	10,42	40,02	0,64	3,55	numune açık, yeşil, mavi, zayıf	Kestane rengi	
		Bazik (pH 9)	64,03	10	12,73	16,19	51,83	1,31	4,94	numune koyu, kırmızı, sarı, kuvvetli	Kestane rengi	
		Bazik (pH 11)	67,84	10,92	2,5	11,2	12,9	0,56	6,57	numune açık, kırmızı, mavi, zayıf	Kestane rengi	
AlK(SO ₄) ₂ ·12H ₂ O		Nötr	78,88	3,36	5,16	6,16	56,91	0,3	13,81	numune açık, yeşil, mavi, zayıf	Açık mor	
		Bazik (pH 9)	75,95	5,66	7,96	9,77	54,59	0,43	9,72	numune açık, yeşil, mavi, zayıf	Mor	
		Bazik (pH 11)	77,34	5,13	6,62	8,37	52,23	0,34	11,39	numune açık, yeşil, mavi, zayıf	Mor	
Son mordanlama		FeSO ₄ ·7H ₂ O	Nötr	72,95	3,46	15,45	15,83	77,39	1,18	10,69	numune açık, yeşil, sarı, kuvvetli	Açık kahve
			Bazik (pH 9)	63,54	6,44	19,38	20,42	71,62	2,69	11,5	numune koyu, yeşil, sarı, kuvvetli	Kahve
			Bazik (pH 11)	62,59	5,58	17,91	18,76	72,68	2,42	10,81	numune koyu, yeşil, sarı, kuvvetli	Kahve
	CuSO ₄ ·5H ₂ O	Nötr	73,32	3,84	8,56	9,38	65,85	0,58	8,43	numune açık, yeşil, mavi, zayıf	Açık mor	
		Bazik (pH 9)	71,26	4,62	10,95	11,88	67,13	0,77	6,75	numune açık, yeşil, sarı, zayıf	Mor	
		Bazik (pH 11)	76,59	1,47	6,06	6,24	76,32	0,43	12,76	numune açık, yeşil, mavi, zayıf	Mor	
	AlK(SO ₄) ₂ ·12H ₂ O	Nötr	77,6	3,59	4,43	5,71	51	0,3	12,86	numune açık, yeşil, mavi, zayıf	Açık mor	
		Bazik (pH 9)	74,9	6,49	5,5	8,51	40,32	0,39	9,04	numune açık, yeşil, mavi, zayıf	Mor	
		Bazik (pH 11)	74,99	6,36	6,15	8,85	44,02	0,4	8,94	numune açık, yeşil, mavi, zayıf	Mor	

*standart = mordan kullanılmamış

3.3. İstatistiksel Bulgular

İstatistiksel analizde ilk önce verilerin normal dağılımı, varyansların homejenliği, çarpıklık ve basıklık değerleri tespit edilerek, histogram grafikleri incelenmiştir. Yünlü ve pamuklu kumaşlar için “Kolmogorov-Smirnov” ve “Varyansların Homojenliği (levene)” testindeki renk kuvveti ve haslık bağımlı değişkenlerinin anlamlılık değerlerinin 0,05 değerinin altında olması nedeniyle bu değişkenler için non-parametrik test yapılmaya karar verilmiş, birden fazla bağımlı ve bağımsız değişken grupların karşılaştırma analizi için

“Kruskal Wallis” ve “Chi-Square” yöntemleri, diğer bağımlı değişkenler için ise “One Way Anova” yöntemi seçilmiş sonuçlar Çizelge 6 ve 7’deki tablolarda gösterilmiştir.

Yünlü kumaşların analiz sonuçlarının yer aldığı Çizelge 6’da bağımsız değişken olarak mordanlama tekniği ile sadece açıklık-koyuluk ve renk kuvveti değerleri arasında anlamlı bir ilişkinin olduğu belirlenmiş ayrıca yapılan analizde mordan bağımsız değişkeninin açıklık, renk kuvveti, kroma ve renk farkı bağımlı değişkenleriyle arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki tespit edilmiştir.

Çizelge 4. Yünlü kumaşlara ait haslık sonuçları

Mordanlama yöntemi	Kullanılan mordan	pH	Sürtünme haslığı (lekeleme)	Yıkama haslığı (lekeleme)		Işık haslığı (solma)	
				Pamuk	yün		
Mordanlanmamış	-----	-----	4	4/5	4	7	
Ön mordanlama	FeSO ₄ .7H ₂ O	Asidik (pH 3)	2/3	4/5	4	7	
		Asidik (pH 5)	3	4/5	4	7/8	
		Nötr	3	4/5	4	6/7	
	CuSO ₄ .5H ₂ O	Asidik (pH 3)	5	4/5	4/5	4	7/8
		Asidik (pH 5)	5	4/5	4/5	4	7/8
		Nötr	5	4/5	4/5	4/5	7
	AlK(SO ₄) ₂ .12H ₂ O	Asidik (pH 3)	4/5	4/5	4/5	4	6/7
		Asidik (pH 5)	4/5	4/5	4/5	4	7
		Nötr	3	4/5	4/5	4/5	7/8
Birlikte mordanlama	FeSO ₄ .7H ₂ O	Asidik (pH 3)	5	4/5	4/5	8	
		Asidik (pH 5)	4/5	4/5	4/5	8	
		Nötr	4	4/5	4/5	8	
	CuSO ₄ .5H ₂ O	Asidik (pH 3)	4/5	4/5	4/5	8	
		Asidik (pH 5)	5	4/5	4/5	7/8	
		Nötr	5	4/5	4/5	7/8	
	AlK(SO ₄) ₂ .12H ₂ O	Asidik (pH 3)	4/5	4/5	4/5	7/8	
		Asidik (pH 5)	4/5	4/5	4/5	7/8	
		Nötr	4	4/5	4/5	7/8	
Son mordanlama	FeSO ₄ .7H ₂ O	Asidik (pH 3)	4/5	4/5	4/5	7	
		Asidik (pH 5)	4/5	4/5	4/5	7	
		Nötr	4	4/5	4/5	6/7	
	CuSO ₄ .5H ₂ O	Asidik (pH 3)	4/5	4/5	4/5	5/6	
		Asidik (pH 5)	4/5	4/5	4/5	6	
		Nötr	4	4/5	4/5	7/8	
	AlK(SO ₄) ₂ .12H ₂ O	Asidik (pH 3)	4/5	4/5	4/5	7/8	
		Asidik (pH 5)	4/5	4/5	4/5	7/8	
		Nötr	4/5	4/5	4/5	7/8	

Çizelge 5. Pamuklu kumaşlara ait haslık sonuçları

Mordanlama yöntemi	Kullanılan mordan	pH	Sürtünme haslığı (lekeleme)	Yıkama haslığı (lekeleme)		Işık haslığı (solma)	
				Pamuk	yün		
Mordanlanmamış	-----	-----	4/5	4/5	4	5/6	
Ön mordanlama	FeSO ₄ .7H ₂ O	Nötr	4/5	4/5	4	7/8	
		Bazik (pH 9)	5	4/5	4	7/8	
		Bazik (pH 11)	5	4/5	4	5/6	
	CuSO ₄ .5H ₂ O	Nötr	2	4/5	4/5	4	6/7
		Bazik (pH 9)	4/5	4/5	4/5	6	
		Bazik (pH 11)	4	4/5	4/5	5	
	AlK(SO ₄) ₂ .12H ₂ O	Nötr	3	4/5	4/5	4/5	7/8
		Bazik (pH 9)	4/5	4/5	4/5	6	
		Bazik (pH 11)	5	4/5	4/5	5	

Çizelge 5. (Devam)

Mordanlama Türü	Mordant	pH	Değerler			
			1	2	3	4
Birlikte mordanlama	FeSO ₄ .7H ₂ O	Nötr	4	4	4/5	7/8
		Bazik (pH 9)	4	5	4/5	5/6
		Bazik (pH 11)	3	5	4/5	5/6
	CuSO ₄ .5H ₂ O	Nötr	4	5	4/5	5/6
		Bazik (pH 9)	4/5	5	4/5	5
		Bazik (pH 11)	4/5	5	4/5	6
	AlK(SO ₄) ₂ .12H ₂ O	Nötr	4/5	5	4/5	7
		Bazik (pH 9)	4/5	5	4/5	6/7
		Bazik (pH 11)	4	4/5	4/5	6
Son mordanlama	FeSO ₄ .7H ₂ O	Nötr	4/5	4/5	4/5	7/8
		Bazik (pH 9)	4	5	4/5	7/8
		Bazik (pH 11)	4	5	4/5	7
	CuSO ₄ .5H ₂ O	Nötr	4	4/5	4/5	7
		Bazik (pH 9)	4	4/5	4/5	7/8
		Bazik (pH 11)	4	4/5	4/5	7
	AlK(SO ₄) ₂ .12H ₂ O	Nötr	4/5	4/5	4/5	7
		Bazik (pH 9)	4/5	4/5	4/5	7
		Bazik (pH 11)	4/5	4/5	4/5	6/7

Çizelge 6. İstatistiksel bulgular (yünlü kumaşlar)

Bağımsız değişken	Bağımlı değişken	Sig. değeri	Değerlendirme
Mordanlama tekniği	Açıklık-koyuluk	0,028 ^{*1}	Anlamlı
	Renk kuvveti	0,021 ^{*2}	Anlamlı
	Kroma	0,55 ^{*1}	Anlamsız
	Renk farkı	0,92 ^{*1}	Anlamsız
Mordan	Açıklık-koyuluk	0,000 ^{*1}	Anlamlı
	Renk kuvveti	0,000 ^{*2}	Anlamlı
	Kroma	0,000 ^{*1}	Anlamlı
	Renk farkı	0,000 ^{*1}	Anlamlı
pH	Açıklık-koyuluk	0,757 ^{*1}	Anlamsız
	Renk kuvveti	0,941 ^{*2}	Anlamsız
	Kroma	0,881 ^{*1}	Anlamsız
	Renk farkı	0,855 ^{*1}	Anlamsız
Mordanlama tekniği	Sürtme haslığı	0,043 ^{*3}	Anlamlı
	Yıkama haslığı (yün akma)	0,000 ^{*3}	Anlamlı
	Işık haslığı	0,075 ^{*3}	Anlamsız
Mordan	Sürtme haslığı	0,083 ^{*3}	Anlamsız
	Yıkama haslığı (yün akma)	0,491 ^{*3}	Anlamsız
	Işık haslığı	0,118 ^{*3}	Anlamsız
pH	Sürtme haslığı	0,045 ^{*3}	Anlamlı
	Yıkama haslığı (yün akma)	0,288 ^{*3}	Anlamsız
	Işık haslığı	0,676 ^{*3}	Anlamsız

*1: One way anova, *2: Kruskal-Wallis, *3: Chi-Square

İstatistiksel analiz kapsamında incelenen “Çoklu karşılaştırma tablolarına” göre açıklık-koyuluk ve renk kuvveti bağımlı değişkenleri üzerine kullanılan mordanın ve uygulanan mordanlama tekniğinin etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. L* (açıklık-koyuluk) değerlerinin “Son Mordanlama”

tekniki kullanıldığında anlamlı şekilde azaldığı belirlenmiştir. Bununla bağlantılı olarak, “Son Mordanlama” tekniğinin, renk kuvveti (K/S) değerlerini yükselttiği, “Birlikte Mordanlama” ile arasındaki farkın istatistiksel olarak anlamlı olduğu belirlenmiştir. Boyamalarda kullanılan mordan dikkate alındığında ise Potasyum alüminyum sülfat mordanının kullanıldığı boyamalarda diğer mordanlarla karşılaştırıldığında istatistiksel olarak anlamlı bir şekilde L* değerlerinin yükseldiği, K/S değerlerinin düştüğü tespit edilmiştir. Haslık değerleri için yapılan “Chi-Square” test sonuçlarına göre ise haslıklar açısından mordanlama tekniğinin ve kullanılan mordanın genel olarak sürtme ve yıkamaya karşı renk haslıklarını istatistiksel olarak önemli derecede etkilediği belirlenmiş, son mordanlama tekniği ve bakır sülfat mordan kullanımının diğer değişkenlerle karşılaştırıldığında haslık değerlerini artırdığı gözlenmiştir.

Pamuklu kumaşlar için yapılan istatistiksel analizde, Çizelge 7’de gösterilen analiz sonuçlarına göre mordanlama tekniği bağımsız değişkeninin sadece kroma değerleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkisi bulunurken, diğer değişkenler üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı belirlenmiştir. Ancak mordan bağımsız değişkeninin açıklık-koyuluk, kroma ve renk farkı değişkenleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkisinin olduğu görülmüştür. İstatistiksel analiz kapsamında incelenen “Çoklu karşılaştırma tablolarına” göre kroma değerleri açısından ön

mordanlama ile son ve birlikte mordanlama arasında istatistiksel açıdan önemli bir farklılık olduğu belirlenmiştir. Mordan tipinin etkisinin belirlendiği “Çoklu karşılaştırma tablolarına” göre ise açıklık-koyuluk değişkenin potasyum alüminyum sülfat mordanından önemli derecede etkilendiği ve L* değerlerinin arttığı görülmüştür. Ayrıca istatistiksel analiz sonucunda demir sülfat mordanının, istatistiksel açıdan önemli derecede renk kuvveti ve renk farkını etkilediği ve değerleri yükselttiği belirlenmiştir. Haslık değerleri için yapılan “Chi-Square” test sonuçlarına göre ise haslıklar açısından yalnızca mordanlama tekniğinin yıkamaya ve ışığa karşı renk haslıklarını istatistiksel olarak önemli derecede etkilediği belirlenmiş, birlikte mordanlama tekniği ve potasyum alüminyum sülfat mordan kullanımının haslık değerlerini artırdığı gözlenmiştir.

Çizelge 7. İstatistiksel bulgular (pamuklu kumaşlar)

Bağımsız değişken	Bağımlı değişken	Sig. değeri	Değerlendirme
Mordanlama tekniği	Açıklık-koyuluk	0,100 ^{*1}	Anlamsız
	Renk kuvveti	0,263 ^{*2}	Anlamsız
	Kroma	0,029 ^{*1}	Anlamlı
	Renk farkı	0,959 ^{*1}	Anlamsız
Mordan	Açıklık-koyuluk	0,001 ^{*1}	Anlamlı
	Renk kuvveti	0,002 ^{*2}	Anlamlı
	Kroma	0,173 ^{*1}	Anlamsız
	Renk farkı	0,000 ^{*1}	Anlamlı
pH	Açıklık-koyuluk	0,099 ^{*1}	Anlamsız
	Renk kuvveti	0,122 ^{*2}	Anlamsız
	Kroma	0,229 ^{*1}	Anlamsız
	Renk farkı	0,879 ^{*1}	Anlamsız
Mordanlama tekniği	Sürtme haslığı	0,161 ^{*3}	Anlamsız
	Yıkama haslığı (yün akma)	0,009 ^{*3}	Anlamlı
	Yıkama haslığı (pamuk akma)	0,002 ^{*3}	Anlamlı
	Işık haslığı	0,035 ^{*3}	Anlamlı
Mordan	Sürtünme haslığı	0,268 ^{*3}	Anlamsız
	Yıkama haslığı (yün akma)	0,128 ^{*3}	Anlamsız
	Yıkama haslığı (pamuk akma)	0,479 ^{*3}	Anlamsız
	Işık haslığı	0,129 ^{*3}	Anlamsız
pH	Sürtünme haslığı	0,477 ^{*3}	Anlamsız
	Yıkama haslığı (yün akma)	0,746 ^{*3}	Anlamsız
	Yıkama haslığı (pamuk akma)	0,595 ^{*3}	Anlamsız
	Işık haslığı	0,512 ^{*3}	Anlamsız

*1: One way anova, *2: Kruskal-Wallis, *3: Chi-Square

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Çalışmada yünlü kumaşlar için, Potasyum Alüminyum Sülfat haricinde kullanılan diğer metalik mordanların rengi daha da koyulaştırdığı L* değerlerini düşürdüğü, Potasyum Alüminyum Sülfat mordanının da L* değerlerini yükselttiği istatistiksel analizle de desteklenerek belirlenmiştir. Boyama prosesindeki pH değerinin yükseltilmesi ve boyama ortamının nötr olmasının rengin daha da açılmasına sebep olduğu gözlenmiştir. Bu sebeple yünlü kumaşların boyanması için literatürde de belirtildiği gibi pH 4-5 civarında tutmanın K/S değerleri açısından yeterli olduğu, pH değerinin düşürülmesinin rengi fazla değiştirmedeği belirlenmiştir. Çalışmada, sürtme ve yıkama haslık değerleri ile mordanlama tekniği arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki tespit edilmiş olup, son mordanlama yöntemi ve bakır sülfat mordan kullanımının haslıklar üzerinde olumlu etkisinin olduğu söylenebilmektedir.

Pamuklu kumaşlar için genel olarak mordanlama tekniği ve pH değerinin K/S ve L* değerlerinde yündeki gibi bir farklılığa sebep olmadığı söylenebilmektedir. Ancak farklı mordan kullanımının açıklık-koyuluk, kroma ve renk farkı değişkenleri üzerinde etkisinin olabileceği ortaya çıkarılmıştır. Haslık değerleri açısından istatistiksel olarak sadece son mordanlama yönteminin önemli olduğu belirlenmiş olsa da özellikle bakır ve demir sülfat mordanlarının haslık değerlerini olumsuz etkilediği, potasyum alüminyum sülfat mordanının ve birlikte mordanlama tekniğinin kullanıldığı boyamalara daha yüksek haslık değerlerine ulaşılacağı söylenebilmektedir.

Yünlü kumaşların doğal boyanmasında demir sülfat ve bakır sülfat gibi metal mordanlar kullanıldığı mordanlama sonucunda daha koyu ve yüksek K/S değerlere ulaşılmasının sebebi metalik mordanın hem yün elyafı ile hem de Antosiyanin (Cyanidin) doğal boyarmaddesi ile kararlı kompleks yapılar oluşturmasıdır. Bir başka ifadeyle metal mordanlarla hem boyarmadde

moleküllerinin hidroksil grupları hem de yün elyafında bulunan amino ve karboksilik asit gibi fonksiyonel grupları arasında oluşan koordinasyon kompleksleri K/S değerlerinin yükselmesini sağlamış, demir ve bakırın bu güçlü koordinasyon eğilimi, alüminyuma nazaran lif ve boya arasındaki etkileşimi artırarak boya afinitesini artırmaktadır [16].

Yünlü kumaşların pamuklu kumaşlara nazaran K/S ve L* değerlerine göz önüne alındığında daha koyu tonlarda boyanabildiği, bir başka deyişle fıstık kabuğundan elde edilen doğal boyarmadde ile yünlü kumaşların boyanmasının daha uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

Sonuç olarak çalışma kapsamında elde edilen renkler incelendiğinde, fıstık kabuğunun özellikle farklı mordan kullanımı ile birlikte renk skalasının artması ve uygun haslık değerleriyle tekstil terbiyesinde ve özellikle doğal boyamacılık alanında rahatlıkla kullanılabilmesi belirlenmiştir. Fıstık endüstrisinde atık olarak elde edilen ve hayvan yemi olarak değerlendirilen fıstık iç kabuğunun doğal boyarmadde olarak kullanılması hem ürüne katma değer katacak hem de bu tür doğal boyarmaddelerin kullanımı sayesinde çevreci ve insan sağlığını önceleyen bir yaklaşımla sentetik boyarmaddelerin kullanımını bir nebze azaltacaktır.

5. TEŞEKKÜR

“Yer Fıstığı Tohumu Kabuğundan Doğal Boyarmadde Ekstraksiyonu ve Boyama Özelliklerinin Belirlenmesi” isimli “OKÜBAP-2018-PT2-004” numaralı proje Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi BAP Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir.

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı, Çukurova Üniversitesi Tekstil Mühendisliği Laboratuvarı, Kültür Varlıklarını Koruma ve Doğal Boyalar Laboratuvarı yetkili ve çalışanları (DATU) ile Öz Yeksek Toprak Mahsulleri Ltd. Şti.’ne vermiş oldukları destekten dolayı teşekkürlerimi sunarım.

6. KAYNAKLAR

1. Osman, E., El-Zaher, N.A., 2011. Effect of Mordant Type on Thermal Stability and Fastness Properties of Silk Fabric Dyed with Natural Dye “Sambucus Nigra”, *Research Journal of Textile and Apparel*, 15(2), 61-70.
2. Canbolat, Ş., Acar, K., Merdan, N., 2013. Sambucus Ebulus L. (Şahmelik) Bitkisinden Ekstrakte Edilmiş Doğal Boyarmadde ile İpekli Materyallerin Boyanması, *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12(23), 103-114. (in Turkish)
3. Dayıoğlu, H., Kut, D., Merdan, N., Canpolat, Ş., 2015. Effect of Dyeing Properties of Fixing Agent and Plasma Treatment on Silk Fabric Dyed with Natural Dye Extract Obtained from Sambucus Ebulus L. Plant, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 195(3), 1609-1617.
4. Zeren, Z.C., 2015. Yerfıstığı Tohumlarından Enzimatik Sulu Ekstraksiyon ile Yağ Eldesi ve Optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 57.
5. Afrin, N., 2012. Phytochemical and Biological Investigation of Arachis Hypogaea, A Thesis Report, East West University, Department of Pharmacy, Bangladesh, 108.
6. Giusti, M.M., Wallace, T.C., 2009. Handbook of Natural Colorants, Thomas Bechtold (Editör), Wiley Series in Renewable Resources, Flavonoids as Natural Pigments, 434.
7. Chhipa, M.K., Srivastav, S., Mehta, N., 2017a. Study of Dyeing of Cotton Fabric Using Peanut Pod Natural Dyes Using Al₂SO₄ CuSO₄ and FeSO₄ Mordanting Agent, *International Journal of Environmental & Agriculture Research (IJOEAR)*, 3(2), 36-44.
8. Chhipa, M.K., Srivastav, S., Mehta, N., 2017b. Suitability of Dyes from Peanut Pod on Different Fabrics Using Copper Sulphate Mordanting Agent. *International Journal of Textile and Fashion Technology (IJTFT)*, 7(1), 1-10.
9. Constanza, K.E., White, B.L., Davis, J.P., Sanders, T.H., Dean, L.L., 2012. Value-added Processing of Peanut Skins: Antioxidant Capacity, Total Phenolics, and Procyanidin

- Content of Spray-Dried Extracts. *J. Agric. Food Chem.*, 60, 10776-10783.
10. Lewis, W.E., Harris, G.K., Sanders, T.H., White, B.L., Dean, L.L., 2013. Antioxidant and Anti-inflammatory Effects of Peanut Skin Extracts. *Food and Nutrition Sciences*, 4, 22-32.
 11. Yu, J., Ahmedna, M., Goktepe, I., 2005. Effects of Processing Methods and Extraction Solvents on Concentration and Antioxidant Activity of Peanut Skin Phenolics, *Food Chemistry*, 90, 199–206.
 12. Yu, J., Ahmedna, M., Goktepe, I., Dai, J., 2006. Peanut Skin Procyanidins: Compositions and Antioxidant Activities as Affected By Processing, *Journal of Food Composition and Analysis*, 19, 364-371.
 13. Lee, J.H., Kang, N.S., Shin, S.O., Shin, S.H., Lim, S.G., Suh, D.Y., Baek, I.Y., Park, K.Y., Ha, T.J., 2009. Characterisation of Anthocyanins in the Black Soybean (*Glycine Max L.*) By HPLC-DAD-ESI/MS Analysis. *Food Chemistry*, 112, 226–231.
 14. Wang, H., Tang, Z., Zhou, W., 2014. A Method for Dyeing Cotton Fabric with Anthocyanin Dyes Extracted from Mulberry (*Morus Rubra*) Fruits. *Coloration Technology*, 132, 222-231.
 15. QIN, C., Li, Y., Niu, Niu, W., Ding, Y., Zhang, R., Shang, X., 2010. Analysis and Characterization of Anthocyanins in Mulberry Fruit. *Czech J. Food Sci.*, 28 (2), 117–126.
 16. Özdemir, H., 2017. Dyeing Properties of Natural Dyes Extracted from the Junipers Leaves (*J. excelsa* Bieb. and *J.oxycedrus* L.), *Journal of Natural Fibres*, 14(1), 134-142.
 17. Pantone Tekstil ve İç-dış Mekân Yalpaze Renk Kataloğu, 2019.
 18. TS EN ISO 105-X12, 2016. Tekstil-renk Haslığı Deneyleri-bölüm X12: Sürtmeye Karşı Renk Haslığı Tayini.
 19. TS EN ISO 105-C06, 2001. Tekstil-renk Haslığı Deneyleri-bölüm C06: Evsel ve Ticarî Müesseselerde Yıkamaya Karşı Renk Haslığı.
 20. TS EN ISO 105-B02, 2013. Tekstil-renk Haslığı Deneyleri-bölüm B02: Yapay Işığa Karşı, Renk Haslığı Tayini-Ksenon Ark Soldurma Lambası Deneyi.

İnce Numara Kompakt İpliklerin Katlama-Bükümünde Hamel Büküm (Elasto-Twist) Teknolojisinin Kullanımı ve İplik Özellikleri

Mehmet ŞAHİN*¹ ORCID 0000-0001-5070-7360

Osman BABAARSLAN¹ ORCID 0000-0002-1606-3431

¹Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Adana

Geliş tarihi: 27.01.2022

Kabul tarihi: 21.03.2022

Atıf şekli/ How to cite: ŞAHİN, M., BABAARSLAN, O., (2022). İnce Numara Kompakt İpliklerin Katlama-Bükümünde Hamel Büküm (Elasto-Twist) Teknolojisinin Kullanımı ve İplik Özellikleri. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37(1), 159-170.

Öz

Tekstil sektörünün ana hammaddesi olan iplik, tek kat olarak üretildiğinde bazı fiziksel özellikleri sınırlı kalabilmektedir. Ayrıca değişen ve gelişen nihai ürün özellikleri paralelinde tek kat ipliklerden ekstra fiziksel özellikler istenmektedir. Bunun bir sonucu olarak katlama ve büküm prosesleri, iplikteki fiziksel özellikleri geliştirmek amacı ile başvurulan bir yöntem haline gelmiştir. Günümüzde en fazla kullanılan büküm yöntemi two-for-one büküm yöntemidir. Her ne kadar çok az bilinse de Hamel büküm (elasto-twist) yöntemi de uygulanmakta olan bir diğer yöntemdir. Bu çalışmada Hamel büküm sisteminde beş farklı büküm değerinde Ne 70/2 iplik üretilmiştir. Üretilen iplik numunelerinin Uster, CV, kalın yer, ince yer, neps, mukavemet ve tüylülük değerleri tespit edilmiş ve elde edilen veriler değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, büküm etkisi altında incelenen kalite parametrelerinde tüm numune grupları üzerinde iyileşme olduğunu ve bu sistemde de büküm seviyesinin kalite parametreleri üzerinde anlamlı bir etkisinin olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelime: Katlama-büküm, Two-for-one büküm, Hamel katlama-büküm, Katlı iplik kalitesi

Use of Hamel Twist (Elasto-Twist) Technology in Doubling-Twisting of Fine Number Compact Yarns and Yarn Properties

Abstract

When the yarn, which is the main raw material of the textile industry, is produced as a single ply, some of its physical properties may be limited. In addition, in parallel with the changing and developing final product properties, extra physical properties are required from single ply yarns. As a result, folding and twisting processes have become a method used to improve the physical properties of the yarn. The most used twisting method today is the two-for-one twisting method. Although little known, the Hamel twist

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Mehmet ŞAHİN, mehmetex0202@gmail.com

(elasto-twist) method is another method that is being used. In this study, Ne 70/2 yarn with five different twist values was produced in the Hamel twist system. Uster, CV, thick place, thin place, neps, strength and hairiness values of the produced yarn samples were determined and the obtained data were evaluated. The findings showed that the quality parameters examined under the effect of twisting improved on all sample groups and that the twist level had a significant effect on the quality parameters in this system.

Keywords: Doubling-twist, Two-for-one twist, Hamel doubling-twist, Ply yarn quality

1. GİRİŞ

Tek kat kesikli liflerden üretilmiş iplikler, bazı tekstil proseslerinde ve belli tipteki tekstillerin üretiminde ihtiyaçları karşılayamamaktadır. Tek katlı ipliklerle yeterli düzeyde elde edilemeyen çeşitli özellikler (mukavemet, düzgünsüzlük, aşınma direnci, görünüm özellikleri vb.), aynı doğrusal yoğunluğa (iplik numarasına) sahip katlı ipliklerle sağlanmaktadır. Bununla beraber, konvansiyonel manada katlı iplik üretimi; sadece en az bir ilave işleme daha ihtiyaç göstermesinden dolayı değil, aynı zamanda nihai iplik numarasından daha ince tek katlı ipliklere ihtiyaç göstermesinden dolayı da daha maliyetlidir [1,2].

Konvansiyonel katlı iplik üretimi; tek katlı iplik üretimi ve tek katların bir araya getirilerek birlikte bükülmesi aşamalarından oluşmaktadır. Buradaki katlı büküm işleminde yaygın olarak two-for-one büküm makineleri kullanılmaktadır. Söz konusu yöntemin gerek maliyetli olması, gerekse düşük üretim hızına sahip olması nedeniyle, konvansiyonel katlı iplik üretim yöntemine alternatif olarak Suessen Plyfil, Murata Twin Spinner ve Siro-spun gibi direkt çift katlı iplik üretim teknolojiler ortaya çıkmıştır [3].

CSIRO tarafından geliştirilerek 1980'lerin başında tanıtılan ve günümüzde kamgarn iplikçiliğinde yaygın olarak kullanılan Siro-spun sistemindeki temel prensip; ring iplik makinesindeki çekim sisteminin ön silindirinden sonra, aralarında oldukça geniş bir mesafe bulunan paralel iki lif tutamının bir büküm noktasında birleştirilmesi ve bu noktada birlikte büküm almasıdır [4,5].

Ring iplikçiliğinde, lif özelliklerinden daha yüksek yararlanma oranı sağlamak ve iplik kalitesini daha

da geliştirebilmek adına yeni bir eğirme sistemi olarak kompakt iplik eğirme sistemi ortaya çıkmıştır. Ring iplikçilik sisteminin modifiye edilmiş hali olan bu sistemde; genellikle bir hava emişi yardımıyla oluşturulan bir lif yoğunlaştırma bölgesi bulunmaktadır. Böylelikle, ring iplikçilik sisteminin diğer sistemlere göre zayıf noktası olan ve ipliklerin tüylülük, düzgünsüzlük, mukavemet ve mukavemet varyasyonu gibi iplik özelliklerini olumsuz olarak etkileyen eğirme üçgeni elimine edilmiştir [6].

Katlama, iplik özelliklerini geliştirmek ve tek katlı ipliklerle sağlanamayan iplik veya kumaş performansını elde etmek amacıyla, iki veya daha fazla sayıdaki tek kat ipliğin bir arada bükülmesi işlemidir., İki veya daha çok tek kat ipliğin katlanması veya bükülmesi ile elde edilen iplikler de “katlı iplik” olarak adlandırılmaktadır. Katlama, özellikle eğirme sonrası proseslerde ortaya çıkan kuvvetlere ipliğin dayanabilmesi için ipliğe mukavemet ve aşınma direnci kazandırmak amacıyla da yapılmaktadır. Bununla birlikte, literatürde çok katlı iplikler pürüzsüz bir yüzey ile yumuşak bir tutuma sahip; oldukça parlak, düzgün, az tüylü, mukavim ve aşınmaya karşı dirençli iplikler olarak da bilinmektedir [7].

Katlı iplik üretimi ile birçok kumaş tasarımının ekonomik olarak üretimi mümkün olabilmektedir. İki ipliği birlikte bükme, ipliklerin gerilme dayanımını, uzamasını ve düzgünsüzlüklerini geliştirmektedir. Dolayısıyla katlı iplikler kullanım özelliklerini geliştirmekte ve uzun ömürlü ve stabil tekstil materyallerinin üretimine yardımcı olmaktadır [8].

Piyasada çok yaygın olarak kullanılan katlı büküm işlemi two-for-one (ikiye-bir) büküm olarak

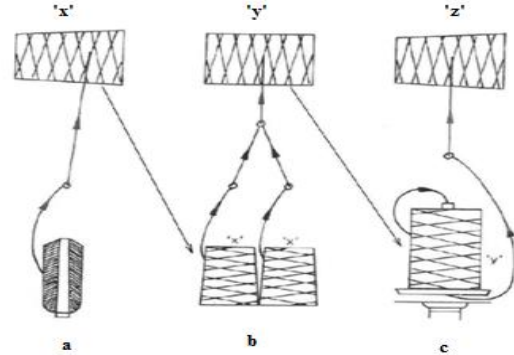
bilinmektedir. Bu yöntemin kullanılması esnasında maliyetin büyük dezavantaj olması, metredeki büküm varyasyon değeri olan %CV değerinin yüksek olması ve düşük üretim hızına sahip olması, bu işlemin en büyük dezavantajları arasında yer almaktadır. Bu çalışma, sözü edilen dezavantajları ortadan kaldırmak üzere alternatif olarak geliştirilmiş, neredeyse piyasada hiç kullanılmayan ve üzerinde çok az sayıda akademik çalışmanın yapıldığı Hamel büküm (elasto twist) sisteminde yapılmıştır. Uygulamada farklı amaçlar için kullanılmakta olan bu sistemin katlı iplik üretiminde de kullanılabilmesi ortaya konulmaya çalışılmıştır.

Çalışmada; aynı hammadde kullanılarak elde edilen kompakt Ne 70/1 ipliklerin Hamel büküm sisteminde aralarında 100 T/m büküm fark olacak şekilde Ne 70/2 beş farklı iplik numunesi haline getirilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca bükümleri farklı olan katlı ipliklerin iplik numaraları aynı tutulmaya çalışılmıştır.

Buradaki asıl amaç; işletme maliyetini minimize etmek için tüm iplik numunelerinde işletme parametreleri sabit tutularak, aynı hammadde ile bükümleri farklı olan katlı ipliklerin kalite standartlarına göre performansları tespit etmektir. Aşağıda katlama ve büküm çalışmalarında yaygın olarak kullanılan ikiye-bir (two-for-one) büküm prensibi ile literatürde hakkında çok fazla bilgi ve kaynak bulunmayan Hamel büküm (elasto-twist) teknolojisi hakkında bilgi verilmiştir.

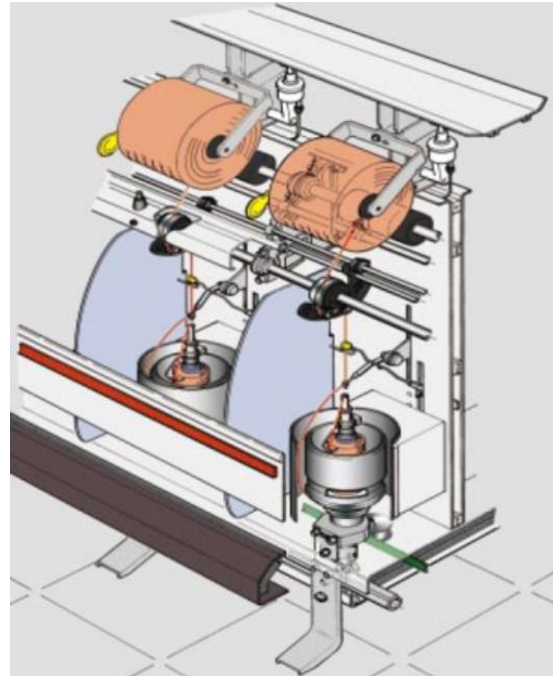
1.1. Two-For-One Katlama-Büküm Sistemi

Two-For-One büküm sisteminde ilk olarak tek katlı iplik bobinleri katlama makinesinde katlanırken kendiliğinden oluşan bir büküm ile (20 tur/m gibi) büküm almadan bir bobine sarılmaktadır. Bu işlemi şu an aktarma makineleri yapmaktadır. Daha sonra katlanmış bobinler, two-for-one büküm makinesine yerleştirilir ve büküm işlemi bir turda iki büküm şeklinde bobinden bobine aktarım sırasında gerçekleşir [9]. Bu işlem süresince bobin yapıları üzerinde gözlenen değişiklik temsili olarak Şekil 1'de gösterildiği gibidir.



Şekil 1. Two-for-one bükümde işlem süreci [9] a) Eğrilmiş ring iplik kopsu, b) Katlama işlemi, c) İkiye-bir büküm işlemi

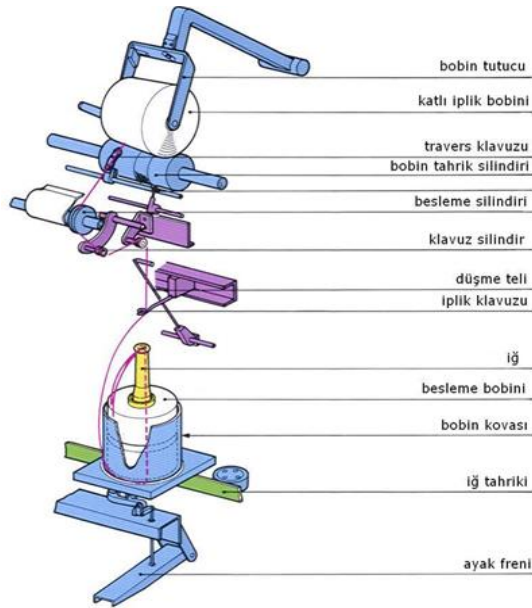
Two-for-one büküm tekniğinde, katlama işlemini elimine etmek için bobin kazanına tek kat iplikleri taşıyan iki bobini üst üste yerleştirerek doğrudan büküm işlemi yapılabilir de, bu teknik, konvansiyonel şapel ipliklerin üretiminde oluşan fiziki zorlamalar sebebi ile yaygın kullanım alanı bulamamıştır [9]. Şekil 2'de ikiye-bir büküm sistemine ait bir görünüş verilmektedir.



Şekil 2. Two-for-one büküm makinasına ait iki iğnin önden görünüşü [10]

Genel olarak two-for-one büküm sisteminin asıl görevi; iğnin her devrinde ipliğe iki büküm verilmesi, verilen büküm sayesinde mukavemet kazandırılması ve büküm verilen ipliklerin sabit tansiyon ve numaraya göre ideal metrajlı bobin biçiminde sarılması işlemidir [10].

Şekil 3'te bir iğnin tüm unsurları ile çalışma prensibini temsilen iplik yolu gösterilmiştir [10].



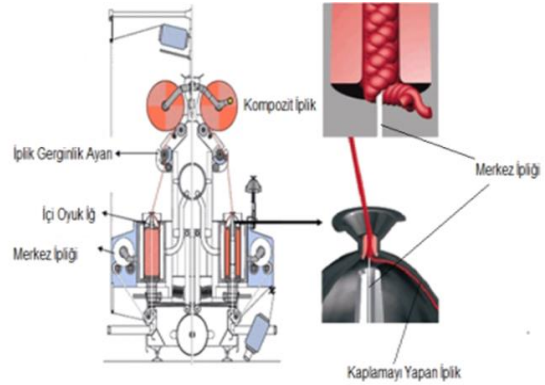
Şekil 3. Two-for-one makinesinde bir iğ üzerinden iplik yolu [10]

Two-for-one sisteminde genel olarak çok az bir büküm verilerek oluşan katlama bobini kova içine yerleştirildikten sonra istenen büküm değerine göre içi delikli iğ, büküm diski ve bobin kovası aracılığı ile iplik kılavuzuna gelerek sarılma işleminin ve bobinleme işleminin yapılması sağlanır [10].

1.2. Hamel Katlama-Büküm Sistemi

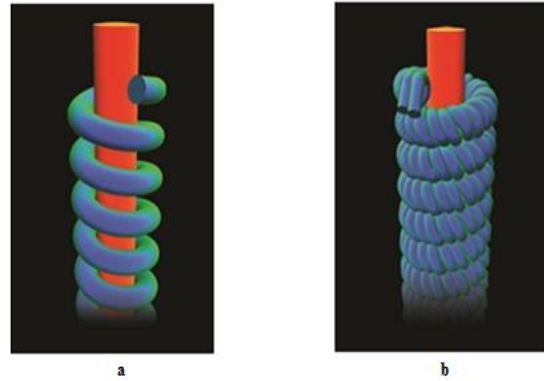
Piyasada pek kullanılmayan, metredeki büküm varyasyonunu gösteren %CV değerinin çok düşük olduğu ve bundan dolayı fantezi tarzı ipliklerde en çok tercih edilen sistem olan Hamel büküm sistemi olarak bilinen içi oyuk iğli büküm metodunun kaplama metodundan farkı, kaplamayı yapan

ipliklerin kendi aralarında bükülerek merkez iplik üzerine sarılmasıdır [11]. Şekil 4'te, içi oyuk iğli büküm metoduyla kompozit iplik üretiminin şematik görüntüsü verilmektedir.



Şekil 4. İçi oyuk iğli büküm metoduyla (Hamel-Elasto Twist) katlı iplik üretim teknolojisi [11]

Şekil 5'te 'a' ve 'b' olarak verilen bükümlü iplik modelleri incelendiğinde, Hamel büküm sisteminin klasik kaplamadan farkı daha iyi anlaşılmaktadır [11].



Şekil 5. (a) Normal kaplama iplik görüntüsü (temsili), (b) Hamel teknolojisi ile üretilmiş iplik görüntüsü (temsili) [11]

Hamel büküm sisteminde merkez ipliği olarak polyester, poliamid gibi filament ya da metal iplik kullanılabilir gibi elastan da kullanılabilir. Sargı ipliği olarak da katlanmış flanşlı bobinlere sarılı halde içi boş iğ üzerine oturtulmuş olarak bulunur [11].

Merkez ipliği, büküm makinesinde iğın ortasındaki oyuktan kılavuzlanır. Bu metot, iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada, kısa stapel iplikler çok az miktarda bir ön büküm verilerek flanşlı bobine sarılırlar. İkinci aşamada, bu flanşlı bobinler kapalı bir tüp içerisindeki içi oyuk iğ üzerine yerleştirilir ve pozitif olarak sağılan merkez ipliği, içi oyuk iğ içerisinde geçirilir. İğın dönüşü ile flanşlı bobin üzerindeki katlı ipliğe gerçek büküm verilir ve aynı zamanda merkez ipliği üzerine sarılması sağlanır [11].

Bu metotta, iğın dönüşü ile birlikte katlı kesik elyaf ipliğın dönüşü ve büküm alması kapalı bir tüp içerisinde gerçekleştiğinden kir veya uçuntu birikimi olmamaktadır [11]. Bu sistem, MVS (Muratec Vorteks Sistemi) sistemi hariç kompozit iplik yapısındaki merkez ipliğini oluşturan filamentin büküm almadığı tek büküm sistemidir [12]. Bu nedenle proses “çanak (tüp) içerisinde kaplama” olarak da adlandırılmaktadır. Merkez ipliği bükülmeyip tamamen kaplanır ve böylelikle ideal olarak korunur. Esnekliği ve tutarlı kalitesinden dolayı, dokumada kullanılan elastik kompozit ipliklerin üretiminde avantaj sağlamaktadır.

Ortalama 5000-14.500 dev/dk arasında çalışmakta olan büküm makinesinde çift katlı ipliklere verilen büküm aralığı ise 160-1200 T/m’dir. Katlama makinesinde olduğu gibi kopça kullanılmayıp, ring veya diğer iplik eğirme sistemlerinin üretiminden elde edilmiş olan ipliklerin mukavemet zayıflığından dolayı tek katlı ipliklere ekstra büküm verilerek daha kaliteli bir duruma gelmesi de mümkündür. Merkezde iplik bulundurulması bu ipliğın etrafının kaplama iplikler ile kapatılması hedeflenen sistemde, kullanılan merkez ipliğe kesinlikle büküm verilmemektedir. Buradaki asıl amaç, bükümün, ipliğın her noktasında en az varyasyon ile kapatılmasını sağlamaktır. Hamel büküm makinelerinde büküm toplam dört dışı grubu ile verilmektedir.

Hamel katlama ve büküm makinesinde S ve Z bükümler verilebilmektedir. Genelde katlama

aşamasında tek kat iplikler katlanırken ortalama 6000 dev/dak ile çalışılmaktadır.

Flanşların (katlı ipliğın sarılı olduğu makaralar) üzerindeki iplik uzunluğu iplik numarasına göre değişkenlik gösterir. Ancak bu flanşlar, büküm makinesinde içi boş iğın üzerine yerleştirilirken bir kazan ile kaplanmış olduğundan dolayı kazanın çapının üzerine çıkılmaması gerekir. Ortalama olarak bobine sarılan iplik uzunluğu 20.000-35.000 metre arasındadır. Katlama makinesi; ring (vater) makine sistemine benzemekte olup, bir planga ve bu planga üzerinde merkezleri arası 30 cm olan iğlerden ve bu iğlerin merkezlendiği bileziklerden oluşmaktadır.

İğlerin üzerine oturtulmuş olan flanşlar; bilezik üzerindeki kopça yardımı ile tambur ve kopça arasındaki mesafede, cağılıktaki tek kat iplikleri metrede ortalama 20 büküm vererek katlamanın sağlıklı bir şekilde oluşarak üzerine sarılmasını sağlar. Hamel katlama sisteminde, Ne 4/2-30/2 aralığındaki tek kat iplikler için ISO ağırlığı 224 olan kopça kullanılırken, Ne 40/2-100/2 aralığındaki iplikler için ise ISO ağırlığı 125 olan kopçalar kullanılmaktadır.

Bu çalışmada materyal olarak seçilen Ne 70/1 kompakt ipliklere, önce katlanıp flanş bobinlere sarıldıktan sonra Hamel büküm sisteminde merkez ipliği kullanılmadan katlama amaçlı büküm verilmesi hedeflenmiştir. Böylece bu teknolojinin farklı bir amaç için de kullanılabileceği gösterilmiştir.

2. MATERYAL VE METOD

2.1. Materyal

Çalışmada %100 pamuk (penye), Ne 70/1 (8,44 tex), tek kat kompakt ring iplikler kullanılmıştır. İpliklerin hammaddesi olan pamuk elyafı Fiona tipi tohumdan üretilmiştir. Fiona tipi tohumdan elde edilen Ege yöresine ait bu pamuk elyafının USTER® AFIS PRO 2 test cihazı ile tespit edilen HVI ve AFIS değerleri Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan pamuk elyafının HVI ve AFİS değerleri

TEST	Mic	UHML (mm)	UI (%)	SFI	Str (g/tex)	Elg (%)	Rd	+b	CG	Nepscount (1/gr)	Neps mean size (µm)
1	4,1	32,56	85	7,1	31,6	6,8	69,5	9	21-1	161	714
2	4,1	31,46	85	6,2	31,8	7,2	70,1	8,4	21-1	174	731
3	4,1	32,44	86	6,1	30,9	6,6	69,2	9,3	21-1	162	712
4	4,2	33,23	85	6,9	29,8	6,9	70,4	8,6	21-1	178	689
Mean	4,1	32,42	85	6,6	31,03	6,9	69,8	8,8	21-1	168,8	711,5

Tek kat iplik üretimi Rieter K-48 model kompakt ring iplik eğirme makinesi ile gerçekleştirilmiştir. Üretim 4,1 İngiliz büküm katsayısı ile

gerçekleştirilen Ne 70/1 tek kat iplik üretiminde kullanılan makine ve iplik parametreleri Çizelge 2' de verilmiştir.

Çizelge 2. Ne 70/1 iplik üretim parametreleri

Pamuk tipi	Fiona
Tarak şeridi Ne	0,100
Tarak üretim hızı (kg/h)	45 kg/h
I.PSJ cer şeridi Ne	0,110
I.PSJ cer çekim oranı	6,6
Unilap band gramajı (g/m)	79
Penyöz % telef oranı	18,9
Penyöz şeridi Ne	0,120
II. PSJ cer şeridi Ne	0,120
II. PSJ cer çekim oranı	6,54
Fitil Ne	1,20
Fitil büküm (T/m)	46
Fitil çekim oranı	10
Vater Ne	70/1
Ring çekim oranı	61,8
Ring büküm kat sayısı (İngiliz)	4,1
Ring büküm (T/m)	1350
Ring iğ devri (dev/dk)	23.000
Bobin baraban devir (dev/dk)	1200

Hem tek kat ve hem de çift kat ipliklerin büküm işleminden sonra özelliklerinde meydana gelen

değişikliklerin incelenmesi için bu iplik yapılarına numara, düzgünlük tayini, tüylülük tayini ve

mukavemet-kopma uzaması (%) tayini testleri uygulanmıştır. Çalışmada yapılan tüm testler, numuneler standart atmosfer şartlarında (20 ± 2 °C sıcaklık ve $\%65\pm 2$ bağıl nem) en az 24 saat

kondisyonlanarak gerçekleştirilmiştir. Bu testlerin uygulandığı test cihazları ve esas alınan standartlar Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. İpliklere uygulanan testler ve ilgili standartlar

Kullanılan cihaz	Standard numarası	Standard adı
Uster tester-5	TS 12863:2002	Tekstil-İplikler-Tüylülük Tayini [13]
Numara çıkırığı & hassas terazi	TS 244 EN ISO 2060:1999	Tekstil-İplikler-Doğrusal Yoğunluk Tayini [14]
Zweigle twist tester 5	TS 247 EN ISO 2061 TS EN ISO 2061:2015	Tekstil İpliklerde Büküm Tayini-Doğrudan Sayma Metodu [15]
Stulz kondisyonlama	TS EN ISO 139:2008	Tekstil-Şartlandırma ve Deney için Standart Ortamlar [16]
Uster TENSOJET 4	TSENISO 2062:2010	Tekstil-Paketlerden Alınan İplikler-Tek İpliğin Kopma Mukavemetinin ve Kopma Uzamasının Tayini [17]
Uster tester-5	ISO 16549:2004	İplik Düzgünlük ve Hata Tayini Metodu [18]

2.2. Metod

Ne 70/1 (8,44 tex) tek katlı ipliklerin ön büküm işlemi Adana Kapfil Tekstil'de gerçekleştirilmiştir. İlk olarak flanşlı bobinlere katlaması yapılan ipliklerin, içi boş oyuk iş üzerinde merkez iplik olmadan sadece ipliğin kendisine kaplama görevi

gödürülerek büküme uğraması sağlanmıştır. Ön büküm işleminin ardından Hamel Katlama-Büküm makinesinde sırasıyla bir metrede 650, 750, 850, 950 ve 1050 büküm ile üretilen Ne 70/2 çift kat ipliklerin üretiminde kullanılan makine parametreleri ise Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 4. Ne 70/2 ipliklerin hamel katlama-büküm üretim parametreleri

	Katlama	Büküm	Katlama	Büküm	Katlama	Büküm	Katlama	Büküm	Katlama	Büküm
İplik numara (Ne)	70/1	70/2	70/1	70/2	70/1	70/2	70/1	70/2	70/1	70/2
Makine devri (dev/dk)	5700	12500	5700	13000	5700	13500	5700	14000	5700	14500
Çekim	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Büküm (T/m)	20	650	20	750	20	850	20	950	20	1050
Kopça	125	YOK	125	YOK	125	YOK	125	YOK	125	YOK
Büküm yönü	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Merkez iplik	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok

Çalışmada tek katlı Ne 70/1 iplikler için uster, tüylülük, numara ölçümü, mukavemet ve büküm testleri için 5 ayrı test tekrarı Çizelge 3'te verilen cihaz kullanılarak yapılmıştır. Hamel katlama-büküm makinelerinden elde edilen 5 farklı büküm değerine sahip Ne 70/2 katlı iplik örneklerine uygulanan farklı testler için de aynı cihazlar kullanılmış ve 3 ayrı test tekrarı yapılmıştır. Büküm değerlerinin iplik kalitesine etkisi analiz

edilirken elde edilen test sonuçlarının ortalamaları dikkate alınmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışmada kullanılan Ne 70/1 ipliklerin tespit edilen düzgünlük, iplik hataları, mukavemet, büküm, tüylülük ve numara değerleri Çizelge 5'te verilmiştir.

Çizelge 5. Ne 70/1 İplik Uster, tüylülük, Ne, büküm ve mukavemet (Rkm) değerleri

Test No	U%	CVm	Index	İnce	Kalın	Neps	Tüylülük	Numara	Büküm	Rkm	Uzama (%)
				-50%	50%	200%	mm	(Ne)	(tur/m)		
1	10,66	13,44	0,97	10	28	56	3,74	69,98	1348,9	26,62	5,37
2	10,11	12,73	0,92	3	16	51	3,61	69,26	1345,7	22,08	4,76
3	10,04	12,64	0,91	4	11	48	3,67	69,57	1274,9	25,92	5,4
4	10,43	13,14	0,96	5	12	54	3,54	69,43	1356,3	26,47	5,45
5	10,22	12,88	1,01	8	7	35	3,85	70,06	1343,6	24,61	4,84
Ort.	10,29	12,97	0,95	6	14,8	48,8	3,68	69,66	1333,88	25,14	5,16
CV	2,46	2,52	4,23	48,59	54,35	16,98	3,24	0,5	2,5	7,48	6,48
s	0,25	0,33	0,04	2,92	8,04	8,29	0,12	0,35	33,32	1,88	0,33
Q95	0,14	0,21	0,02	--	--	--	--	--	--	1,42	0,22
Max	10,66	13,44	1,01	10	28	56	3,85	70,06	1356,3	26,62	5,45
Min	10,04	12,64	0,91	3	7	35	3,54	69,26	1274,9	22,08	4,76

2018 Uster istatistik değerlerine göre Tablo 5'deki Ne 70/1 iplikleri için Uster değerinin %14'lük dilimde, CVm değerinin %21'lik dilimde, ince yer hatalarının %5'lik dilimde ve neps hatalarının %10'luk dilimde olduğu görülmektedir. Ayrıca büküm miktarına göre elde edilmiş olan Rkm değerlerinde ve bunlara bağlı olan %uzama değerlerinde ring iplik sisteminde görülen tipik düzensizliğin burada da görüldüğü belirlenmiştir. Çünkü eğirme üçgenine giren kısa lif sayısında yer yer

değişkenlik görüldükçe mukavemette düşüş gözlenebilmektedir. Çalışma kapsamında beş farklı büküm seviyesinde üretilmiş olan Ne 70/2 çift kat ipliklerin düzgünlük, iplik hataları, mukavemet, tüylülük ve büküm değerleri ise Çizelge 6'da verilmiştir.

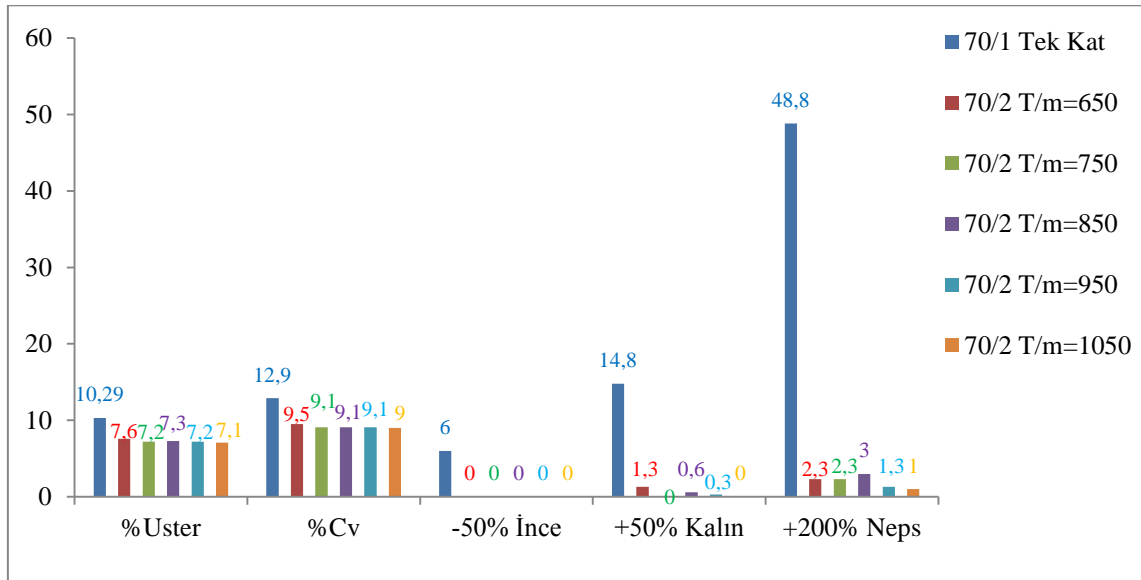
Elde edilen sonuçlara göre Ne 70/1 ve Ne 70/2 ipliklerin Uster değerlerinin kıyaslanması Şekil 6'da verilmiştir.

Çizelge 6. Ne 70/2 ipliklerin büküm farklılıklarına göre Uster, Tüylülük, Ne, Büküm ve Rkm Değerleri

	U%	CVm	Index	İnce	Kalın	Neps	Tüylülük	Numara	Büküm	Rkm	% Uzama
T/m=650											
1	7,58	9,5	0,97	0	1	1	2,89	35,78	668,9	26,74	5,13
2	7,52	9,46	0,96	0	2	2	2,93	35,82	642,9	27,34	5,05
3	7,64	9,62	0,98	0	1	4	2,95	35,64	674	27,48	5,42
ort.	7,58	9,53	0,97	0	1,33	2,33	2,92	35,75	661,93	27,19	5,2
CV	0,79	0,87	1,03	0	43,3	65,47	1,05	0,26	2,52	1,45	3,74
s	0,06	0,08	0,01	0	0,58	1,53	0,03	0,09	16,68	0,39	0,19
T/m=750											
1	7,29	9,18	0,93	0	0	3	2,87	35,61	766,9	29,7	5,83
2	7,24	9,11	0,93	0	0	2	2,78	35,78	728	29,1	5,83
3	7,26	9,16	0,93	0	0	2	2,8	35,79	726,9	27,4	5,37
ort.	7,26	9,15	0,93	0	0	2,33	2,82	35,73	740,6	28,69	5,68
CV	0,35	0,39	0	0	0	24,74	1,68	0,28	3,08	4,18	4,68
s	0,03	0,04	0	0	0	0,58	0,05	0,1	22,78	1,2	0,27
T/m=850											
1	7,25	9,13	0,93	0	1	2	2,65	35,39	846,9	28,5	5,22
2	7,3	9,2	0,94	0	0	1	2,81	35,67	838	27,1	5,78
3	7,3	9,18	0,94	0	1	6	2,85	35,71	858	27,4	5,88
ort.	7,28	9,17	0,94	0	0,67	3	2,77	35,59	847,63	27,66	5,63
CV	0,4	0,39	0,62	0	86,6	88,19	3,82	0,49	1,18	2,56	6,32
s	0,03	0,04	0,01	0	0,58	2,65	0,11	0,17	10,02	0,71	0,36

Çizelge 6. (Devam)

	U%	CVm	İndeks	İnce	Kalın	Neps	Tüylülük	Numara	Büküm	Rkm	% Uzama
T/m=950											
1	7,32	9,21	0,94	0	0	1	2,56	34,89	918	24,3	5,2
2	7,18	9,04	0,92	0	0	1	2,38	34,76	932,9	26,73	5,91
3	7,28	9,16	0,93	0	1	2	2,46	34,87	930,9	25,05	5,6
ort.	7,26	9,14	0,93	0	0,33	1,33	2,47	34,84	927,27	25,36	5,57
CV	0,99	0,96	1,08	0	173,2	43,3	3,66	0,2	0,87	4,91	6,39
s	0,07	0,09	0,01	0	0,58	0,58	0,09	0,07	8,09	1,24	0,36
T/m=1050											
1	7,1	8,94	0,91	0	0	0	2,32	34,45	1030	30,01	6,34
2	7,18	9,04	0,92	0	0	0	2,13	34,41	1026,1	29,1	6,43
3	7,23	9,09	0,93	0	0	3	2,24	34,56	1076,9	27,66	6,36
ort.	7,17	9,02	0,92	0	0	1	2,23	34,47	1044,33	28,4	6,38
CV	0,91	0,85	1,09	0	0	173,21	4,28	0,23	2,71	4,17	0,74
s	0,07	0,08	0,01	0	0	1,73	0,1	0,08	28,27	1,18	0,05



Şekil 6. Ne 70/1 ve Ne 70/2 düzgünsüzlük ortalama değerlerinin kıyaslanması

Şekil 6'da görüldüğü gibi Ne 70/1 tek katlı ipliklerin Uster kalite değerleri Ne 70/2 çift katlı ipliklerin Uster kalite değerlerinden daha kötü durumda olup; bu durumun başlıca iki nedenden kaynaklandığı düşünülmektedir. Tek katlı iplikler katlanarak çift katlı iplik haline geldiğinden dolayı daha kalın numarada bir iplik elde edilmesi sağlanmıştır.

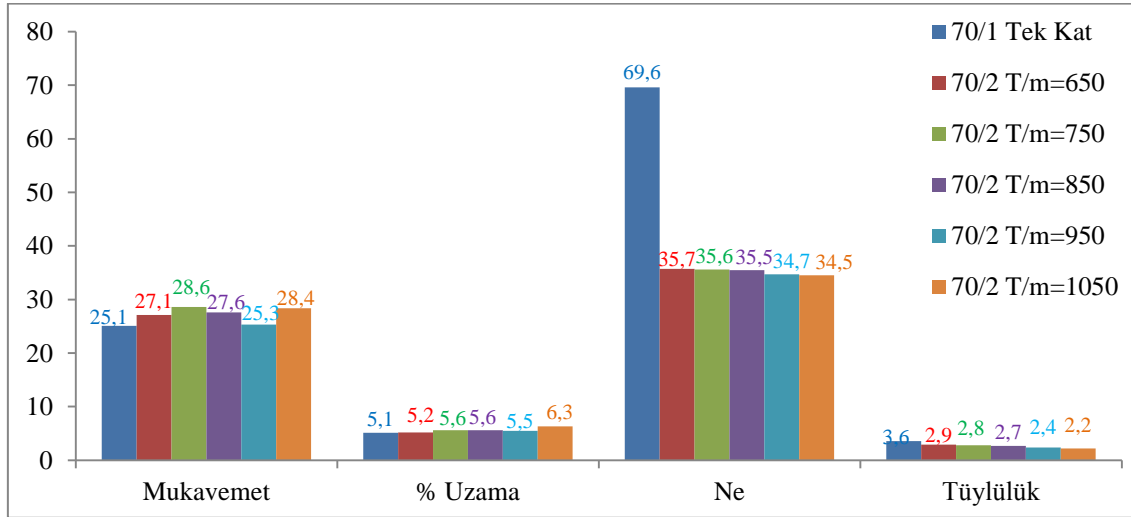
Her zaman kalın numaraların iplik kalite değerleri daha iyi gelmektedir. Hamel büküm makinesinde

verilen bükümden dolayı iplikler; oluşan kalın iplik kalite değerlerine göre çok daha üst kalitede ipliğin oluşmasını sağlamıştır. Hamel büküm makinesinde verilen bükümlerin değerleri kendi içinde çok düşük oranda sapma göstermiş olduğundan dolayı iplikteki hataları yok edip daha kaliteli iplik oluşmasını sağlamıştır. Katlı iplik üretiminde ön plana çıkan önemli özellikler olduğu için, Ne 70/2 çift kat ipliklerin mukavemet, tüylülük, büküm ve numara test sonuçları ayrıca değerlendirme amaçlı Çizelge 7'de verilmiştir.

Çizelge 7. Ne 70/2 İpliklerin ortalama mukavemet, uzama, büküm ve tüylülük karşılaştırması

Özellik	T/m=650	T/m=750	T/m=850	T/m=950	T/m=1050
İplik Ne	35,72	35,68	35,51	34,79	34,51
Büküm(Tur/m)	661,93	740,6	847,63	927,27	1044,33
Mukavemet (gf/tex)	27,19	28,69	27,66	25,36	28,4
Kopma Uzaması (%)	5,20	5,68	5,63	5,57	6,38
Tüylülük(mm)	2,92	2,82	2,77	2,47	2,23

Ne 70/1 ve Ne 70/2 ipliklerin mukavemet, tüylülük ve numara özellikleri açısından karşılaştırılması Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 7. Ne 70/1 ve Ne 70/2 mukavemet, tüylülük ve Ne değerlerinin kıyaslanması

Şekil 7’de görüldüğü gibi tek katlı ipliğin mukavemeti en düşük değerde olup bu değere bağlı olarak %uzama değeri de bir miktar düşük çıkmıştır. Ayrıca katlı ipliklerde ise ortalama 750-850 T/m büküme kadar mukavemette artış olup, bu artış daha yüksek 950 ve 1050 T/m bükümlü ipliklerde artık kırılmalı bir yapıya dönüştüğü görülmektedir. % Uzama değerlerinde düzenli bir artışın olduğu ve bu artışın da iplik mukavemetine bağlı olarak arttığını söyleyebiliriz. İplik numarasındaki kalınlaşmanın büküm arttıkça arttığı ve bu durumun sanayide ve literatürde elde edilen veriler ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Tüylülük olarak ise tek kat ipliklerde tüylülüğün en yüksek değerde olduğu yani kalitenin azaldığı ancak katlı ipliklerde ise tek kat ipliklerin hata

seviyesini düşürdüğü ve böylece tüylülük hatalarını minimize ettiği belirlenmiş ve bu bulgunun sanayi ve literatür çalışmaları ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

4. SONUÇ

Piyasada en fazla kullanılan two-for-one (ikiye-bir) katlama-büküm sistemi ile birlikte ayrıca Hamel (elasto-twist) katlama-büküm sistemi de bulunmaktadır. Çalışmanın Hamel bükümde yapılmasının amacı; bu alanda yeterli bilimsel çalışmaların olmaması ve sanayide pek bilinmemesidir. Çalışma kapsamında, Hamel bükümde elde edilen sonuçların sanayicilerin bu sistemi daha iyi tanımaları ve avantajlarını görmelerini sağlaması beklenmektedir. Bu

sistemin, tek katlı veya çok katlı iplik üretiminde, esas kullanım amacı olan merkez ipliğe efekt kazandırmak amacıyla kullanımının daha da ön plana çıkarmak avantajlı olacaktır.

Tek katlı olarak Hamel bükümde merkez iplik verilmeden sadece büküm verilerek tek kat üretim sistemi esnasında oluşan hataların minimize edilmesi sağlanırken, merkez iplik verilerek elastanlı tek katlı iplik üretiminin de mümkün olduğu bilinmektedir. Ayrıca merkez ipliğin dışında yüzey iplikler iki veya daha fazla olacak şekilde fantezi iplik türlerinin elde edilmesi de mümkündür.

Çalışmada tek katlı ince kompakt iplikler, aralarında 100 T/m büküm farkı bulunacak şekilde beş farklı büküm değerinde iplikler üretilmiş olup, verilen bu bükümler; tüm iplik kalite değerlerini olumlu yönde etkilediği belirlenmiştir. %U değerinin ve CV_m değerinin yaklaşık %26 oranında iyileştiği tespit edilmiştir. İnce yer, kalın yer, neps ve tüylülük gibi kalite parametrelerinin belirgin bir şekilde iyileştiği, mukavemet değerinde iyileşmenin ise belli bir büküm noktasına kadar olumlu etkilendiği, fakat daha yüksek büküm değerlerinde ise olumsuz etkilendiği tespit edilmiştir.

Tüylülük değeri olarak en iyi sonucun çift katlı iplikte en yüksek bükümlü olan 1050 T/m bükümlü iplikte yakalandığı görülmüştür. En yüksek tüylülük değeri tek katlı iplikte yakalanmıştır. Çift katlı iplikler içinde ise en yüksek tüylülük değeri 650 T/m bükümlü iplikte tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre büküm arttıkça tüylülük değerinde iyileşme olduğu tespit edilmiştir.

Ayrıca iplik numarası olarak çift katlı iplik numaralarında büküm arttıkça iplik boyunda kısalma olduğundan dolayı ipliğin kalınlaştığı görülmektedir. Maksimum iplik kalınlaşmasının en yüksek bükümlü iplikte (1050 tur/m) yakalandığı tespit edilmiştir.

5. KAYNAKLAR

1. Stepanovic, J., Radivojevic, D., Petrovic, V., Golubovic, S., 2010. Analysis of the Breaking Characteristics of Twisted Yarns. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 2(79), 40-44.
2. Oxtoby, E., 1985. *Spun Yarn Technology* Butterworth Publishing, London, 175-181.
3. Yılmaz, D., Özkan, H., Kimya, C., 2008. Kısa Stapel İplikçilikte Siro İplik Özelliklerinin İncelenmesi. *Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2, 1-16.
4. Najjar, S.S., Khan, Z.A., Wang, X.G., 2006. The New Solo-siro Spun Process for Worsted Yarns. *Journal of the Textile Institute*, 97(3), 205-210.
5. Temel, E., Çelik P., 2010. %100 Polyester ve Polyester/pamuk Karışımı Siro-spun İpliklerin Eğrilebilirliğinin İncelenmesi. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 20(1), 23-29.
6. Ömeroğlu, S., 2002. Kompakt İplikçilik Sisteminde Üretilen İpliklerin Yapısal Özellikleri ve Bazı Parametrelerinin Üzerine Bir Araştırma. Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, Bursa.
7. Maraşlı, S., Cin, M., 2009. Siro Eğirme Sistemi. Gaziantep Üniversitesi Gaziantep Meslek Yüksek Okulu, Bitirme Tezi.
8. Brunk, N., 2004. Reflections on the Spinning of Two-ply Yarns with Eli Twist Compact Set. *Spinnoation*, 20(6): 16-25.
9. Yılmaz, R., Babaarslan, O., Mörel, A., 2012. Eş Zamanlı Uygulanan Katlama ve Büküm İşleminin Katlı İplik Özellikleri Üzerindeki Etkisi. *Tekstil ve Mühendis*, 19(86), 24-33.
10. Volkman VTS-10 Makine Kataloğu, 2005.
11. Hamel Büküm Makinesi Kataloğu, 2000.
12. Saraçoğlu, Ö.G., 2011. Metal İçerikli Katlı İplik Üretim İmkânlarının Araştırılması, Bilimsel Araştırma Merkezi Koordinasyon Merkezi, Kayseri, 76.
13. TS 12863:2002 Tekstil-İplikler-Tüylülük Tayini-Foto Elektrik Metot.
14. TS 244 EN ISO 2060:1999 Tekstil-İplikler-Doğrusal Yoğunluk Tayini-Çile Metodu.

- 15.** TS 247 EN ISO 2061 TS EN ISO 2061/2015
Tekstil İpliklerde Büküm Tayini-Doğrudan Sayma Metodu.
- 16.** TS EN ISO 139: 2008 Tekstil - Şartlandırma ve Deney İçin Standart Ortamlar.
- 17.** TS EN ISO 2062/2010 Tekstil- Paketlerden Alınan İplikler-Tek İpliğin Kopma Mukavemetinin ve Kopma Uzamasının Tayini.
- 18.** TS EN ISO 16549:2004 Textiles- Unevenness of Textile Strands Capacitance Method, İplik Düzensüzlük ve Hata Tayini Metodu.

Wind Farm and Installed Wind Power Analyses of Turkey

Akın İLHAN¹ ORCID 0000-0003-3590-5291
Mehmet BİLGİLİ² ORCID 0000-0003-5339-6120
Beşir ŞAHİN^{*3} ORCID 0000-0003-0671-0890

¹Ankara Yıldırım Beyazıt University, Department of Energy Systems Engineering, Ankara

²Cukurova University, Ceyhan Engineering Faculty, Mechanical Engineering Department, Adana

³Cukurova University, Engineering Faculty, Mechanical Engineering Department, Adana

Geliş tarihi: 03.02.2022

Kabul tarihi: 21.03.2022

Atıf şekli/ How to cite: İLHAN, A., BİLGİLİ, M., ŞAHİN, B., (2022). Wind Farm and Installed Wind Power Analyses of Turkey. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37(1), 171-185.

Abstract

In this study, the analyses of wind farms and corresponding installed wind power of Turkey are conducted. Wind farms in Turkey have been evaluated by considering five different regions. The map of Turkey is similarly divided into five different regions, and the farms are clearly shown on these maps. The installed power or capacity of each wind farm is clearly shown. So, a total of 251 operating, under-constructional, and licensed wind farms have been extensively analysed in terms of their capacities. On the other hand, the total theoretical wind power potential of the territories has been studied comparatively, and it is concluded that among the total theoretical wind power potential of 115,329 MW, the total installed wind power of Turkey is reported to be 10,599.89 MW. Namely, it is concluded that only 9.19% of an installation ratio has been performed in Turkey, which corresponds an unused wind power potential of 90.81%.

Keywords: Installed power, Theoretical wind power potential, Wind energy, Wind Farm

Türkiye'deki Rüzgâr Santrallerinin ve Kurulu Rüzgâr Gücünün Analizleri

Öz

Bu çalışmada, Türkiye'nin rüzgâr santralleri ve buna karşılık gelen kurulu rüzgâr gücü analizleri yapılmıştır. Türkiye'deki rüzgâr santralleri, Türkiye'nin beş farklı bölgesi dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Türkiye haritası da benzer şekilde beş farklı bölgeye ayrılmıştır ve çiftlikler bu haritalarda açıkça gösterilmiştir. Her bir rüzgâr çiftliğinin kurulu gücü veya kapasitesi net olarak gösterilmiştir. Böylece, toplam 251 faal, yapım

*Corresponding author (Sorumlu yazar): Beşir ŞAHİN, bsahin@cu.edu.tr

aşamasında ve lisanslı rüzgâr santrali, kapasiteleri açısından, kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Öte yandan, bölgelerin toplam teorik rüzgâr gücü potansiyeli karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve 115,329 MW olan toplam teorik rüzgâr gücü potansiyelinden, Türkiye'nin toplam kurulu rüzgâr gücünün 10,599,89 MW olduğu sonucuna varılmıştır. Yani Türkiye'de; sadece %9,19'luk bir kurulum oranı gerçekleştirildiği ve bu oranın da, rüzgâr enerjisinin %90,81'lik kullanılmayan bir potansiyeline karşılık geldiği, sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kurulu güç, Rüzgâr çiftliği, Rüzgâr enerjisi, Teorik rüzgâr gücü potansiyeli

1. INTRODUCTION

Fossil fuel sources have declined rapidly in the last decade; besides, the rapidly increasing population and parallel technological developments have increased the demand for energy significantly [1,2]. Utilization of the fossil energy sources and increasing global warming associated due to these fossil fuels as well as the greenhouse gas emissions are the most crucial global problems and these problems have been urgently considered in the last decade by many countries [3-5]. Unless any precautions are not applied, it has been reported by the International Energy Agency (IEA) that the fossil based greenhouse gas emissions are expected to be doubled by 2050 [6]. On the other hand, due to the reason that conventional energy production is not very economical today, as well as when the harmful environmental influences of energy utilization are considered, and because of the continuously increasing energy demand of humanity; some troubles have been associated in obtaining of the sustainable energy demand. Namely, unsustainability occurs in current demand to energy when considered in terms of a worldwide aspect including economic, environmental, human as well as climatic needs [7]. In this context, it is quite indispensable to be shifted from fossil fuel utilization to the renewable energy sources to meet this demand and in parallel to obtain a significant reduction in the global CO₂ emissions to the justifiable levels.

Among the whole renewable energy sources, wind energy can be regarded as one of the most important type [7]. Figure 1 presents the annual and total installed wind power capacities of Turkey

in last twenty years, namely between 2000 and 2020. It is observed from this figure that the cumulative installed wind power which was 18.90 MW by 2000, has increased to 8,288 MW by the end of 2020. Besides, the highest annual wind power installation has been actualized in 2016 with an installation of 1,387.75 MW power.

As of the end of 2020, Turkey's total wind power of 8.288 GW is obtained from 194 wind power plants that have been put into operation. But, this value only corresponds to the total number of installed power plants. Besides, the total number of power plants including the installed, under-construction and licensed ones has reached to 251 in amount by the end of 2020. Turkey has a total installed power of 93.0227 GW, of which 8.91% is obtained from wind energy for electric generation.

However, the aim of Turkey is to increase the share of the wind energy in total generations to a total of 20 GW by the end of 2023. But, unfortunately only 41.44% of the aim has been actualized today. Accordingly, a cumulative of 11.712 GW of new wind power installations is required in the next two years in order to accomplish the projected goal of 2023. So, in order to increase the installed wind power of Turkey, the conscious and effective utilization of wind power potential is very essential. In the current study, the installed wind power and the total power potential of Turkey have been shown as province based. For this aim, Turkey was divided into 5 different regions for the analysis. The total theoretical wind power potential and the installed wind power in each region are analyzed and shown [2].

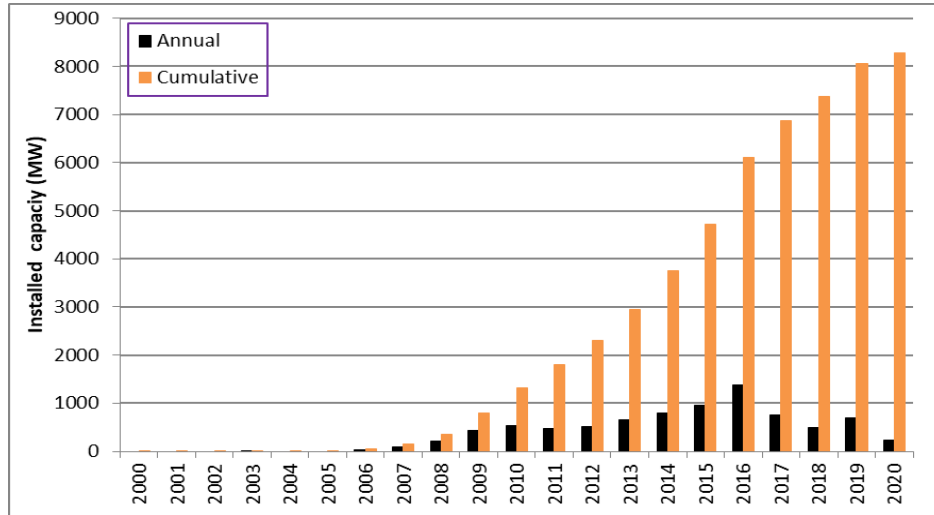


Figure 1. Annual and total installed capacities of Turkey between 2000 and 2020

2. DETAILED WIND POWER EXAMINATION OF TURKEY

2.1. Territorial Analysis of Wind Farm Locations and Corresponding Installed Wind Power Analyses

There are many studies found in the literature dealing with the wind energy potential and status of Turkey [8-11]. Based on the inspection of total wind energy status on Turkey; this study concludes that Turkey has a total of installed wind farms of 251 in which operating, under-constructional and licensed types share this amount by 194, 22, and 35, respectively. On the other hand, the installed wind capacities of each is reported to be 8,177.75 MW, 1,188.59 MW, and 1,233.55 MW, respectively for operating, under-constructional and licensed types of wind farms. These three types of wind power installations constitute a total installed wind power capacity in overall Turkey reaching 10,599.89 MW of installations [12].

In these regards, the maps of Turkey are given considering five discrete regions to present wind farm locations in each province of the state. Initially, the West region of Turkey is demonstrated in Figure 2 showing the wind farm locations of this region. Besides, the wind farm

information including the name of the facility as well as the type of the installation, for this region is presented in between Figures 3-6. Namely, Figure 2 shows the wind farm ranking for the analysis and the numbers between 1 and 91 are given in Figure 2, and the same numbers are given for the same wind farms between Figures 3-6 to demonstrate the name and the type. Besides, Figures 3-6 indicate the total power capacity of each discrete wind farms. So, a total of 23 wind farms have been analyzed in each of Figures 3, 4, and 5, and a total of 22 wind farms have been analyzed in Figure 6. The abbreviation “D.M.” has been used in Figure 2a to refer the region shown by rectangular area. It refers to “detailed map” concept and the detailed map of Figure 2a has been shown in Figure 2b. It was convenient to present this region on a detailed map, because due to scale, this region had to be shown on a larger map. The abbreviations shown in Figures 3-6 including “Op.”, “U.C.”, and “L.”, refer respectively to operating wind farms, under-constructional wind farms, and licensed wind farms. The operating, under-constructional, and licensed wind farms have been demonstrated with green, blue, and black colors, respectively in Figure 2 [12,13].

In the West region of Turkey, it is observed that among total of 91 wind farms; while 78 wind farms are in the status of operating; under-

constructional and licensed wind farms correspond to 7 and 6 in amount, respectively. Similarly, in this region of Turkey, among total installed power of 3,720.44 MW; installed power of operating,

under-constructional, and licensed wind farms share 87.39%, 10.36%, and 2.25%, respectively, corresponding to 3,251.30 MW, 385.29, and 83.85 MW of installations [12,13].

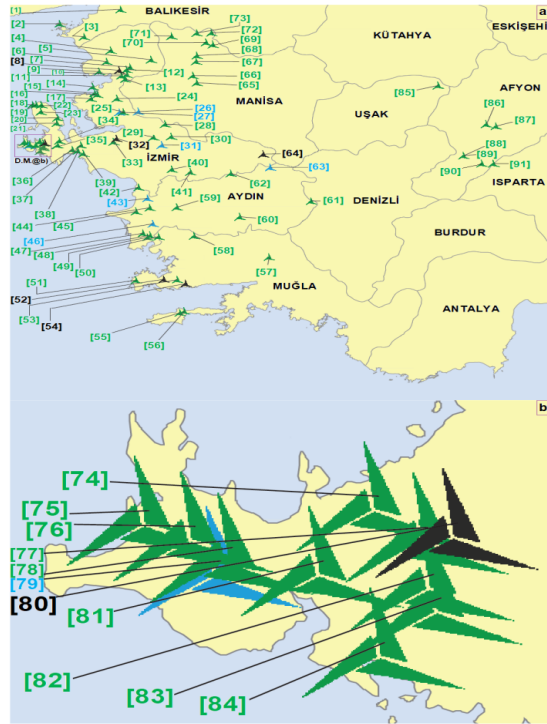


Figure 2. Locations of the installed wind farms in the West region of Turkey, a) whole wind farms in this region, b) D.M. of Alaçatı zone of İzmir province of West region of Turkey

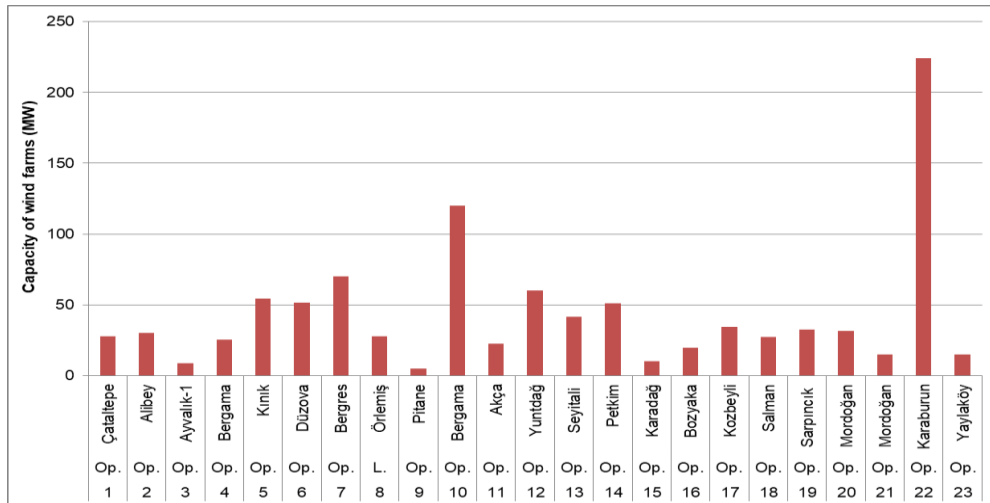


Figure 3. Capacities of wind farms in west of Turkey (wind farms of 1-23 shown in Figure 2)

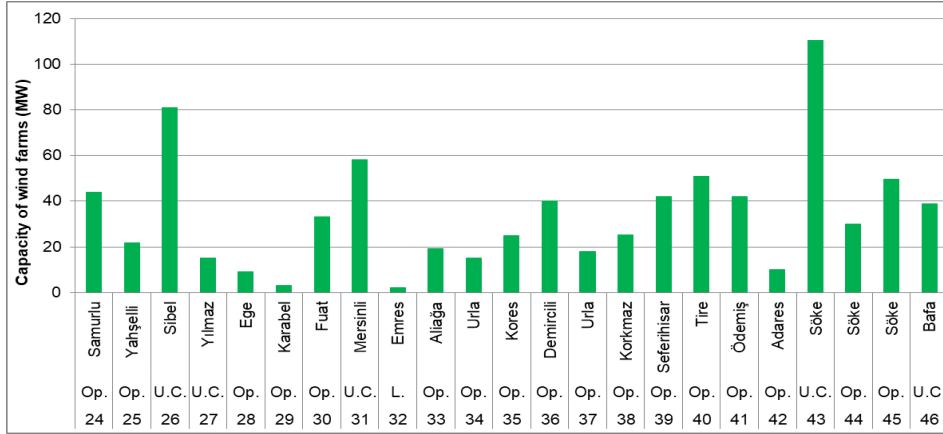


Figure 4. Capacities of wind farms in west of Turkey (wind farms of 24-46 shown in Figure 2)

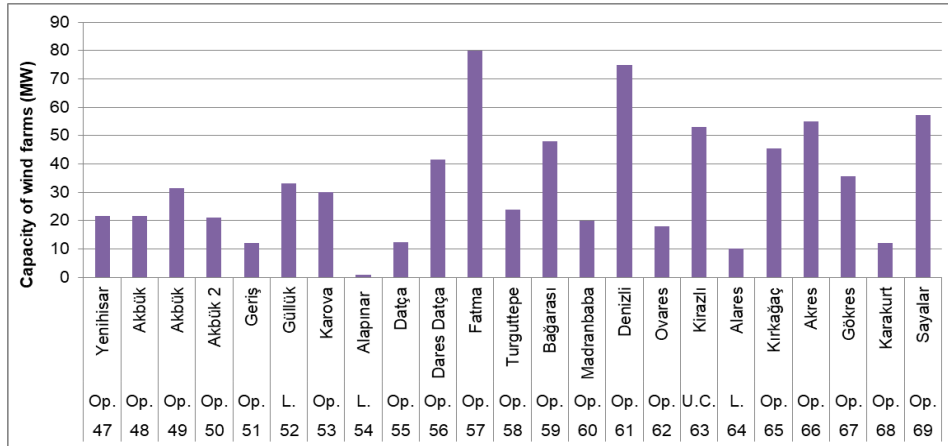


Figure 5. Capacities of wind farms in west of Turkey (wind farms of 47-69 shown in Figure 2)

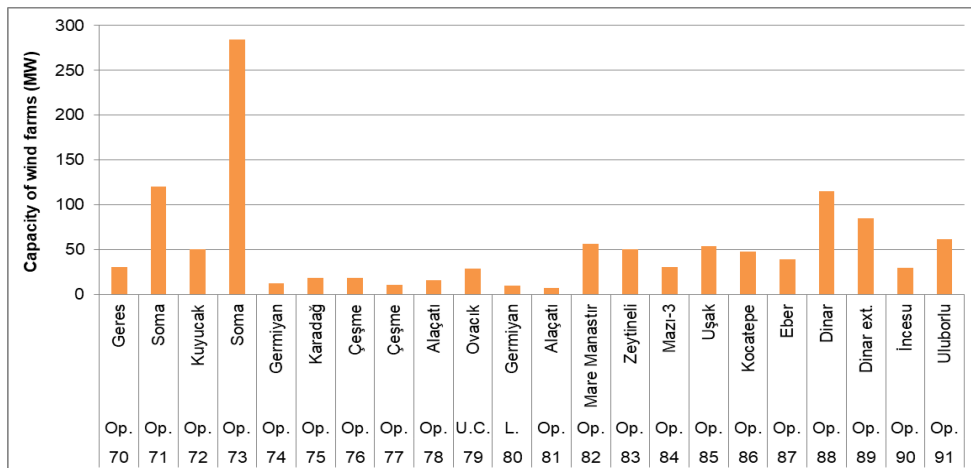


Figure 6. Capacities of wind farms in west of Turkey (wind farms of 70-91 shown in Figure 2)

The Northwest region of Turkey is demonstrated in Figure 7. The figure demonstrates the wind farm locations of Northwest region. Similarly, the wind farm information for this region is indicated in between Figures 8-12. The analysis for wind farm ranking of this region is shown in Figure 7. So, the numbers between 1 and 103 are given in Figure 7 and the same numbers are given for the same wind farms between Figures 8-12 to indicate the name and the type. Besides, Figures 8-12 point out the total power capacity of each discrete wind farms of

the region. So, a total of 23 wind farms have been analyzed in each of Figures 8, 9, and 10, and a total of 17 wind farms have been analyzed in each of Figures 11 and 12. The abbreviations and same definitions of “Op.,” “U.C.,” and “L.” are also valid for the wind farm analysis of Northwest region. Furthermore, the same colors of green, blue, and black have been also used for the same purpose of wind farm type identification as shown in Figure 7 [12,13].

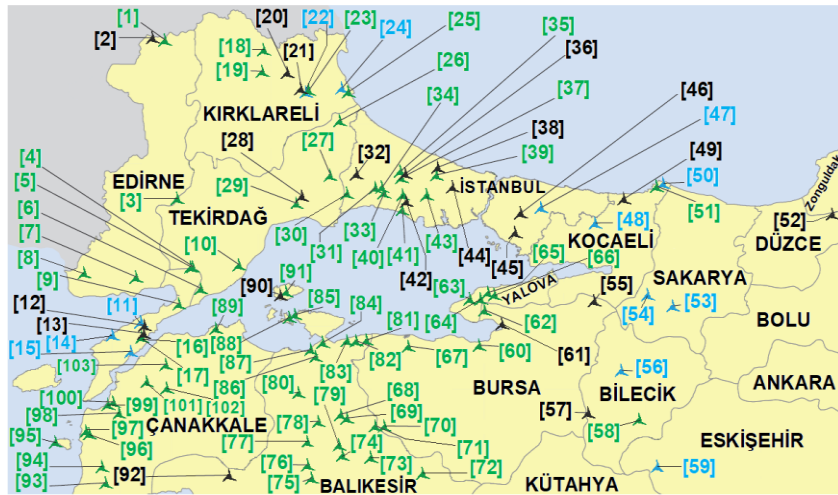


Figure 7. Locations of the installed wind farms in the northwest region of Turkey

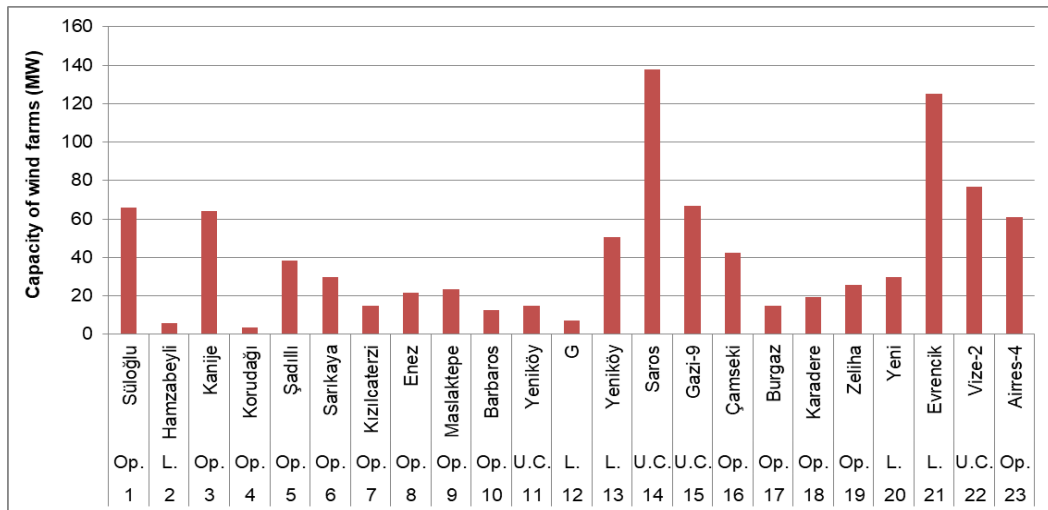


Figure 8. Capacities of wind farms in northwest of Turkey (wind farms of 1-23 shown in Figure 7)

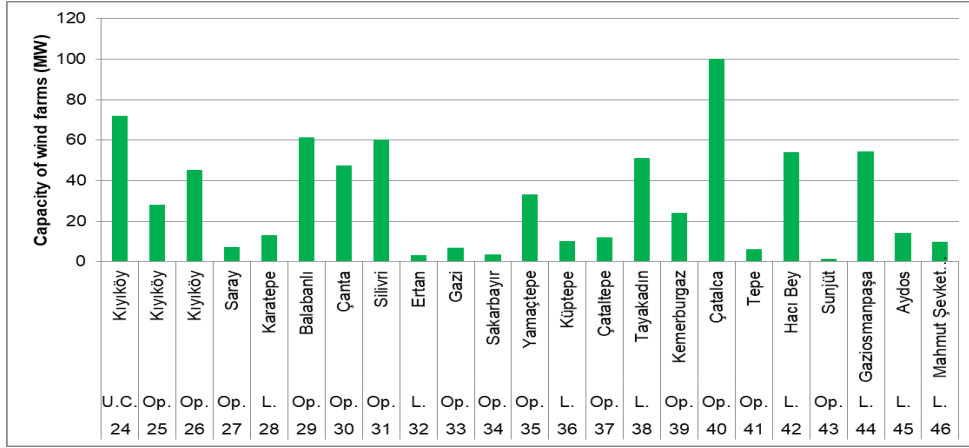


Figure 9. Capacities of wind farms in northwest of Turkey (wind farms of 24-46 shown in Figure 7)

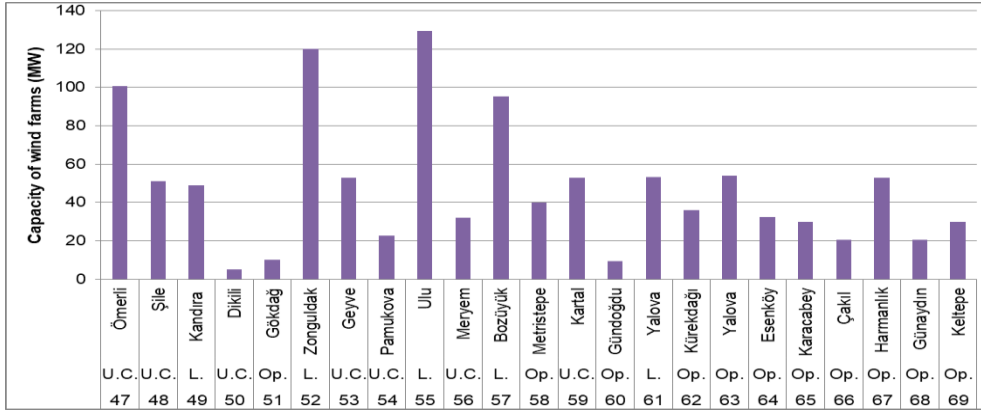


Figure 10. Capacities of wind farms in northwest of Turkey (wind farms of 47-69 shown in Figure 7)

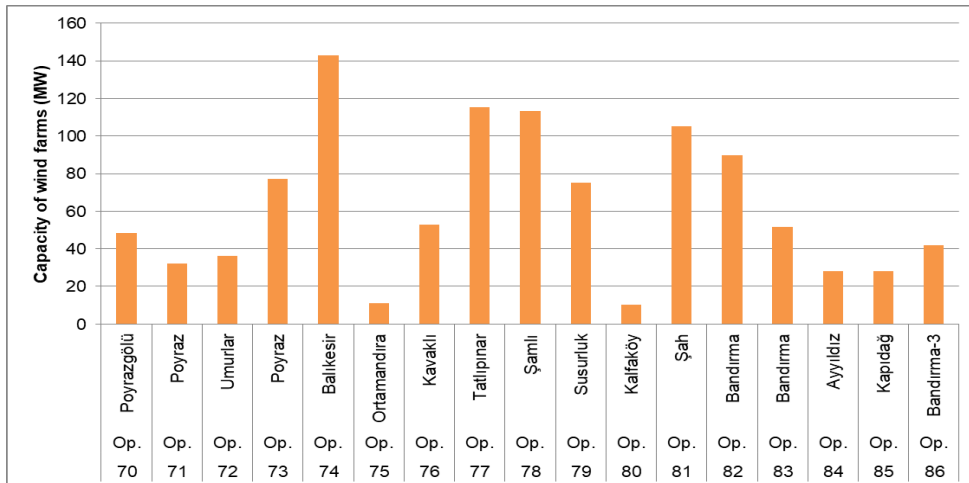


Figure 11. Capacities of wind farms in northwest of Turkey (wind farms of 70-86 shown in Figure 7)

On the other hand, a total of 103 wind farms are available in the Northwest region of Turkey, in which, operating, under-constructional, and licensed wind farms in this region compose 71, 12, and 20, respectively in amount, as shown in Figures 7, 8, 9, 10, 11, and 12. Namely, the total installed power of 103 wind farms in this region reaches 4,457.00 MW of installations. In this location of Turkey, the shares of operating, under-constructional, and licensed wind farms of 4,457.00 MW of total installations are reported to be 2,825.70 MW, 686.20 MW, and 945.10 MW of power values, respectively [12,13].

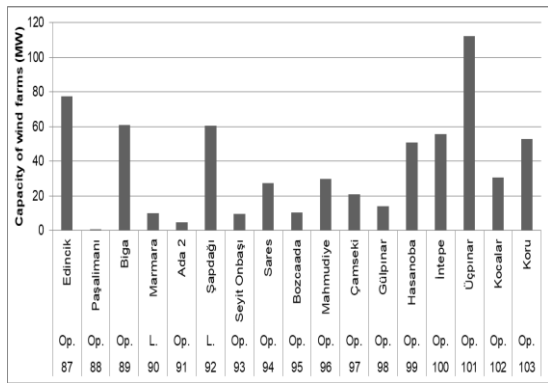


Figure 12. Capacities of wind farms in northwest of Turkey (wind farms of 87-103 shown in Figure 7)

Figure 13 presents the North region of Turkey in the analysis of wind farms, namely whole wind farm locations of the region is demonstrated in this figure. The wind farm information regarding the North region is exhibited in Figure 14. The wind farm ranking of the region is presented in Figure 13. So, in Figure 13, the numbers between 1 and 11 are shown for the wind farms of this location and the same numbers are demonstrated for the same wind farms in Figure 14 to indicate the name and the type of the wind farm. Besides, Figure 14 denotes the total power capacity of each discrete wind farms of the region. The abbreviations and the color utilizations that were used in the previous regions have been also applied in the wind farm and the capacity analyses of North region of Turkey [12,13].

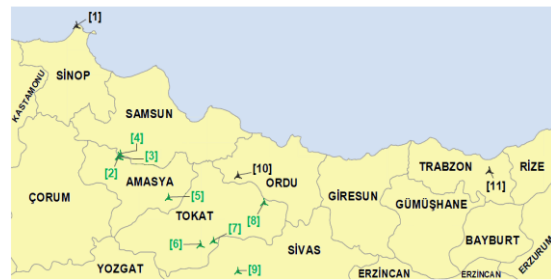


Figure 13. Locations of the installed wind farms in the North region of Turkey

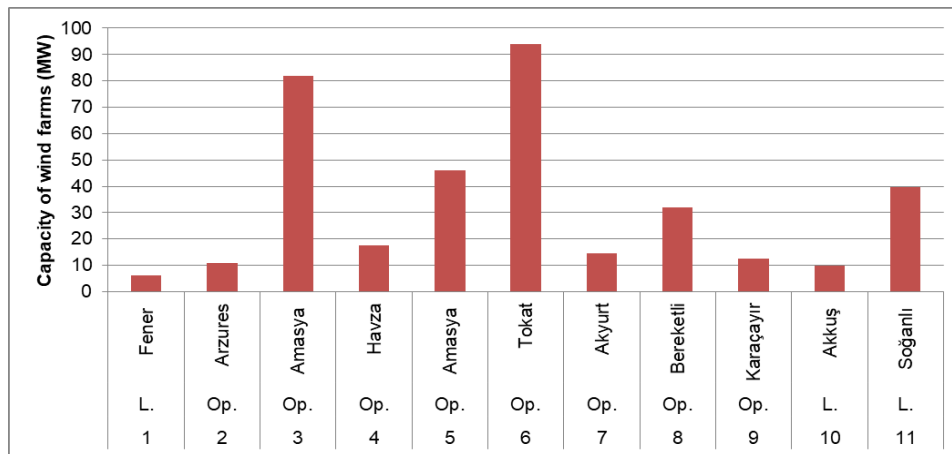


Figure 14. Capacities of wind farms in north of Turkey shown in Figure 13

Similarly, in the North region of Turkey, a total of 11 wind farms are found as demonstrated in

Figures 13 and 14. While, 8 wind farms stand for operating type and 3 wind farms stand for licensed

type, it is observed that no under-construction type of wind farm is existed in this location. The total installed power value of 11 wind farms constitutes a power value of 365.40 MW. And, 309.80 MW of installations and 55.60 MW of installations are reported to be existed in operating type of installations and licensed type of installations, respectively [12,13].

The wind farm analysis of the South and Middle regions of Turkey has been shown in Figure 15. On the other hand, the information regarding the wind farms of the region is demonstrated in Figures 16 and 17. The wind farm ranking of the

region is presented in Figure 15, in a similar way. So, the numbers between 1 and 37 are demonstrated for the wind farms of the region in this figure and the same numbers are shown for the corresponding wind farms in Figures 16 and 17 to indicate the name and the type of the wind farm. Besides, both figures exhibit the total power capacity of each discrete wind farms of the region. While 23 wind farms have been analyzed in Figure 16, 14 wind farms have been taken into account in Figure 17. Same abbreviations and color utilizations are also valid for the South and Middle regions of Turkey [12,13].

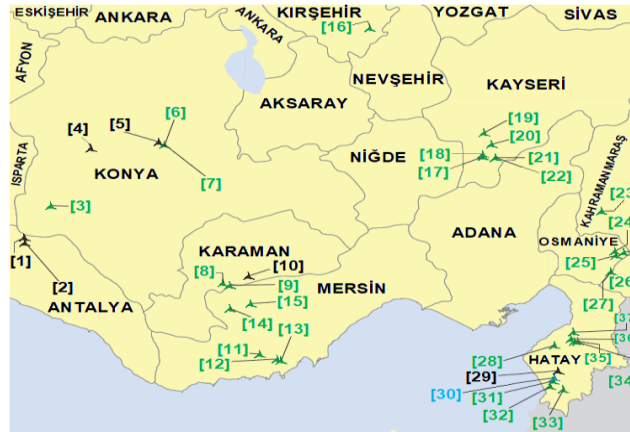


Figure 15. Locations of the installed wind farms in the south and Middle regions of Turkey

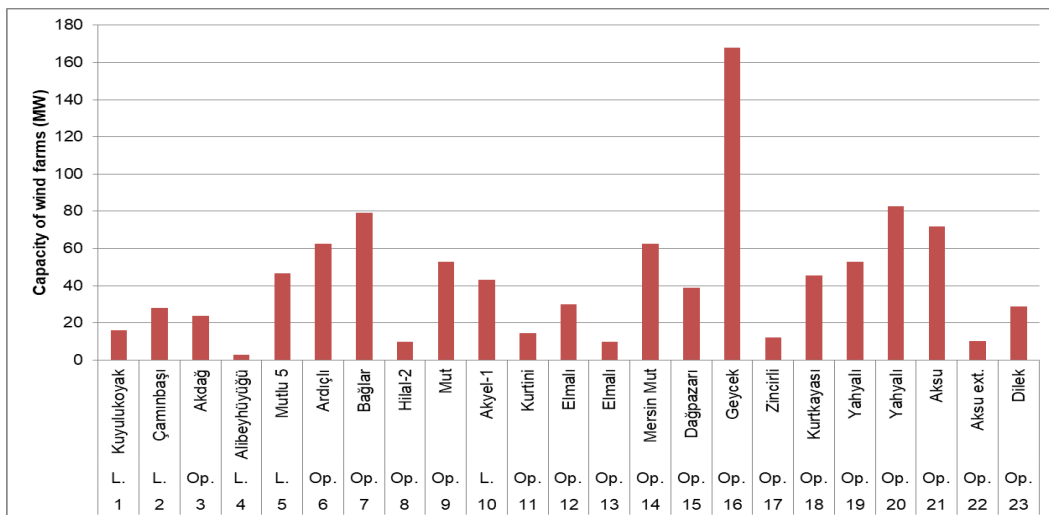


Figure 16. Capacities of wind farms in South and middle of Turkey (wind farms of 1-23 shown in Figure 15)

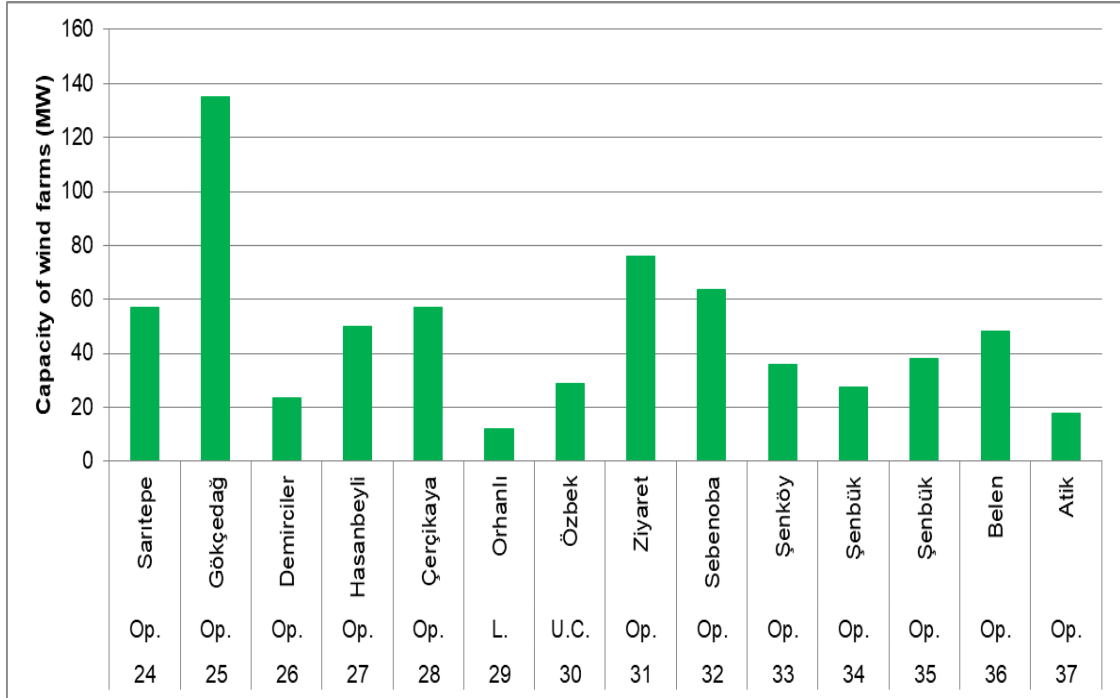


Figure 17. Capacities of wind farms in south and middle of Turkey (wind farms of 24-37 shown in Figure 15)

Furthermore, a sum of 37 wind farms is situated in the South and Middle regions of Turkey. Among these cited wind farms presented in Figures 15, 16, and 17; 30 operating, 1 under-construction, and 6 licensed wind farms are available. Besides, total installed power of these wind farms reach to 1,485.90 MW for operating ones, 28.80 MW for under-construction ones, and 149.00 MW for licensed ones are reported. Total of these three types of installations compose a cumulative installed wind power of 1,663.70 MW in these locations of the country [12, 13].

Finally, the wind farm analysis of the South and Southeast regions of Turkey has been considered in Figure 18. In parallel, the wind farm information of the region is shown in Figure 19. In a similar approach, the wind farm ranking of the region is given in Figure 18. So, the numbers between 1 and 9 have been demonstrated for the wind farms of these locations in this figure. Besides, the same numbers show the

corresponding wind farms in Figure 19 in order to exhibit both name and the type of the same wind farm. The figure demonstrates the total power capacity of each separate wind farms of the region. Same abbreviations and color utilizations have been also utilized for the South and Southeast regions of Turkey [12,13].



Figure 18. Locations of the installed wind farms in the South and southeast regions of Turkey

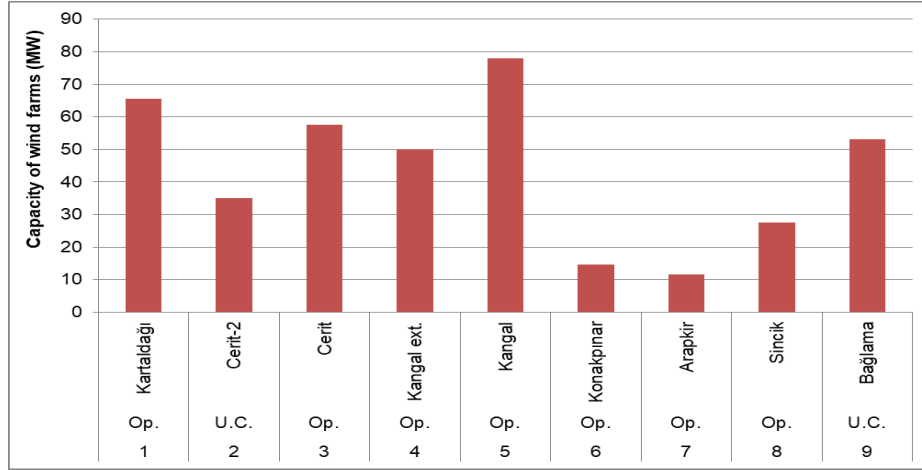


Figure 19. Capacities of wind farms in South and Southeast of Turkey shown in Figure 18

In the last part of the analyses, the South and Southeast regions of Turkey have been considered. In these locations, currently 9 wind farms are available, as indicated in Figures 18 and 19. Among them, while 7 wind farms are operating, 2 wind farms are in the state of under-construction. However, no wind farms of licensed type are available in these locations. On the other hand, the total wind power in these zones is observed to be 393.35 MW of installations. In this regards, the cumulative installations for operating, under-construction and licensed types are conducted to be 305.05 MW, 88.30 MW, and 0.00 MW, respectively, in South and Southeast regions of the country [12, 13].

In determining the proper location of a wind farm, first of all, the wind capacity of the region where the wind farm will be installed, needs to be measured. Propeller length, blade system, and turbine model should be adjusted completely according to the wind pressure. Namely, there should be proper matching of the machinery components and the wind pressure of the region. If proper optimization is not obtained between both, the propellers may deteriorate and the efficiency of the wind turbine may decrease. On the other hand, it is also important to position the wind turbine in such a way that it does not affect the ecosystem. This is very important for the continuation of

natural life without any damage. For this reason, high care should be taken when deciding on the place of the wind farm. For instance, establishing a location that will affect the migration routes of birds can cause serious damage to the ecosystem. Shortly, the area to be established should be studied first, and then the design and material needs should be met according to the requirements of the region.

In order to reach a solution in a short way, wind energy potential atlases can be used. By using these maps, the location of the wind power plant can be decided correctly. For example, if the wind speed is measured and found to be more than 7 kilometers and have continuity; it can be determined that the region is suitable for establishing a wind farm. After this stage, it will be necessary to obtain a license by applying to authorized institutions. Besides, wind farms cannot be established in protected areas, national parks, nature protection areas and wildlife protection areas. Therefore, the fact that the surveyed region receives enough wind and that is suitable for wind energy production cannot be considered as the only criterion. Moreover, countries often publish maps of locations where wind farms cannot be installed. Finally, after obtaining the necessary permits and completing the other necessary tasks, wind turbines can be installed in the interested area.

Considering the analysis in the present article, it has been understood that the installed wind power has increased significantly in the western regions of Turkey. This is directly due to the fact that high wind speeds can be achieved in the western regions of the country. In these locations, the mountains lie perpendicular to the sea coast and the wind energy blowing from the open sea to the land is easily transported to the regions at a certain distance from the coast. Namely, less losses of the wind power in the western region of Turkey occurs, that result high wind farm installations in these regions.

2.2. Territorial Comparison of the Theoretical Wind Power Potential and the Installed Wind Power

Wind farms are the locations that are open to the free wind flow, and the devices which are used to capture wind energy are the wind turbines, namely wind turbines are utilized to generate electricity.

The approaching free-stream wind speed to the turbine rotor disc is the most important parameter influencing the generated output power obtained from a wind turbine. Accordingly, the change of the wind power potential is proportional with the cube of the free-stream wind speed. The available or the theoretical power that can be captured from an air stream is physically expressed with Equation 1, shown below:

$$P_{av}=0.5\rho A_d V_i^3 \quad (1)$$

In this equation, the designations demonstrated by P_{av} , ρ , A_d , and V_i respectively indicate the available wind power, the air density, the cross-sectional area of the wind turbine rotor disc, and the free-stream wind speed approaching the wind turbine rotor disc. In this equation, the free-stream wind speed approaching the wind turbine rotor disc has the potential of available wind power. However, the coefficient of the Betz-limit is multiplied by the theoretical power to obtain the maximum accessible turbine power. The maximum power limited by Betz is given by Equation 2, demonstrated below [14]:

$$P_{Betz}=0.5\rho A_d V_i^3 \times 0.59 \quad (2)$$

Namely, it is not so possible to convert whole available wind power in an air stream of certain velocity, to electrical energy. In determining the theoretical wind power potential of a certain location, or whole Turkey, Eq. (1) is valid, and it is utilized considering the wind speed maps. On the other hand, the real installed wind power at a certain location or in whole Turkey remains always less than the theoretical wind power potential due to the losses or due to the existence of the locations where wind turbine installation has not been actualized. In short, the ratio of the installed wind power to theoretical wind power potential is an important parameter to make a comparison of the actualized installations on the land to the total available wind power. Thus, studies can be carried out considering this ratio, on the extent to which the installations can be increased.

There are also ways to circumvent the Betz limit. The Betz limit is an efficiency barrier in conventional wind turbines. However, this barrier can be overcome by converting local pressure energy into kinetic energy using shrouding systems. In this way, more portion of the theoretical wind power can be converted to real installed wind power.

The comparison of the theoretical wind power potential expressed according to the installed wind power in five different territories of Turkey is presented in Figure 20. In this figure, y-axis is presented as logarithmic in order to demonstrate the comparison better. The values shown on top of each column demonstrate the real values of theoretical wind power potential and the corresponding installed wind power. The analyzed territorial regions in terms of wind power of Turkey include West, Northwest, North, South and middle, and South and southeast regions. The theoretical wind power potential column shown with the designation "Others" include 9 cities which do not have any corresponding installed wind farm. On the other hand, the ratio of installed

wind power to the theoretical wind power potential for five territorial regions is shown in Figure 21. These 9 cities of Turkey which do not have any wind farm or installed wind power include Çankırı, Karabük, Bartın, Kars, Kırıkkale, Hakkari, Artvin, Ardahan, and Iğdır provinces. These provinces have theoretical wind power potential of 315 MW, 73 MW, 62 MW, 40 MW, 40 MW, 29 MW, 10 MW, 9 MW, and 2 MW, respectively, constituting a total of 580 MW. Namely, these provinces of Turkey having a total of 580 MW of theoretical wind power can be considered as locations for the investors in terms of wind farm installations.

As it is shown in Figure 20, the total theoretical wind power potential of Turkey and the total installed wind power are 115,329 MW and 10,599.89 MW, respectively. As seen in Figure 21, these power values correspond to a ratio of 9.19%. From another point of view, Turkey's total wind power potential of 90.81% has not unfortunately been evaluated yet. Besides, the analyses have presented that the highest wind power installations have been executed in the Northwest region of Turkey. In this location, while the value of the installed wind power is 4,457.00 MW, the corresponding theoretical potential is equal to 33,841 MW. Namely, the highest ratio of 13.17% of installations has occurred in Northwest region.

Considering West region, it is observed that the installations of wind power in this region are also comparatively higher. In this region, installations of 3,720.44 MW of wind power have been actualized among the total of 42,764 MW of theoretical wind power. These outcomes demonstrate that in the West region, a ratio of 8.70% of installations has occurred. Finally, as also mentioned above, although 580 MW of theoretical wind power is available in 9 cities of Turkey as shown in Figure 20, there is no installed wind farm in these cities which results an installation ratio of 0%, as shown in Figure 21. An important point that is required to be mentioned here is the y-axis of Figure 20, i.e., the logarithmic power. The y-axis of Figure 20 has been shown as logarithmic axis, because the discrepancies between the theoretical wind power potential and the real installed wind power are so large in terms of the arithmetic axis. Namely, for the analyzed five regions of Turkey, and also for the cumulative values of wind power, the ratio of the real installed wind power to the theoretical wind power potential is in between 2.12% - 13.17%. This ratio interval for whole regions and for the cumulative values of wind power would cause that the distance between the values of the both functions on the arithmetic axis would be so high; so, it was decided the analyses to be shown on the logarithmic axis.

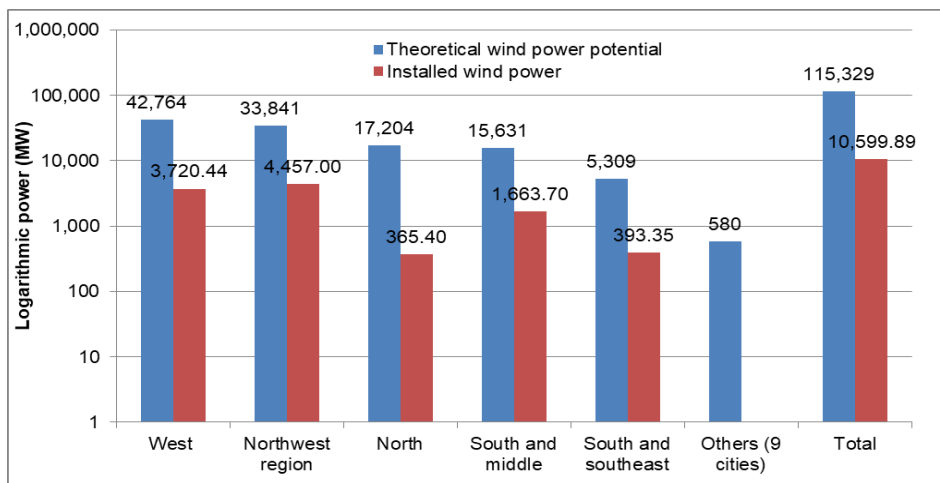


Figure 20. The comparison of the theoretical wind power potential and installed wind power

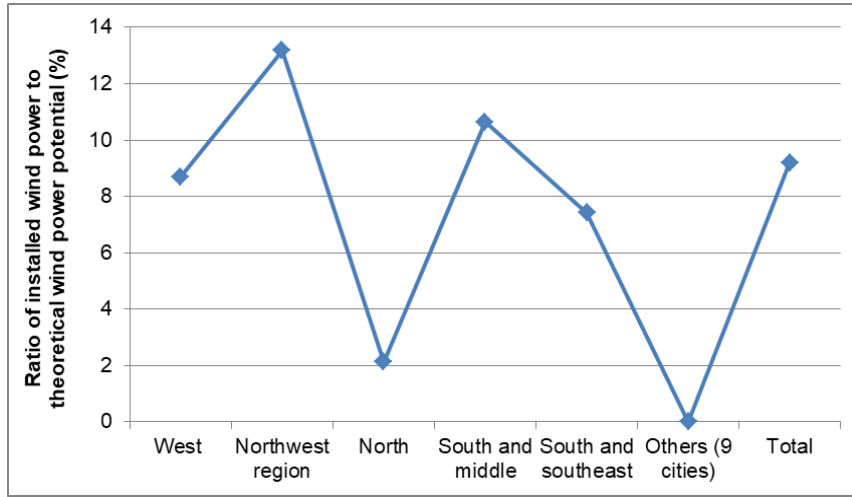


Figure 21. Ratio of installed wind power to the theoretical wind power potential

3. CONCLUSIONS

This study has provided a good focus on the current status of installed wind power and theoretical wind power potential of Turkey. Besides, when the analyses performed on the current study are considered, it can also be reported that the total installed wind power of Turkey considering the worldwide situation has increased in terms of the percentage. Namely, the global installed wind power capacity has increased from 18,039 MW to 743,000 MW, respectively from 2000 to 2020. So, it has been concluded in this study that the ratio of wind power installations of Turkey to whole World was initially 0.10% by 2000, which has increased to 1.12% by 2020. As a result of these analyses, it has been also reported that Turkey has a better installation speed in wind energy compared to the rest of the World and gives more importance to wind investments.

Besides, in this study, operating, under-construction and licensed wind farms were analyzed in five different territories of Turkey. Namely, a total of 251 wind farms have been taken into account in West, Northwest, North, South and middle, and South and southeast regions of the country. Besides, in these locations, theoretical wind power potential values have been presented. The comparison of the installed wind power with respect to the theoretical wind power potential has

been executed for the five regions. It has been concluded that highest installations have occurred in Turkey in Northwest and West regions. However, it has been observed that although sufficient wind power potential is available in 9 cities of Turkey corresponding to 580 MW, it is reported that no wind farm installations have been unfortunately actualized in those cities. Total installed wind power of Turkey is 10,599.89 MW among the total theoretical wind power of 115,329 MW, which correspond an installation ratio of 9.19%. In other words, the unused wind power potential of Turkey is 90.81%. Finally, it is concluded that there is a need of installations of additional wind farm facilities in five regions considered separately as well as in 9 cities which do not have any installed wind farm yet.

4. REFERENCES

1. Bilgili, M., Ozbek, A., Sahin, B., Kahraman, A., 2015. An Overview of Renewable Electric Power Capacity and Progress in New Technologies in the World, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 323-334. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.148>.
2. Ilhan, A., Bilgili, M., Sahin, B., 2020. Analyses of Current Wind Energy Status of Turkey and its Future Prospect, *Cukurova University*

- Journal of Faculty of Engineering, 35(4), 1059-1071.
3. Kaygusuz, K., 2010. Wind Energy Status in Renewable Electrical Energy Production in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 2104-2112.
 4. Ata, R., 2013. The Current Situation of Wind Energy in Turkey. Hindawi Publishing Corporation. *Journal of Energy*, 1-8.
 5. Wind Europe, 2018. Wind Energy in Europe in 2018, Trends and Statistics, <http://www.windeurope.org/>.
 6. International Energy Agency (IEA), 2021. Carbon Capture and Storage: The solution for Deep Emissions Reductions, <https://www.iea.org>.
 7. İlhan, A., Bilgili, M., Sari, M., Şahin, B., 2021. Economic Analyses of Onshore Commercial Large Scale Wind Power Plant Installed in Turkey. *Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences*, 11(1), 170-176.
 8. Balat, H., 2005. Wind Energy Potential in Turkey. *Energy Exploration and Exploitation*, 23(1), 51-59.
 9. Oğulata, R.T., 2003. Energy Sector and Wind Energy Potential in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 7(6), 469-484.
 10. İlkilic, C., Aydın, H., Behcet, R., 2011. The Current Status of Wind Energy in Turkey and in the World. *Energy Policy*, 39, 961-967.
 11. Guler, O., 2009. Wind Energy Status in Electrical Energy Production of Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 473-478.
 12. Turkish Wind Energy Association (TWEA), 2020. Turkey Wind Energy Statistical Report, <https://www.tureb.com.tr/>.
 13. Turkish Wind Energy Association (TWEA), 2020. Turkish Wind Power Plant Atlas (TWPPA), <https://www.tureb.com.tr/>.

Farklı Atkı Sıklıklarına Sahip Denim Kumaşların Aşınma Sonucunda Değişen Optik Özelliklerinin İncelenmesi

Sabiha SEZGİN BOZOK*¹ ORCID 0000-0002-8464-0405
R. Tuğrul OĞULATA¹ ORCID 0000-0002-6840-5296

¹Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Adana

Geliş tarihi: 03.01.2022

Kabul tarihi: 21.03.2022

Atıf şekli/ How to cite: SEZGİN BOZOK, S., OĞULATA, R.T., (2022). Farklı Atkı Sıklıklarına Sahip Denim Kumaşların Aşınma Sonucunda Değişen Optik Özelliklerinin İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37(1), 187-195.

Öz

Denim kumaşlar, günlük hayatta kullanım sıklığı en fazla olan tekstil ürünlerinden birisidir. Kullanım esnasında yoğun aşınmaya maruz kalabilen denim ürünlerinde kumaş yapısının zarar görmesiyle meydana gelen optiksel değişiklik de kaçınılmaz hale gelmektedir. Çalışmada, denim kumaşların aşınma ile değişen optik özelliklerini inceleyebilmek amacıyla 3/1 Z dimi dokunmuş, konstrüksiyonunda boyasız olan atkı ipliğinin sıklıkları farklı (16, 20, 24 atkı/cm), çözgü iplikleri ise boyalı üç farklı denim kumaşın aşındırma işlemleri sonunda değişen renk değerleri incelenmiştir. 1000, 2500, 5000, 7500, 10000 aşındırma devirleri sonunda yapılan renk ölçümleri aşındırma öncesi değerlerle karşılaştırılmış ve bu şekilde denim kumaşların renk değişim davranışının incelenmesi amaçlanmıştır. Numunelerde 2500 devir aşındırma sonrasında ilk belirgin toplam renk farkı değeri elde edilmiştir. Uygulanan en yüksek aşındırma devrinden sonra renksiz atkı ipliği sıklığı en az olan numunelerde renk kuvvetindeki düşüş diğerlerine göre daha az çıkmıştır. Numunelerin aşındıkça renk tonlarının mavi ve yeşil tona kaydığı, renklerinin parlaklaştığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler Aşınma, Denim kumaş, Optik özellik, Kubelka-munk, Renk değişimi

Investigation of Changed Optical Properties of Denim Fabrics Caused by Abrasion

Abstract

Denim fabrics, which people use often in daily life, are exposed to wear intensively during use. In denim fabric products, which can be exposed to intense wear during use, optical changes that occur due to damage to the fabric structure. In this study, in order to examine the changed optical properties of denim fabrics caused by wear, the changing color values of three different denim fabrics, woven with 3/1 Z twill, undyed weft yarn densities (16, 20, 24 weft/cm), with dyed warp yarns, were investigated. The color measurements made at the end of 1000, 2500, 5000, 7500, 10000 abrasion cycles and the results were compared which calculated by using the values before abrasion and it was aimed to examine the

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Sabiha SEZGİN BOZOK, sbozok@cu.edu.tr

color change behavior of denim fabrics in this way. The first significant total color difference value was obtained after 2500 abrasion cycles on the samples. After the highest abrasion cycle applied, the decrease in color strength was less in the samples with the lowest density of colorless weft yarn compared to the other samples. It has been determined that as the samples erode, their color tones shift to blue and green tones and their colors become brighter.

Keywords: Abrasion, Denim fabric, Optical properties, Kubelka-munk, Color difference

1. GİRİŞ

Tekstil endüstrisinde belirgin bir yere sahip olan denim kumaşlar, geniş yaş aralıklarındaki kullanıcılar tarafından tercih edilen popüler ürünlerden birisidir. Kumaşı oluşturan ipliklerin çeşidine, doku türüne, kumaş yapısına göre farklı çeşitlerde üretilebilmektedir [1].

Dokuma türü denim kumaşların temel üretim basamakları; iplik eğirme, çözgü hazırlama, çözgü ipliği boyama, haşılama, dokuma, terbiye, kontrol ve katlama, paketlenme ve sevkiyat şeklinde sıralanabilmektedir [2]. En çok bilinen ve yaygın olarak kullanılan denim kumaş konstrüksiyonu genelde 2/1 ya da 3/1 Z dimi şeklindedir. Bu şekildeki kumaş konstrüksiyonlarında çözgü ipliği kumaş yüzeyinde atkı ipliğine göre daha belirgin görüldüğü için çözgü iplikleri indigo boyalı, atkı iplikleri ise boyasız, beyaz renkte kullanılmaktadır.

İndigo boya, insan sağlığına zararlı olmayan, sentetik ve doğal olarak üretilebilen, mavi tonlarıyla denim kumaşlar için vazgeçilmez olan boya türlerinden birisidir [3]. Denim üretiminde tercih edilen özelliklere göre ürün geliştirme için kumaş üretiminden sonra mekanik ve kimyasal bitim işlemleri uygulanabilmektedir. Taş yıkama, enzim yıkama, kumlama, mekaniksel abrasyon, su jeti ve lazer işlemleri gibi farklı işlemlerle son kullanıcının isteğine göre denim ürünlerine farklı efektler ve özellikler kazandırılabilir [4].

Tekstilde aşınma dayanımı, malzemenin başka bir yüzeye sürtünmesi sonucu liflerin, ipliklerin ve kumaşların fiziksel olarak zarar görmesine, parçalanmasına karşı gösterdiği dirençtir. Günlük hayatta kullanım sıklığı fazla olan diğer tekstil ürünlerinde olduğu gibi denim kumaşlar da kullanım esnasında aşınmaya fazla maruz

kalmaktadır. Kumaşların aşındırma dayanımını etkileyen faktörler genel olarak lif türü, iplik yapısı, kumaş konstrüksiyonu şeklinde sıralanmaktadır. Ayrıca uygulanan fonksiyonel bitim işlemleri de denim kumaşların aşınma dayanımı, renk haslığı gibi özelliklerini de olumlu yönde etkileyebilmektedir [5-7]. Denimde görülen aşınma sonucu renk solma eğiliminin sebebi; kumaş yüzeyindeki çözgü ipliklerinin indigo ile renklendirildiğinde sadece iplik yüzeyine yakın liflerin boyanması, iplik merkezindeki liflerin ise renksiz kalmasından kaynaklanmaktadır [8]. Denim ürünlerde kullanım sırasında meydana gelen aşınma etkileri, mavi liflerin kısmen yapıdan ayrılmasıyla giderek daha fazla beyaz lifin açığa çıkmasıyla sonuçlanır. Denim kumaş tüketicilerin bir kesiminin tercih ettiği aşınma sonucu oluşan eski görünüm hem üretim aşamasındaki bitim işlemleriyle hem de kullanım aşamasında meydana gelmektedir. Bu renk efektini tercih eden son kullanıcıların yanında belli bir tüketici kesiminin de değişmeyen, düz renk denim ürünlerine talebinin son yıllarda arttığı tespit edilmiştir [9].

Daha önce yapılmış bir çalışmada, lacivert renkte boyanmış, %100 pamuklu bezayağı kumaşlara Martindale Aşınma metodu ile farklı devirlerde aşındırma uygulanıp, her devir sonunda krokmetre cihazı kullanılarak numunelerin yaş ve kuru sürtme haslığı ölçülmüştür [10]. Sonuçlarda beklendiği gibi aşındırma tur sayısı arttıkça numunelerin haslık derecelerinin düştüğünü, özellikle bu düşüşün en fazla 10000 ile 12000 aşındırma devirleri arasında olduğunu tespit etmişlerdir.

Değişen atkı sıklığının pamuk ve polyester karışımli gömleklilik kumaşların yüzey aşınmasına etkisinin incelendiği bir çalışmada; atkı sıklığının artışının kumaşların aşınma dayanımlarını arttırdığı ortaya koyulmuştur [11]. Yapılan bir çalışmada değişen pamuk oranlarında bambu,

viskon ve modal karışımı farklı süprem örme kumaşlara 5000, 10000, 15000 ve 20000 tur aşındırma uygulanmış ve her devir sonunda numunelerin spektrofotometre ile CIELAB renk sistemine göre L^* , a^* , b^* , C, h, K/S (renk kuvvetleri) ve ΔE^* (toplam renk farkı) değerleri elde edilmiştir [12]. İstatistiksel olarak da değerlendirilen çalışma sonuçlarında, K/S ve C değerlerinin tur devirleri sonundaki değişim davranışlarının birbirine yakın olduğunu, özellikle 5000 tura kadar L^* (açıklık-koyuluk) değerlerinin devir sayısı arttıkça arttığını (kumaş renginin açıldığını), 5000 turdan sonra aşındırmanın kumaşın renk değerlerine etkisinin azaldığını ortaya koymuşlardır.

Alpay, Becerir ve Akgün (2005); farklı numaralarda iplik içeren, dokuma türleri farklı ve farklı sıklık değerlerine sahip yün içerikli dokuma kumaşların aşınma sonrası değişen renk değerlerini incelemiştir [13]. Kumaşların yüzde reflektans değerlerinin en yüksek 2500 aşınma devrinden sonra görülmüştür. Z dişi örgülü ancak atkı sıklıkları farklı olan iki numunedan atkı sıklığı daha yoğun olan numunenin aşınma sonrası yüzde reflektans değeri daha yüksek çıkmıştır. Atkı sıklığı daha az numunenin ise 2500 tur aşındırma sonrası devir sayısı arttıkça yüzde reflektans değerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak atkı sıklığı daha yoğun olan numunenin, sıklığı daha az olan numuneye göre aşınmadan daha fazla etkilendiği, aşındırma öncesi numunelere göre renklerinin daha çok değiştiği ortaya konulmuştur. Başka bir çalışmada pamuklu kumaşların yine her aşındırma devri sonunda renk ölçümleri yapılmış ve en büyük reflektans ve renk değişiminin 0-2500 aşındırma devirleri arasında gerçekleştiği tespit edilmiştir [14]. Yapılan benzer bir çalışmada; farklı ipliklerden elde edilmiş ve farklı tipte yumuşatıcı uygulanmış pamuklu kumaş numunelerine aşındırma sonrası yapılan renk ölçümlerinde L^* ve K/S değerlerindeki en fazla değişimin yine 2500 devir sonunda olduğu tespit edilmiştir [15]. Siro ipliğinin kullanıldığı kumaşların aşınma dayanımı diğerlerine göre daha düşük olduğu için bu kumaşların aşındırma sonrası ΔL^* değerleri daha yüksek çıkmıştır.

Bu çalışmada; atkı ipliği boyasız, çözgü ipliği boyalı denim kumaşların aşındırma sonrası renk değişimlerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Boyasız olan atkı ipliği sıklık artışının, denim kumaşların aşındırma sonrası renk değişimini nasıl etkilediği CIELAB renk sistemine göre elde edilen renk değerlerine göre incelenerek tespit edilmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Materyal

Çalışma kapsamında kullanılan denim kumaş numunelerinin çözgü iplikleri (Ring iplik, %100 pamuk, Ne 13,5) sentetik indigo boyarmadde (DyStar Indigo Vat 40% solution, C.I. Reduced Vat Blue 1) ile boyalı; atkı iplikleri (Pamuk, Ring iplik, Ne 16 + Elastan, 78 dtex) boyasızdır. Kumaş üretim bilgileri; tarak numarası 68/4, tarak eni 215 cm şeklinde olup, numune kodları ve diğer bilgiler Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Denim numunelerin kumaş özellikleri

Numune	Atkı sıklığı (atkı/cm)	Çözgü sıklığı (tel/cm)	Gramaj (gr/m ²)
D16	16	42	328,7
D20	20	42	355,6
D24	24	42	369,2

Denim kumaşların çözgü ipliklerinin boyama işlemi için iplikler önce sülfür boya (Fenazol Eco Black RD-BS, CAS No.1326-82-5) teknesinden (90°C) geçirilmiş, ardından 9 tekne indigo boya (2,4 gr/L, 35°C) ile işlem görmüştür. Boya teknesinde bulunan diğer yardımcı kimyasallar; iyon tutucu, antioksidan, sodyum hidroksit, siyah kükürt boyarmadde, ıslatıcı, dispergatör ve hidrosülfid şeklindedir. Denim kumaşlarda indigo boyama öncesi yapılan kükürt boya ile boyama işlemi; sadece indigo kullanıldığında elde edilen renk tonunu koyulaştırmak, daha ekonomik bir boyama işlemi uygulamak gibi nedenlerle yapılmaktadır [16]. Buna karşılık denim boyamada kükürt boyarmadde ile yapılan ek işlemler, sürtünme haslığını düşürmek gibi bir dezavantaja da neden olabilmektedir. Apre işlemleri için denim

numuneler boyama sonrası 10 gr/L yumuşatıcı ve ardından 2 gr/L ıslatıcı ile işlem görmüştür.

3 farklı atkı sıklığına sahip denim numunelerin CIELAB-renk sistemine göre 3-boyutlu renk koordinatları Çizelge 2’de sunulmuştur. Bu değerlerden yola çıkarak numunelerin atkı sıklığı arttıkça; L* değeri artmış (numunelerin renklerinde koyuluk azalmış), a* değeri düşmüş (renk yeşile yaklaşmış), b* değeri artmış (renk sarıya yaklaşmış), C değeri düşmüş (doyunluk azalmış) ve h değeri (renk tonu maviden uzaklaşmış) azalmıştır [17].

Çizelge 2. Numunelerin CIELAB renk değerleri

	Renk değerleri				
	L*	a*	b*	C	h
D16	20,02	0,9	-7,1	7,16	277,19
D20	22,06	0,55	-6,71	6,74	274,68
D24	24,83	0,17	-6,37	6,38	271,56

2.2. Metod

Farklı atkı sıklığına sahip denim numuneleri aşındırmak için ISO 12947-3 standardı referans alınarak James Heal - Martindale cihazı kullanılmıştır. Numuneler 9 kPa basınç altında 1000, 2500, 5000, 7500 ve 10000 devir boyunca aşındırılmıştır.

Her devir sonunda numunelerin renk ölçümü için Minolta CM 3600 model spektrofotometre cihazı (D65 ışığı altında, 10°’lik gözlemci açısı) kullanılmıştır. Ölçümler yapılırken reflektansa parlaklık bileşeni (Specular component included, SCI) dahil edilmiştir. Bu modda yansıtıcı bileşen yüzeyden yansıyan ışıktır ve yansıma açısı ışığın gelme açısına eşittir [18]. RealColor 1.3® yazılımı kullanılarak numunelerin aşındırma öncesi ve aşındırma devirleri sonundaki renk farklılıkları hesaplanmıştır. Ölçümlerin hassasiyeti açısından renk analizleri, numuneler iki katlı olacak şekilde ve kumaşların atkı yönünden 90° açı yapacak doğrultuda gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda ΔL^* (açık-koyuluk farkı), ΔE^* (toplam renk farkı), ΔC (doyunluk değeri), ΔH^* (renk tonu) değerleri elde edilip karşılaştırılmıştır. Toplam renk farkı değeri aşağıdaki Eşitlik 1 esas alınarak hesaplanmaktadır [17]. Formüllerde belirtilen

‘numune’ aşındırılmış numunelerin; ‘standart’ ise numunelerin aşındırma öncesi renk değerlerini ifade etmektedir.

$$\Delta E^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad (1)$$

Ayrıca numunelerin renk kuvvetini belirleyebilmek için 400 nm – 700 nm görünür spektrum dalga boyları arasında ölçülüp Kubelka-Munk formülü ile hesaplanan K/S değerleri elde edilmiştir (Eşitlik 2). Eşitlikte yer alan R numunelerin reflektans değerini temsil etmektedir. Numunelerin maksimum absorpsiyon dalga boyu olan 630 nm’deki K/S değerleri esas alınmıştır.

$$K/S = (1 - R)^2 / (2R) \quad (2)$$

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

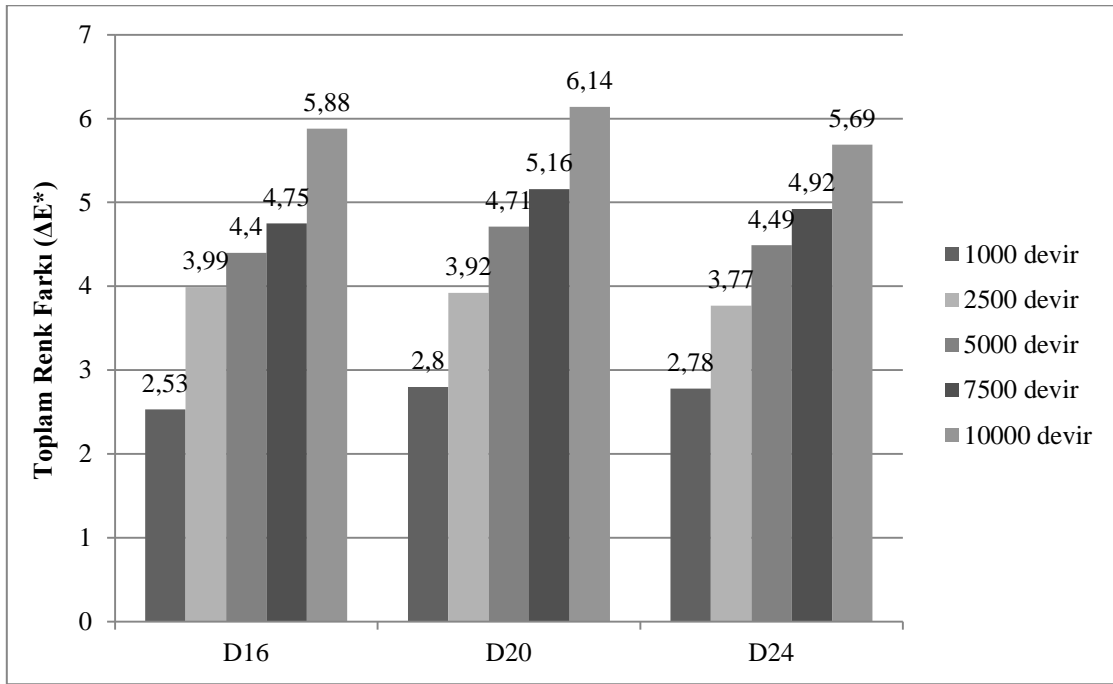
3.1. Denim Numunelerin Aşındırma Sonrası Renk Farklılık Değerleri

Farklı atkı sıklıklarına sahip denim kumaşların aşındırma öncesi ve aşındırma sonrası ölçülen renk değerleri farkı Şekil 1 ve Çizelge 3’de sunulmuştur. Şekil 1’de toplam renk farkı (ΔE^*) değerleri incelendiğinde beklendiği gibi tüm numunelerin ilk renklerine göre renk farklılığı ile aşındırma devir sayıları doğru orantılıdır. Tüm denim numunelerde, ilk renklerine göre oluşan birinci en belirgin artış 1000 ve ardından 2500 devir sonrasında görülmüştür. 2500-7500 devir arasındaki toplam renk farkı değişimleri diğer devirlerdeki değişimlere göre nispeten azdır. Daha önce yapılmış benzer çalışmalarda da kumaşların renginde meydana gelen büyük değişiklikler ilk tur olan 2500 devir sonrasında tespit edilmiş ve bu noktada paralel bir sonuç elde edilmiştir [13,14].

Tüm numunelerde oluşan ikinci belirgin toplam renk farkı değişiminin 10000 devir sonrasında olduğu tespit edilmiştir. Bu farklılık değerinin, diğer numunelere göre D20 numunesinde daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıntılı inceleyebilmek açısından Çizelge 2’deki renk değişim değerleri incelendiğinde D16 numunesinin 10000 devir sonrası açıklık-koyuluk (ΔL^*) değerinin diğer numunelere göre yüksek olduğu,

yani renklerinin aşınma sonucunda daha fazla açıldığı anlaşılmaktadır. Bu sonuç, denim numunelerde boyasız atkı sıklığı azaldıkça yüksek devirdeki aşınma sonucunda oluşan renk açıklığının arttığını ortaya koymaktadır. Çizelge 2'deki diğer renk değişim değerleri incelendiğinde numunelerin her aşındırma devri sonrasında a* ve b* değerlerinin düştüğü yani renklerinin yeşil ve mavi tona kaydığı dikkat çekmektedir. Δb^* değeri tüm aşındırma devirlerinde en fazla düşen yani renk tonu en fazla maviye doğru kayan numune atkı sıklığı en fazla olan D24 numunesidir. 10000 devir sonunda Δa^* değeri en fazla değişen yani renk tonu yeşile doğru kayan numune ise D20

numunesi olmuştur. CIELAB renk sisteminde çok canlı renklerde 'a*' ve 'b*' nin ekstrem değerleri ± 80 civarındadır [17]. Numunelerin aşındıkça renklerinin açılmasına ve canlılığını yitirmesine karşılık yeşil ve mavi tonlara kaymasının, siyah renkteki kükürt boyarmaddenin düşük haslığa sahip olmasından dolayı sürtünme sonucu kumaştan uzaklaşması ve kalan mavi indigo boyanın daha çok ön plana çıkmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca aşınma sonucunda kumaş yüzeyine çıkan liflerin (tüylülüğün), kumaş yüzeyinin ışığı yansıtma derecesini değiştirmesiyle bu optiksel değişime katkısının fazla olduğu bilinmektedir [19].



Şekil 1. Denim numunelerin aşındırma öncesi ile aşındırma sonrası toplam renk farkı değerleri

Numunelerin aşınma öncesi ve sonrası renklerindeki doygunluk değerleri farkı (ΔC) incelendiğinde, aşınma devri arttıkça numunelerin rengindeki doygunluk değerinin arttığı, matlığın azaldığı görülmektedir. Aşınma sonucunda oluşan renkteki doygunluk değerindeki artış atkı sıklığıyla ters orantılıdır. İlk renklerine göre renk açıklığı (ΔL^*) ve toplam renk farkı (ΔE^*) diğer numunelere göre düşük olan 24 atkı/cm sıklığına

sahip denim numunelerin 10000 devir sonrası doygunluk artışı diğer numunelere göre daha fazla çıkmıştır.

Numunelerin renk tonu açısı farklılığı değerleri incelendiğinde (ΔH); artan aşınma devirleri sonucunda bu değerlerin de artmış olduğu görülmektedir. Atkı sıklığı arttıkça aşınma ile numunelerde oluşan renk tonu açısı farklılığı

azalmıştır. 10000 devir sonunda en fazla renk tonu değişimi 16 atkı/cm sıklığına sahip olan denim numunelerinde olduğu tespit edilmiştir.

3.2. Denim Numunelerin Renk Kuvveti Değerleri

Numunelerin renk kuvvetini tespit edebilmek amacıyla Kubelka-Munk teorisine göre hesaplanan K/S değerleri Şekil 2’de sunulmuştur. ‘K’ değeri absorpsiyon katsayısı; ‘S’ değeri ise ışık saçılım katsayısıdır [20]. Aşınma öncesi tüm numunelerin K/S değerleri incelendiğinde; renksiz olan atkı ipliğinin kumaştaki sıklığı arttıkça numunelerin K/S değerlerinin düştüğü görülmektedir. Bu değer, boyarmaddenin konsantrasyonu ve renk koyuluğu ile doğru orantılı şekilde değişmektedir. Atkı

sıklığının azalması; yüzeyde mavi renkte çözgü ipliklerinin daha yoğun görünmesini, böylece denim numunelerin renk kuvvetinin daha fazla olmasını sağlamıştır. Diğer bir deyişle K/S değerleri direkt olarak yansıtma ile ilgili olduğu için beyaz renkte atkı ipliğinin kumaşta daha yoğun görünmesi ışığı daha fazla yansıtmasına böylece K/S değerini de düşürmesine yol açmıştır. Tüm numunelerin aşınma devri arttıkça K/S değerleri de düşmüştür. Sürtünme sonucu kumaştan uzaklaşan boya, renkli iplik yapısından ayrılan lifler numunelerin renk kuvvetinin azalmasına sebep olmuştur. Numunelerin K/S değerindeki en belirgin azalma 10000 aşındırma devri sonunda görülmüştür. Bu düşüş, ilk K/S değerlerine göre azalan sırayla D16, D20, D24 şeklindedir.

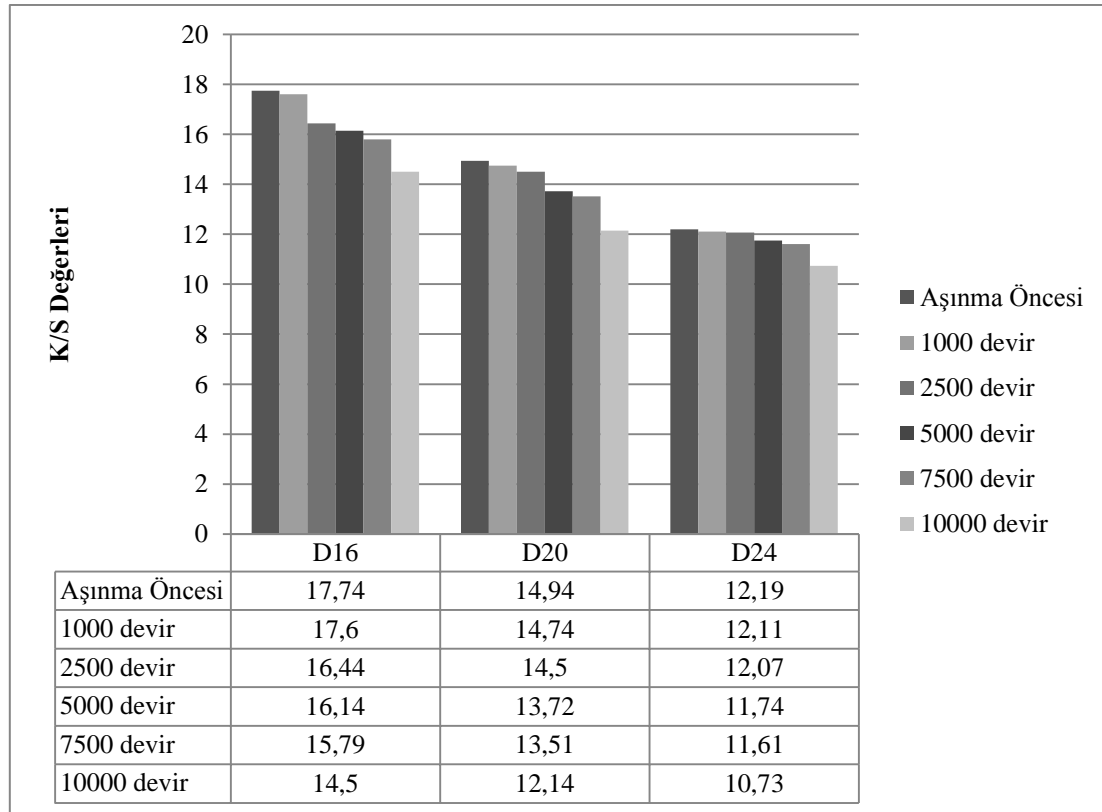
Çizelge 3. Denim numunelerin aşınma öncesi ve sonrası renk farklılık değerleri

Aşındırma devri	Renk farklılığı	D16	D20	D24
1000 devir	ΔL^*	1,171	1,32	1,071
	Δa^*	-0,596	-0,604	-0,488
	Δb^*	-2,165	-2,394	-2,516
	ΔC	2,114	2,372	2,519
	ΔH^*	0,758	0,687	0,472
2500 devir	ΔL^*	2,475	2,281	1,509
	Δa^*	-0,882	-0,863	-0,744
	Δb^*	-3,005	-3,072	-3,373
	ΔC	2,949	3,055	3,387
	ΔH^*	1,055	0,923	0,676
5000 devir	ΔL^*	2,824	2,92	2,149
	Δa^*	-1,058	-1,067	-0,921
	Δb^*	-3,201	-3,532	-3,834
	ΔC	3,146	3,522	3,858
	ΔH^*	1,212	1,098	0,81
7500 devir	ΔL^*	3,167	3,252	2,477
	Δa^*	-1,139	-1,151	-1,006
	Δb^*	-3,353	-3,843	-4,134
	ΔC	3,3	3,837	4,164
	ΔH^*	1,286	1,169	0,871
10000 devir	ΔL^*	4,456	4,27	3,576
	Δa^*	-1,49	-1,584	-1,183
	Δb^*	-3,404	-4,131	-4,265
	ΔC	3,364	4,157	4,311
	ΔH^*	1,577	1,512	1,005

10000 aşındırma devri sonunda K/S değerlerinde; en az düşüşün atkı sıklığı en fazla olan D24 numunelerinde olduğu görülmektedir.

Kumaş yapısında atkı sıklığı azaldıkça, numunenin aşındığı alandaki boyalı bölge de küçülmektedir. Bu doğrultuda, yapıdan uzaklaşan boyalı lifler azalmakta ve renk kuvvetindeki değişim de daha az olmaktadır. Ancak 10000 devir sonunda renk kuvvetinde azalma oranı D16 ve D20 numunelerinde oldukça yakın çıkmıştır.

Özellikle 7500-10000 devir arasındaki aşınma D20 numunelerinin optik özelliklerinin fazla miktarda (Şekil 1) değişmesine yol açmıştır. Dokuma kumaşlarda atkı ve çözgü ipliklerinin kesişim noktaları arttıkça kumaşın ışığı yansıtma miktarı düşer ve parlaklığı azalır [21]. Boyalı atkı iplik sıklığı 20 atkı/cm olan numunelerin (D20) optiksel anlamda bu kesişim noktalarının ve aşınan boyalı alanının diğer numunelere göre daha kritik oranda kaldığı düşünülmektedir.



Şekil 2. Aşındırma öncesi ve sonrası numunelerin K/S değerleri

D20 numunelerin kesişim noktalarının D16 numunelerine göre fazla olması ışığın daha az yansıtılmasına; aşınmaya maruz kalan boyalı alanının D16 numunelerine göre daha az olması ise ışığı daha fazla yansıtmasına yol açmaktadır. Sonuçlara göre bu denge sebebiyle 10000 aşınma devri sonunda D16 ve D20 numunelerinin renk

kuvvetlerinin birbirine yakın seviyelerde azalmasına yol açmıştır.

4. SONUÇLAR

Denim kumaşlar özellikle günlük giysiler için sıklıkla kullanılan, üretim hacmi yüksek ve

kullanım sıklığı fazla olan ürünlerdir. Birçok tekstil ürününde olduğu gibi denim ürünleri de başka yüzey ile sürtünme sonucu bir aşınmaya ve eski görünümüne sahip olmaktadır. Kumaşların aşınma dayanımı, farklı standartlar doğrultusunda kütle kaybı, boncuklanma gibi farklı metodlarla incelenilmektedir. Bu çalışmada da denim kumaşların farklı devirlerde aşındırma işlemi sonucu değişen renk özellikleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. 16, 20 ve 24 atkı/cm şeklinde farklı atkı sıklıklarına sahip, diğer üretim özellikleri aynı olan denim numuneler aşındırılmıştır.

Yüzeyde beyaz renkte atkı ipliği yoğunluğunun aşınma ile değişen optik özelliklerine etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Çözgü ipliği siyah sülfür boya üstüne indigo boyalı; atkı ipliği ise boyasız (beyaz) renkte olan numunelerde beklediği gibi atkı sıklığı arttıkça K/S değerleri (renk kuvvetleri) düşük çıkmıştır. Tüm numunelerde özellikle 2500 devir aşınma sonrası belirgin bir renk değişimi (toplam renk farkı, ΔE^*) görülmüştür. Numuneler aşındıkça renkleri açılmış, renk tonları mavi ve yeşile kaymıştır. En fazla renk değişimi D20 numunelerinde olmuştur. Tüm numunelerin renk kuvvetlerindeki en fazla düşüş ise 10000 devir sonunda görülmüştür. Renk kuvvetinde en az düşüş, renksiz atkı ipliği sıklığı en fazla olan D24 numunelerinde görülmüştür. Aşınan boyalı bölgenin diğerlerine göre daha az olması bu numunenin reflektans değerlerinin fazla değişmemesini sağlamıştır. 16 ve 20 atkı/cm sıklığına sahip numunelerin 10000 aşınma devri sonundaki renk kuvvetlerindeki düşüş ise birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Bunun da, D16 numunelerinin kumaş bağlantı noktalarının D20 numunelerine göre daha düşük olması ancak boyalı bölgenin daha fazla olması nedenleriyle iki numune arasında bir denge durumu oluşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu noktada bu yorumu destekleyebilmek adına farklı atkı sıklıklarında daha çeşitli numuneler ile ileride benzer çalışmaların yapılması öngörülmektedir. Ayrıca sonraki çalışmalarda denim kumaşların konstrüksiyonu değiştirilerek, çözgü ipliğini boyamak için farklı boyarmadde konsantrasyonlarında çalışarak da aşınma ile

değişen renk özellikleri ayrıntılı olarak incelenebilir.

5. TEŞEKKÜR

Çalışmamız için kumaş teminini sağlayan BOSSA Ticaret ve Sanayi İşletmeleri firmasına teşekkür ederiz.

6. KAYNAKLAR

1. Koç, E., Ayyıldız, Ç., 2005. Denim Kumaş Üretim Esasları. Dünya ve Türkiye'deki Ticaret Durumu, *Tekstil ve Mühendis*, 12(59), 35-42.
2. Annapoorani, S. G., 2017. Introduction to Denim: Sustainability in Denim. Duxford, UK: Woodhead Publishing, 765.
3. Paul, R., 2015. Denim and Jeans: An Overview. Denim: Manufacture, Finishing and Applications. Cambridge: Woodhead Publishing, 1-11. DOI:10.1016/C2013-0-16377-5.
4. Jucienė, M., Dobilaitė, V., Kazlauskaitė, G., 2006. Influence of Industrial Washing on Denim Properties. *Materials Science (Medžiagotyra)*, 12(4), 355-359.
5. Güneşoğlu, S., 2015. The Statistical Investigation of the Effect of Hydrophilic Polyurethane Coating on Various Properties of Denim Fabric. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 25(3), 256-262.
6. Sezgin Bozok, S., Ogulata, R.T., 2021. Effect of Silica Based Sols on the Optical Properties and Colour Fastness of Synthetic Indigo Dyed Denim Fabrics. *Coloration Technology*, 137, 209-216. <https://doi.org/10.1111/cote.12521>.
7. Sezgin Bozok, S., Ogulata, R.T., 2021. Asidik/Bazik Ortamlarda ve Farklı Miktarlarda Çapraz Bağlayıcı ile Elde Edilen Silika Kaplamaların Pamuklu Denim Kumaşlara Etkilerinin İncelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 36(1), 273-281.
8. Elmogahzy, Y.E., 2020. Performance Characteristics of Traditional Textiles: Denim and Sportswear Products. *Engineering Textiles, The Textile Institute Book Series*, Woodhead Publishing, 346.

9. The Unfading Denim Industry, 2020, <http://www.wastra.in/the-unfading-denim-industry.php>, Erişim Tarihi:17.02.2022.
10. Can, Y., İnanç, L., 2017. Pamuklu Bezayağı Kumaşlarda Aşınma Etkisi ile Sürtme Haslığı Değişimi. Düzce Üniversitesi, Bilim ve Teknoloji Dergisi, 5, 50-55.
11. Tayyar, A.E., Sarı, F., Yağız, İ., 2011. Gömleklik Kumaşlarda Yapısal Parametrelerin Kumaşın Aşınma Direncine Etkileri. Tekstil ve Mühendis, 18(84), 23-26.
12. Demiroz Gun, A., Tiber, B., 2011. Color, Color Fastness and Abrasion Properties of 50/50 Bamboo/cotton Blended Plain Knitted Fabrics in Three Different Stitch Lengths. Textile Research Journal, 81(18), 1903-1915.
13. Alpay, H.R., Becerir, B., Akgün, M., 2005. Assessing Reflectance and Color Differences of Cotton Fabrics After Abrasion. Textile Research Journal, 75(4), 357-361. DOI:10.1177/0040517505053807.
14. Alpay, H.R., Becerir, B., Akgün, M., 2005. Assessment of Reflectance and Color Differences of Wool Fabrics After Abrasion. Textile Research Journal, 75(8), 607-615. DOI: 10.1177/0040517505057423.
15. Cimilli Duru, S., Açıkgöz Tufan, H., Şahin, U. K., 2020. Assessing Color Differences of Cotton Fabrics Made from Different Yarns After Abrasion. Tekstil ve Konfeksiyon, 30(2), 108-116.
16. Tölek, Ş., Doba Kadem, F., 2016. An Investigation on Colour Analysis and Fastness Properties of the Denim Fabric Dyed with a Different Method. Tekstil ve Konfeksiyon, 26(2), 198-204.
17. Duran, K., 2001. Tekstilde Renk Ölçümü ve Reçete Çıkarma. Ege Üniversitesi Tekstil ve Konfeksiyon Araştırma-Uygulama Merkezi Yayını, Bornova, İzmir, 308.
18. Hosoya, Y., Shiraishi, T., Odatsu, T., Ogata, T., Miyazaki, M., Powers, J.M., 2010. Effect of Specular Component and Polishing on Color of Resin Composites. Journal of Oral Science, 52(4), 599-607.
19. Esfandiari, A., Firouzi-Pouyaei, E., Aghaei-Meibodi, P., 2014. Effect of Enzymatic and Mechanical Treatment on Combined Desizing and Bio-polishing of Cotton Fabrics. The Journal of The Textile Institute, 105(11), 1193-1202.
20. Nobbs, J.H., 1985. Kubelka-munk Theory and the Prediction of Reflectance. Review of Progress in Coloration and Related Topics (Color Technol.), 15, 66-75.
21. Akgün, M., Alpay, H. R., Becerir, B., 2012. Kumaş Yapısal Parametreleri ile Reflektans Değerleri Arasındaki İlişkilerin Değerlendirilmesi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 17(1), 93-106.

Piezoelektrik Levha Viskoz Akışkan ve Rijit Duvardan Oluşan Sistemin Zorlanmış Titreşimine Akışkan Özelliklerinin Etkisi

Zeynep EKİCİOĞLU KÜZECİ*¹ ORCID 0000-0003-1487-6321

¹Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği
Bölümü, Kırşehir

Geliş tarihi: 03.02.2022

Kabul tarihi: 21.03.2022

Atıf şekli/ How to cite: EKİCİOĞLU KÜZECİ, Z., (2022). Piezoelektrik Levha Viskoz Akışkan ve Rijit Duvardan Oluşan Sistemin Zorlanmış Titreşimine Akışkan Özelliklerinin Etkisi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37(1), 197-208.

Öz

Bu çalışmada piezoelektrik plak, viskoz akışkan ve rijit duvardan oluşan bir sisteme, harmonik bir mekanik kuvvet uygulandığında ortaya çıkan titreşime viskoz akışkan özelliklerinin etkisi incelenmiştir. Plaçın hareketi, doğrusallaştırılmış elektro-elastisite teorisinin kesin denklemleri ile ifade edilmiştir. Akışkan akımı ise doğrusallaştırılmış Navier-Stokes denklemleri ile yazılmıştır. Plakta düzlem şekil değiştirme durumunun olduğu, akışkanın ise düzlemsel akış yaptığı varsayılmıştır. Problemin matematiksel formülasyonunu ifade eden denklemlere, sınır ve uygunluk koşullarına, plaçın uzunluğu yönündeki koordinata göre Fourier dönüşümü uygulanmıştır. Ters Fourier dönüşümü ise sayısal olarak hesaplanmıştır. İncelenen hidro-piezoelektrik sistem farklı akışkanlar için ele alınmış ve akışkanın özelliklerinin, plak ve akışkan ara yüzeyindeki basınç değeri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar tartışılmış ve akışkanın viskozitesinin artmasının, ara yüzeydeki basıncı mutlak değerce arttırdığı gözlemlenmiştir. Bu araştırmanın, özellikle farklı mühendislik alanlarında yapılan enerji hasadı çalışmalarına katkıda bulunması amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Piezoelektrik plak, Viskoz akışkan, Zorlanmış titreşim, Rijit duvar, Ara yüzey basıncı

Effect of Fluid Properties on Forced Vibration of the System Consisting of Piezoelectric Plate, Viscous Fluid and Rigid Wall

Abstract

This study investigates the mechanical forced vibration of the system which consists the piezoelectric plate, viscous fluid and rigid wall. The exact equations of motion of the linear electro-elasticity theory for piezoelectric materials are used to describe the plate motion, however, the fluid flow is described by using the linearized Navier-Stokes equations for a compressible (barotropic) viscous fluid. The plane-strain state in the plate and the plane flow of the fluid are considered in this study and the corresponding

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Zeynep EKİCİOĞLU KÜZECİ, zeynep.kuzeci@ahievran.edu.tr

mathematical problems are solved by applying the Fourier transform with respect to the space coordinate which is on the coordinate axis directed along the plate-lying direction. The inverse Fourier transforms are determined numerically. The vibration of the examined hydro-piezoelectric system is analyzed with different fluids and the influence of fluid properties on pressure value at the plate and fluid interface is investigated. Numerical results are presented and discussed. In particular, it is established that an increase in the fluid viscosity causes to increase the amplitude of the interface normal stress. This investigation aims to contribute energy harvesting studies especially in different engineering areas.

Keywords: Piezoelectric plate, Compressible viscous fluid, Forced vibration, Rigid wall, Interface pressure

1. GİRİŞ

Rijit veya esnek cisimlerin akışkan ile etkileşimi, geçmişten günümüze gelen ve çalışmaların devam ettiği bir konudur. Özellikle mekanik, fizik ve uygulamalı matematik alanlarının temel problemlerinden bir tanesiyken; mühendislik alanındaki gelişmeler ile birlikte denizcilik, havacılık, uzay ve robotik gibi sektörlerin de üzerine çalışmaya başladıkları önemli bir alan haline gelmiştir. Araştırmalarda cisimlerin matematiksel modelleri, dinamiği ve titreşimi üzerinde durulduğu görülmüştür.

Levha ile akışkan etkileşimlerinin dinamik açıdan incelenmesi ilk olarak, 1921 yılında Lamb'ın [1] çalışmasıyla başlamıştır. Daha sonraları başka yayınlarda Lamb'ın bu araştırması geliştirilmiş ve farklı yöntemler denenmiştir [2-5]. Bu konudaki araştırmalar viskoz/viskoz olmayan akışkan ve farklı plak yapılarının incelenmesi ile genişletilmiştir.

Piezoelektrik özelliği olan bir plak ve akışkandan oluşan hidro-piezoelektrik sistemin etkileşim problemi ise özellikle enerji hasadı yapılan araştırmalarda önemlidir [6-9]. Ayrıca hidro-piezoelektrik sistemler, akustik dalgaları alan (veya üreten) hidro-akustik dönüştürücü çalışmalarında da kullanılmaktadırlar [10-12]. Piezoelektrik plak ve akışkan etkileşiminden enerji hasadı yapan sistemler havacılık alanında da çalışılmaktadır. Bu alanda özellikle otonom sensör teknolojilerinin geliştirilmesinde araştırılmaktadır [13]. Literatüre bakıldığında hidro-piezoelektrik

sistemlerin dinamiği üzerine yapılan teorik çalışmaların henüz yeterli olmadığı görülmüştür.

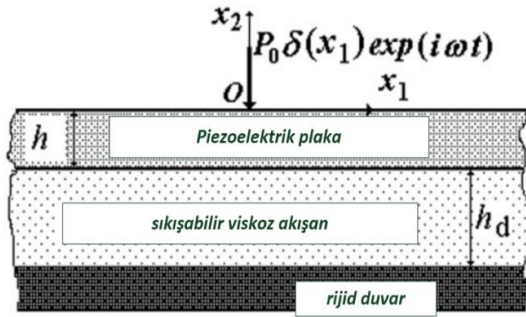
Bu çalışmanın temelini oluşturan, akışkan ile elastik/visko-elastik malzemeden oluşan plağın etkileşimini inceleyen yayınlar ve ayrıntıları Akbarov'un [14] derleme makalesinde verilmiştir. Piezoelektrik plak, viskoz akışkan ve rijit duvardan oluşan sistemin zorlanmış titreşiminin çalışıldığı yazara ait doktora tezinde ise farklı piezoelektrik malzemeler ile gliserinin etkileşimi incelenmiş ve farklı PZT malzemelerinin piezoelektriklik özelliğinin, incelenen parametrelere etkisi analiz edilmiştir [15].

Bu araştırmada ise, piezoelektrik plak viskoz akışkan ve rijit duvardan oluşan sistemin zorlanmış titreşimine akışkan özelliklerinin etkisi öğrenilmek istenmiştir. Bu kapsamda dört farklı akışkan incelenmiş ve akışkan viskozitelerinin, ara yüz düzlemi gerilmesi üzerindeki etkileri sorgulanmıştır. Özellikle enerji hasadı yapan sistemlerde enerji eldesinin hesabı için gerilme bilgisi önem arz etmektedir. Ayrıca farklı alanlarda hidro-piezoelektrik sistemlerin kullanıldığı düşünülmüş ve farklı akışkanlar seçilerek araştırma genişletilmiştir.

2. ALAN DENKLEMLERİ VE FORMÜLASYON

Bu çalışmada piezoelektrik plak, sıkıştırılabilir (barotropik) viskoz akışkan ve rijit duvardan oluşan hidro-piezoelektrik sistem incelenmiştir. Sistemin şeması Şekil 1'de verilmiştir. Plağın üst yüzeyinde $Ox_1x_2x_3$ kartezyen koordinat sistemi

tanımlanmıştır. Piezoelektrik plak, $\{-\infty < x_1 < +\infty; -h < x_2 < 0; -\infty < x_3 < +\infty\}$ bölgesini, akışkan ise, $\{-\infty < x_1 < +\infty; -h-h_d < x_2 < -h; -\infty < x_3 < +\infty\}$ bölgesini kapsamaktadır. Ayrıca h plak kalınlığını, h_d ise akışkanın derinliğini, yani plağın alt yüzeyinin rijit duvara olan uzaklığını göstermektedir. Koordinat sistemine göre Ox_3 yönü, şekil düzlemine diktir ve plaktaki düzlem şekil değiştirme durumu iki boyutlu Ox_1x_2 yönlerinde ele alınacağı için, Ox_3 yönü Şekil 1'de gösterilmemiştir.



Şekil 1. Araştırılan hidro-piezoelektrik sistemin çizimi

Bununla birlikte, $(-\infty < x_3 < +\infty, x_1 = 0)$ koordinatında, şiddeti P_0 olan zamana göre harmonik kuvvetin plağın üst yüzeyine uygulandığı kabul edilmiştir.

Bu çerçevede, söz konusu hidro-piezoelektrik sistemi oluşturan mekanik ve elektriksel alanların matematiksel ifadelerinin, bunlara karşılık gelen kesin alan denklemleri ve ilişkileri ile belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla her bir sistem bileşeni için alan ve bünye denklemleri yazılmıştır. İlk olarak plağın hareket denklemleri Eşitlik 1-3'te verilmiştir.

$$\frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial x_2} = \rho \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \sigma_{12}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{22}}{\partial x_2} = \rho \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} \quad (2)$$

$$\frac{\partial D_1}{\partial x_1} + \frac{\partial D_2}{\partial x_2} = 0 \quad (3)$$

Piezoelektrik levhaya ait, elektro-mekanik ilişkileri ifade eden bünye denklemleri ise (4)-(8) denklemleri ile verilmiştir. Bu denklemler, plağın kalınlık doğrultusunda polarizasyona sahip olduğu durum için geçerlidir.

$$\sigma_{11} = c_{11} \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + c_{13} \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + e_{31} \frac{\partial \varphi}{\partial x_2} \quad (4)$$

$$\sigma_{22} = c_{13} \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + c_{33} \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + e_{33} \frac{\partial \varphi}{\partial x_2} \quad (5)$$

$$\sigma_{12} = c_{44} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right) + e_{15} \frac{\partial \varphi}{\partial x_1} \quad (6)$$

$$D_1 = e_{15} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right) - \epsilon_{11} \frac{\partial \varphi}{\partial x_1} \quad (7)$$

$$D_2 = e_{31} \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + e_{33} \frac{\partial u_2}{\partial x_2} - \epsilon_{33} \frac{\partial \varphi}{\partial x_2} \quad (8)$$

Bu eşitliklerde; $\sigma_{11}, \sigma_{12}, \sigma_{22}$ mekanik gerilme tensörünün bileşenlerini, u_1, u_2 mekanik yer değiştirme vektörünün bileşenlerini, D_1 ve D_2 elektriksel yer değiştirme vektörünün bileşenlerini, φ elektriksel potansiyeli, c_{11}, c_{33}, c_{13} ve c_{44} elastik sabitleri, e_{31}, e_{33} ve e_{15} piezoelektrik sabitleri, ϵ_{11} ve ϵ_{33} dielektrik sabitleri göstermektedir. Sistemdeki sıkıştırılabilir viskoz akışkan akımına ait doğrusallaştırılmış Navier-Stokes (9) ve (10) ile süreklilik (11) eşitlikleri ise aşağıdaki gibi yazılmıştır;

$$\rho_0^{(i)} \frac{\partial V_1}{\partial t} - \mu^{(i)} \left(\frac{\partial^2 V_1}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 V_1}{\partial x_2^2} \right) + \frac{\partial p^{(i)}}{\partial x_1} - (\mu^{(i)} + \lambda^{(i)}) \frac{\partial \theta}{\partial x_1} = 0 \quad (9)$$

$$\rho_0^{(i)} \frac{\partial V_2}{\partial t} - \mu^{(i)} \left(\frac{\partial^2 V_2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 V_2}{\partial x_2^2} \right) + \frac{\partial p^{(i)}}{\partial x_2} - (\mu^{(i)} + \lambda^{(i)}) \frac{\partial \theta}{\partial x_2} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial p^{(i)}}{\partial t} + \rho_0^{(i)} \left(\frac{\partial V_1}{\partial x_1} + \frac{\partial V_2}{\partial x_2} \right) = 0 \quad (11)$$

Akışkana ait verilen bu denklemlerin, aşağıdaki akışkana ait bünye eşitliklerini 12-15 ve durum denklemini Eşitlik 16'nın sağlanması gerekmektedir.

$$T_{11} = -p^{(1)} + \lambda^{(1)}\theta + 2\mu^{(1)}e_{11} \quad (12)$$

$$T_{22} = -p^{(1)} + \lambda^{(1)}\theta + 2\mu^{(1)}e_{22} \quad (13)$$

$$T_{33} = -p^{(1)} + \lambda^{(1)}\theta \quad (14)$$

$$T_{12} = 2\mu^{(1)}e_{12} \quad (15)$$

$$p^{(1)} = a_0^2 \rho^{(1)}, \quad a_0^2 = \frac{\partial p_0^{(1)}}{\partial \rho_0^{(1)}} \quad (16)$$

burada, $e_{11} = \frac{\partial V_1}{\partial x_1}$, $e_{22} = \frac{\partial V_2}{\partial x_2}$, $e_{12} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_1}{\partial x_2} + \frac{\partial V_2}{\partial x_1} \right)$,
 $\theta = \frac{\partial V_1}{\partial x_1} + \frac{\partial V_2}{\partial x_2}$ olarak alınır.

Yukarıda verilen ifadelerde; $\rho_0^{(1)}$ pertürbasyondan önceki akışkan yoğunluğunu, $p_0^{(1)}$ pertürbasyondan önceki hidrostatik basıncı, $\rho^{(1)}$ akışkan yoğunluğunun pertürbasyonunu, $p^{(1)}$ hidrostatik basıncın pertürbasyonunu, V_1 ve V_2 sırasıyla Ox_1 ve Ox_2 eksenleri yönündeki akış hızı vektörünün bileşenlerini, T_{ij} ve e_{ij} ($ij=11;22;12$) akışkanın gerilme ve şekil değiştirme hızı tensörü bileşenlerini, a_0 akışkandaki ses hızını, $\lambda^{(1)}$ ikinci viskozite sabitini ve $\mu^{(1)}$ dinamik viskoziteyi temsil etmektedir. V_1, V_2 hızlarının ve $p^{(1)}$ basıncının potansiyeller cinsinden ifadeleri aşağıdaki (17)-(19) eşitlikleri ile akışkan alan denklemlerine eklenir [15].

$$V_1 = \frac{\partial \varphi^{(1)}}{\partial x_1} + \frac{\partial \psi^{(1)}}{\partial x_2} \quad (17)$$

$$V_2 = \frac{\partial \varphi^{(1)}}{\partial x_2} - \frac{\partial \psi^{(1)}}{\partial x_1} \quad (18)$$

$$p^{(1)} = \rho_0^{(1)} \left(\frac{\lambda^{(1)} + 2\mu^{(1)}}{\rho_0^{(1)}} \Delta - \frac{\partial}{\partial t} \right) \varphi^{(1)} \quad (19)$$

Ayrıca potansiyeller aşağıda verilen eşitlikleri sağlamaktadır.

$$\left[\left(1 + \frac{\lambda^{(1)} + 2\mu^{(1)}}{a_0^2 \rho_0^{(1)}} \frac{\partial}{\partial t} \right) \Delta - \frac{1}{a_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right] \varphi^{(1)} = 0 \quad (20)$$

$$\left(v^{(1)} \Delta - \frac{\partial}{\partial t} \right) \psi^{(1)} = 0 \quad (21)$$

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} \quad (22)$$

Burada $v^{(1)}$ kinematik viskozitedir ve $v^{(1)} = \mu^{(1)} / \rho_0^{(1)}$ ile hesaplanmaktadır. Eğer $p^{(1)} = -(T_{11} + T_{22} + T_{33})/3$ olarak kabul edilirse, $\lambda^{(1)} = -2\mu^{(1)}/3$ olarak bulunur.

Plâğın üst yüzüne ait sınır koşulları, plâğın alt yüzünde (plak ve akışkan ara düzleminde) sağlanan temas koşulları ve rijit duvar üzerindeki sızdırmazlık koşulları sırasıyla Eşitlik 23-25 ile ifade edilmiştir.

$$\sigma_{21}|_{x_2=0} = 0, \quad \sigma_{22}|_{x_2=0} = -P_0 \delta(x_1) e^{i\omega t} \quad (23)$$

$$\left. \frac{\partial u_1}{\partial t} \right|_{x_2=h} = V_1|_{x_2=h}, \quad \left. \frac{\partial u_2}{\partial t} \right|_{x_2=h} = V_2|_{x_2=h},$$

$$\sigma_{21}|_{x_2=h} = T_{21}|_{x_2=h}, \quad \sigma_{22}|_{x_2=h} = T_{22}|_{x_2=h} \quad (24)$$

$$V_1|_{x_2=h-h_d} = 0, \quad V_2|_{x_2=h-h_d} = 0 \quad (25)$$

burada $\delta(x_1)$, Dirac delta fonksiyonudur.

Bu çalışmada sistemin elektriksel alanı için kabul edilen iki sınır koşulu, Eşitlik 26'da ifade edilmiştir. Bu sınır koşulu ile plâğın elektriksel açık devre olduğu kabul edilmiştir.

$$D_2|_{x_2=0} = 0, \quad D_2|_{x_2=h} = 0 \quad (26)$$

3. ÇÖZÜM YÖNTEMİ

Zamana bağlı harmonik titreşimin özelliği göz önüne alınarak, problemin tüm aranan ifadeleri, $g(x_1, x_2, t) = \bar{g}(x_1, x_2) e^{i\omega t}$ biçiminde gösterilmiştir. Böylece; $\partial(\cdot)/\partial t$ ve $\partial^2(\cdot)/\partial t^2$ türevleri yerine, sırasıyla $i\omega(\bar{\cdot})$ ve $-\omega^2(\bar{\cdot})$ yazılmıştır. Aranan ifadelerin genlikleri, sınır, temas ve sızdırmazlık

koşullarında uygun yerlere yazılmıştır. Elde edilen bu sınır değer problemlerinin çözümü için, Eşitlik 27'deki Fourier dönüşümü uygulanmıştır.

$$f_F(s, x_2) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x_1, x_2) e^{-isx_1} dx_1 \quad (27)$$

Plağa ait bünye denklemleri, plağın hareket denklemlerinde yerine yazılarak piezoelektrik malzeme polarizasyon doğrultusunun Ox_2 eksenine ile çakıştığı durum için plağın elektromekanik hareket denklemleri, mekanik yer değiştirmeler ve elektrik potansiyeli cinsinden aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$\left(\frac{c^2}{s^2} - \tilde{c}_{11} \right) u_{1F} + \frac{d^2 u_{1F}}{d(sx_2)^2} - i(1 + \tilde{c}_{13}) \frac{du_{2F}}{d(sx_2)} - i(1 + \tilde{e}_{31}) \frac{d\tilde{\varphi}_F}{d(sx_2)} = 0 \quad (28)$$

$$-i(1 + \tilde{c}_{13}) \frac{du_{1F}}{d(sx_2)} + \left(\frac{c^2}{s^2} - 1 \right) u_{2F} + \tilde{c}_{33} \frac{d^2 u_{2F}}{d(sx_2)^2} - \tilde{\varphi}_F + \tilde{e}_{33} \frac{d^2 \tilde{\varphi}_F}{d(sx_2)^2} = 0 \quad (29)$$

$$-i(1 + \tilde{e}_{31}) \frac{du_{1F}}{d(sx_2)} + \tilde{e}_{33} \frac{d^2 u_{2F}}{d(sx_2)^2} - u_{2F} + \tilde{e}_{11} \tilde{\varphi}_F - \tilde{e}_{33} \frac{d\tilde{\varphi}_F}{d(sx_2)} = 0 \quad (30)$$

burada $c^2 = \omega^2 h^2 / c_{44} / \rho$, $\tilde{c}_{11} = c_{11} / c_{44}$, $\tilde{c}_{13} = c_{13} / c_{44}$, $\tilde{e}_{31} = e_{31} / e_{15}$, $\tilde{c}_{33} = c_{33} / c_{44}$, $\tilde{e}_{33} = e_{33} / e_{15}$, $\tilde{\varphi}_F = e_{15} / c_{44} \varphi_F$, $\tilde{e}_{11} = \varepsilon_{11} c_{44} / e_{15}^2$, $\tilde{e}_{33} = \varepsilon_{33} c_{44} / e_{15}^2$ olarak kabul edilmiştir.

Eşitlik 28-30'da verilen diferansiyel denklemlerin çözümü için, Euler metoduna göre sistemin özel çözümleri Eşitlik 31'de ki gibi ifade edilmiştir. Buradaki A, B, C sabitleri uygulanan çözüm yöntemi ile bulunacak olan bilinmeyen sabitlerdir.

$$u_{1F} = iAe^{bsx_2}, u_{2F} = Be^{bsx_2}, \tilde{\varphi}_F = Ce^{bsx_2} \quad (31)$$

Eşitlik 31'de verilen özel çözüm ifadeleri (28-30) nolu diferansiyel denklemlerinde yerine yazılır ve bazı matematiksel işlemler neticesinde homojen denklem takımı elde edilir. Bu denklem takımının katsayılar matrisinin determinanı sıfıra eşitlenerek, sıfırdan farklı 6 tane kök bulunmuştur (Matematiksel işlemlerin ayrıntıları için [15]'e bakılabilir.). Kullanılan çözüm yöntemine göre ve Eşitlik 31'de verilen özel çözüm ifadeleri göz

önüne alınarak, diferansiyel denklem takımının çözümü Eşitlik 32'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} u_{1F} &= iA_1 e^{b_1 sx_2} + \dots + iA_6 e^{b_6 sx_2} \\ u_{2F} &= A_1 Y_1 e^{b_1 sx_2} + \dots + A_6 Y_6 e^{b_6 sx_2} \end{aligned} \quad (32)$$

$$\varphi_F = A_1 Z_1 e^{b_1 sx_2} + \dots + A_6 Z_6 e^{b_6 sx_2}$$

burada,

$$Y_k = \frac{-(b_k + \alpha_{11})(\tilde{\varepsilon}_{11} - \tilde{\varepsilon}_{33} b_k^2) - \alpha_{31} \alpha_{13} b_k^2}{\tilde{e}_{13} b_k (\tilde{e}_{13} b_k^2 - 1) - \alpha_{12} b_k (\tilde{\varepsilon}_{11} - \tilde{\varepsilon}_{13} b_k^2)} \quad (33)$$

$$Z_k = \frac{(b_k^2 + \alpha_{11})(\tilde{e}_{13} b_k^2 - 1) + \alpha_{31} \alpha_{12} b_k^2}{\tilde{e}_{13} b_k (\tilde{e}_{13} b_k^2 - 1) - \alpha_{12} b_k (\tilde{\varepsilon}_{11} - \tilde{\varepsilon}_{13} b_k^2)}$$

Eşitlik 32'de verilen ifadeler, plağa ait elektromekanik bünye Eşitlik 4-8'de Fourier dönüşümü uygulanmış ifadelerinde yerine yazılır. Böylece gerilme ve elektrik potansiyel ifadeleri elde edilir.

Akışkana ait ifadelerin Fourier dönüşümünün bulunması ise, akışkana ait hızların ve basıncın Fourier dönüşümünün bulunması için, $\varphi_F^{(1)}$ ve $\psi_F^{(1)}$ ifadeleri aşağıdaki gibi alınır.

$$\varphi_F^{(1)} = \omega h^2 \tilde{\varphi}_F^{(1)}, \quad \psi_F^{(1)} = \omega h^2 \tilde{\psi}_F^{(1)} \quad (34)$$

Eşitlik 20-22 ve 34 kullanılarak ve bazı matematiksel işlemlerden sonra, Eşitlik 35 elde edilmiştir.

$$\frac{d^2 \tilde{\varphi}_F^{(1)}}{dx_2^2} + \left(\frac{\Omega_1^2}{1 + i4\Omega_1^2 / (3N_w^2)} - s^2 \right) \tilde{\varphi}_F^{(1)} = 0, \quad (35)$$

$$\frac{d^2 \tilde{\psi}_F^{(1)}}{dx_2^2} - (s^2 + iN_w^2) \tilde{\psi}_F^{(1)} = 0$$

Eşitlik 35'de yer alan, sırasıyla akışkan viskozitesinin ve akışkan sıkıştırılabilirliğinin etkisini karakterize eden boyutsuz sayıların ifadesi ise $\Omega_1 = \frac{\omega h}{a_0}$, $N_w^2 = \frac{\omega h^2}{v^{(1)}}$ olarak verilmiştir.

Eşitlik 35’de verilen diferansiyel denklemin çözümü, aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$\tilde{\Phi}_F^{(1)} = A_7 e^{\delta_1 x_2} + A_8 e^{-\delta_1 x_2}, \quad (36)$$

$$\tilde{\Psi}_F^{(1)} = A_9 e^{\gamma_1 x_2} + A_{10} e^{-\gamma_1 x_2}$$

burada, A_7, A_8, A_9, A_{10} bilinmeyen sabitlerdir ve $\delta_1 = \sqrt{s^2 - \frac{\Omega_1^2}{1 + i4\Omega_1^2/(3N_w^2)}}$, $\gamma_1 = \sqrt{s^2 + iN_w^2}$ olarak verilir. Eşitlik 34 ve 36’da verilen ifadeler ile akışkana ait ilişkileri veren denklemlerde yerine yazılmıştır. Böyle akışkan akımıyla ilgili büyüklüklerin Fourier dönüşümü ifadeleri sınır koşullarında kullanılmak üzere elde edilmiş olur.

Plak hareketine ve akışkan akımına ait büyüklerin Fourier dönüşümü ifadeleri; sınır, temas ve sızdırmazlık koşullarında Eşitlik 23-25 yerine yazılarak, sisteme ait on tane denklem elde edilir (Denklemlerin ayrıntıları [15]’de verilmiştir). Çözüm yönteminde son aşama, ters Fourier dönüşümlerinin sayısal hesaplamalarının yapılmasıdır. Geliştirilen algoritmada; ters Fourier dönüşümleri Gauss integrasyon algoritması ile hesaplanmıştır. Bu yöntemde $g(x_1, x_2, t) = \tilde{g}(x_1, x_2) e^{i\omega t}$ ilişkisi kullanılmış ve aranan değerler Eşitlik 37’de verilen ifade ile bulunmuştur.

$$\left\{ \sigma_{22}, \sigma_{12}, \sigma_{11}, D_1, D_2, \phi, u_1, u_2, T_{22}, T_{12}, T_{11}, \right. \\ \left. V_1, V_2 \right\} = \frac{1}{2\pi} \operatorname{Re} \left\{ e^{i\omega t} \int_{-\infty}^{\infty} \begin{bmatrix} \sigma_{22F}, \sigma_{12F}, \sigma_{11F}, D_{1F}, \\ D_{2F}, \phi_F, u_{1F}, u_{2F}, T_{22F}, \\ T_{12F}, T_{11F}, V_{1F}, V_{2F} \end{bmatrix} e^{isx_1} ds \right\} \quad (37)$$

Ayrıca yazılan algoritma gereğince; $\int_{-\infty}^{\infty} (\cdot) ds$ integralinin yerini, $\int_{-S_1^*}^{S_1^*} (\cdot) ds$ belirli integrali almıştır. S_1^* değeri, sayısal sonuçların yakınsama gereksimine göre belirlenmiştir. Bu integrasyon aralığı, Gauss integrasyon metodunda kullanılan N sayıda küçük aralığa bölünmüştür. S_1^* ve N değerleri, oluşturulan MATLAB algoritması ile

sayısal sonuçların yakınsama gereksimine göre belirlenmiştir.

4. SAYISAL SONUÇLAR

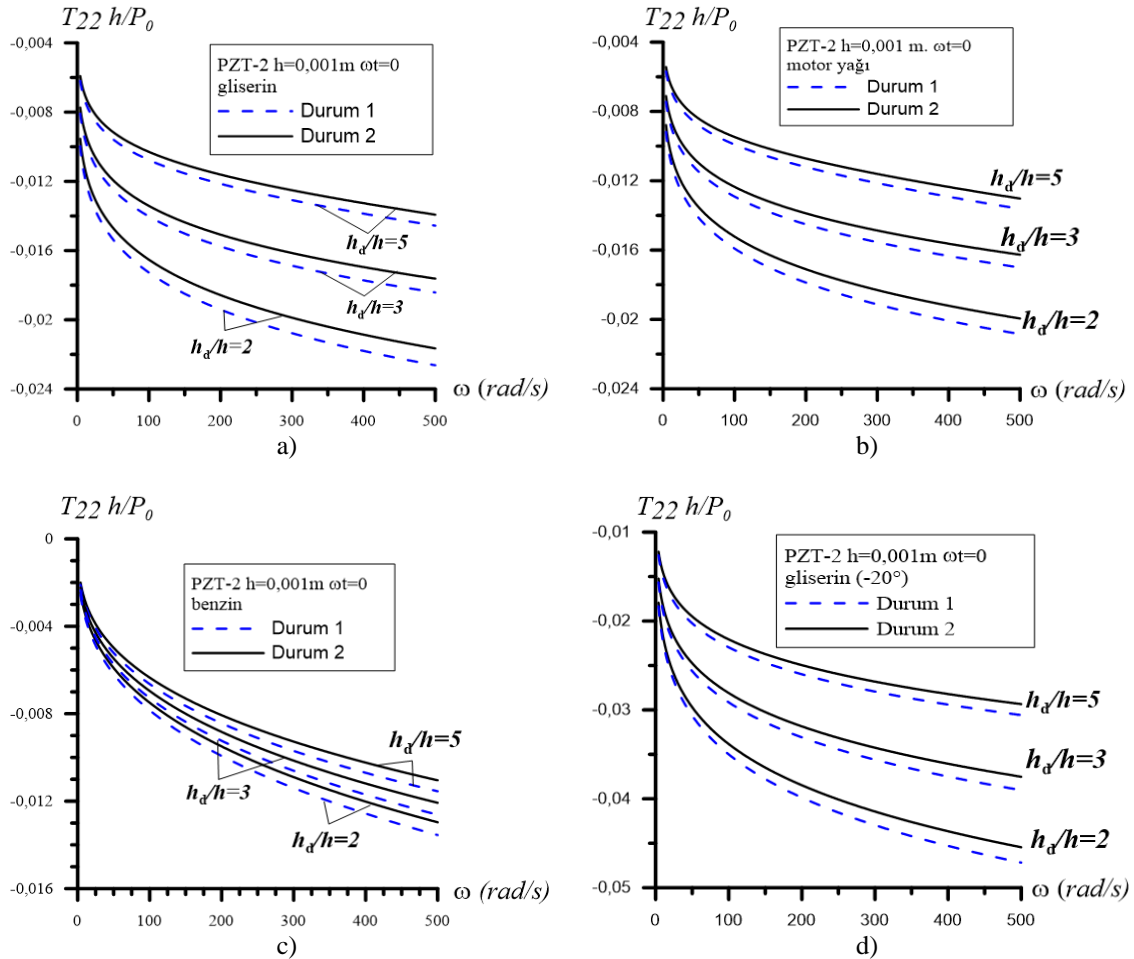
Bu çalışmada verilen tüm sayısal sonuçlar, plak-akışkan ara yüzündeki gerilme parametresi için elde edilmiştir. Sayısal sonuçların analizinde asıl dikkat edilmesi gereken nokta; akışkan özelliklerinin incelenen büyüklüğün frekans cevaplarına etkisi olmuştur. Aynı zamanda, piezoelektriklik özelliğın, plak kalınlığının (h), ve plak kalınlık/akışkan derinliği oranının (h_d/h) frekans cevaplarına etkisine bakılmıştır. Sayısal sonuçlar Çizelge 1’de verilen plak malzemesi ve akışkanlara ait özellikler kullanılarak hesaplanmıştır.

4.1. Ara yüz Gerilmesi Frekans Cevapları

Bu bölümde $x_1/h=0$ noktasında hesaplanan, plak ve akışkan ara yüz düzlemindeki boyutsuz $T_{22}h/P_0$ normal gerilmesinin frekans cevabı grafikleri verilmiştir. Bu grafiklerde akışkanın özelliklerinin gerilme değeri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Frekans cevabı önemli ölçüde titreşim fazına bağlı olduğundan, fazın $\omega t = 0$ ve $\omega t = \pi/2$ olduğu durumlar dikkate alınmıştır. Faz seçiminin ayrıntıları için [16] çalışmasına bakılabilir. Boyutsuz $T_{22}h/P_0$ gerilmesinin, $h=0.001$ m olduğu ve sırasıyla $h_d/h=2,3,5$ kabul edildiği durum için frekans cevabı grafikleri Şekil 2’de gösterilmiştir. Şekilde plak malzemesi olarak PZT-2 kullanılmıştır ve a,b,c,d grafiklerinde akışkan olarak sırasıyla; gliserin, motor yağı, benzin ve düşük sıcaklıkta gliserin alınmıştır. Ayrıca grafiklerdeki kesikli çizgiler, plak malzemesinin elektromekanik etkisinin göz önüne alınmadığı (Durum 1 yani, $e_{31}=e_{33}=e_{15}=0$ ve $\epsilon_{11}=\epsilon_{33}=0$) durumu göstermektedir. Sürekli çizgiler ise, plak malzemesinin elektromekanik etkisinin göz önüne alındığı (durum 2 yani, $e_{31} \neq e_{33} \neq e_{15} \neq 0$ ve $\epsilon_{11} \neq \epsilon_{33} \neq 0$) durumu ifade etmektedir.

Çizelge 1. Seçilen akışkanlara ve piezoelektrik malzemeye ait özellikler

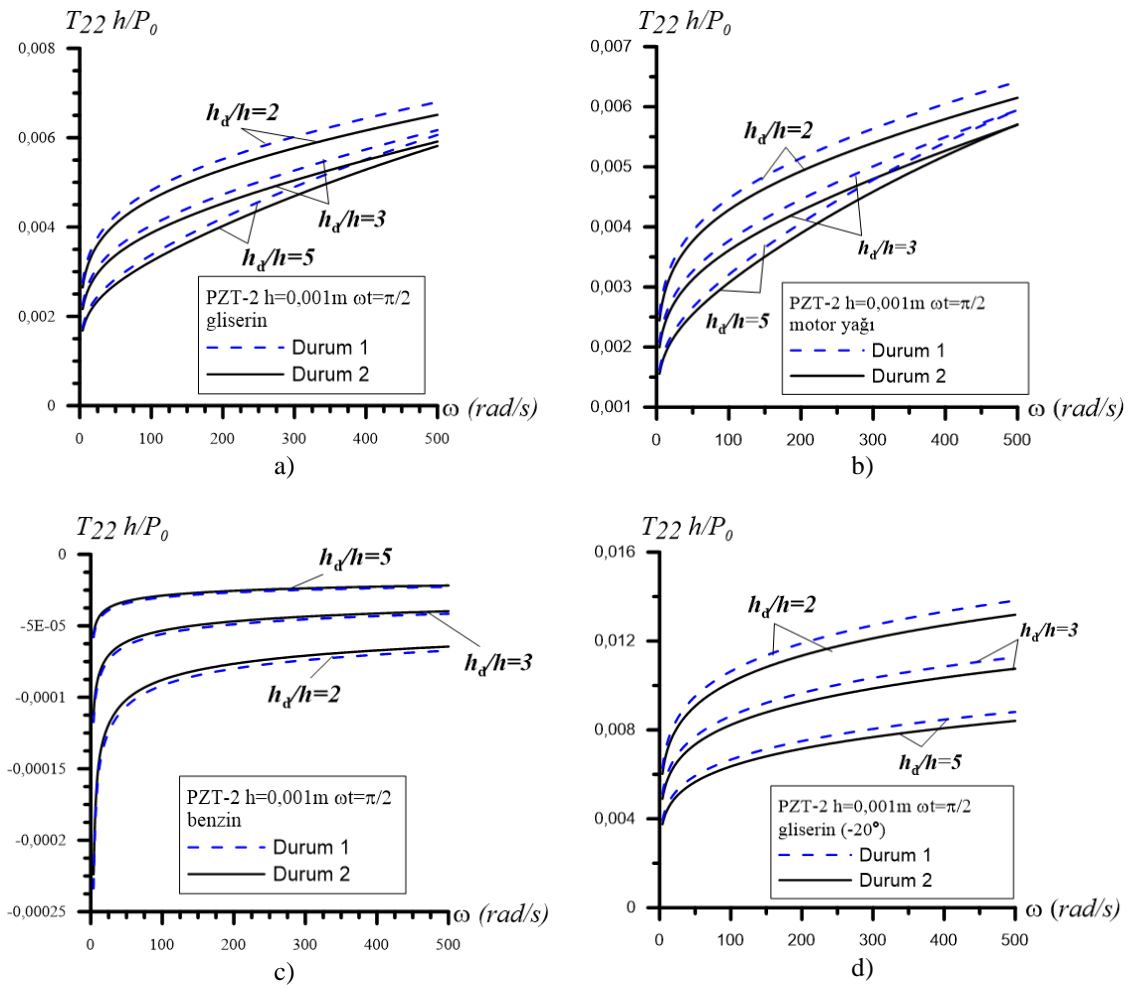
Akışkan	Yoğunluk (kg/m^3)		Dinamik viskozite kg/(m.s)		Ses hızı (m/s)
Gliserin	1260		1,393		1927
Motor Yağı	911		0,86		1461
Benzin	750		0,0006		1250
Gliserin (-20°)	1160		134		1827
Plak Malzemesi	e_{31} (C/m^2)	e_{33} (C/m^2)	e_{15} (C/m^2)	$\epsilon_{11} \times 10^{-8}$ (F/m)	$\epsilon_{33} \times 10^{-8}$ (F/m)
PZT-2	-1,9	9,0	9,8	8,7615	3,9825
Plak Malzemesi	$c_{44} \times 10^{-10}$ (N/m^2)	$c_{11} \times 10^{-10}$ (N/m^2)	$c_{13} \times 10^{-10}$ (N/m^2)	$c_{33} \times 10^{-10}$ (N/m^2)	ρ (kg/m^3)
PZT-2	2,22	13,5	6,81	11,3	7600

**Şekil 2.** Plak kalınlığının (h)=0.001m ve titreşim fazı (ω)=0 alındığında a) gliserin b) motor yağı c) benzin ve d) gliserin (-20°) akışkanlarını içeren sistemlere ait ara yüz gerilmesi frekans cevapla

Grafiklerdeki kesikli çizgiler ile sürekli çizgiler arasındaki fark, plak malzemesinin PZT özellik taşıması/taşıması durumları arasındaki farkı yani, elektromekanik etkinin tesirini göstermektedir.

Şekil 2'deki sayısal sonuçlar titreşim frekansının $4 \text{ (rad/s)} \leq \omega \leq 500 \text{ (rad/s)}$ aralığında kabul edildiği ve titreşim fazının sıfır olduğu durumlar için elde edilmiştir. Bu frekans aralığında, ara yüz düzlemindeki gerilmenin mutlak değeri, ω ile monoton olarak artmaktadır. Akışkan

viskozitesinin daha büyük olduğu sistemlerde ara yüz düzlemindeki gerilme mutlak değerce daha büyüktür. Akışkan viskozitesinin etkisini daha net görebilmek için, düşük sıcaklıktaki gliserin, diğer akışkanlara kıyasla oldukça yüksek viskozitesi nedeniyle araştırmaya dahil edilmiştir. Şekil 2'den görüldüğü gibi viskozite arttığında ara yüz gerilme değeri mutlak değerce artmaktadır. Elektromekanik etki ise, tüm akışkan grafiklerindeki gerilme değerinin mutlak değeri üzerinde azaltıcı bir etkiye sahip olmaktadır.

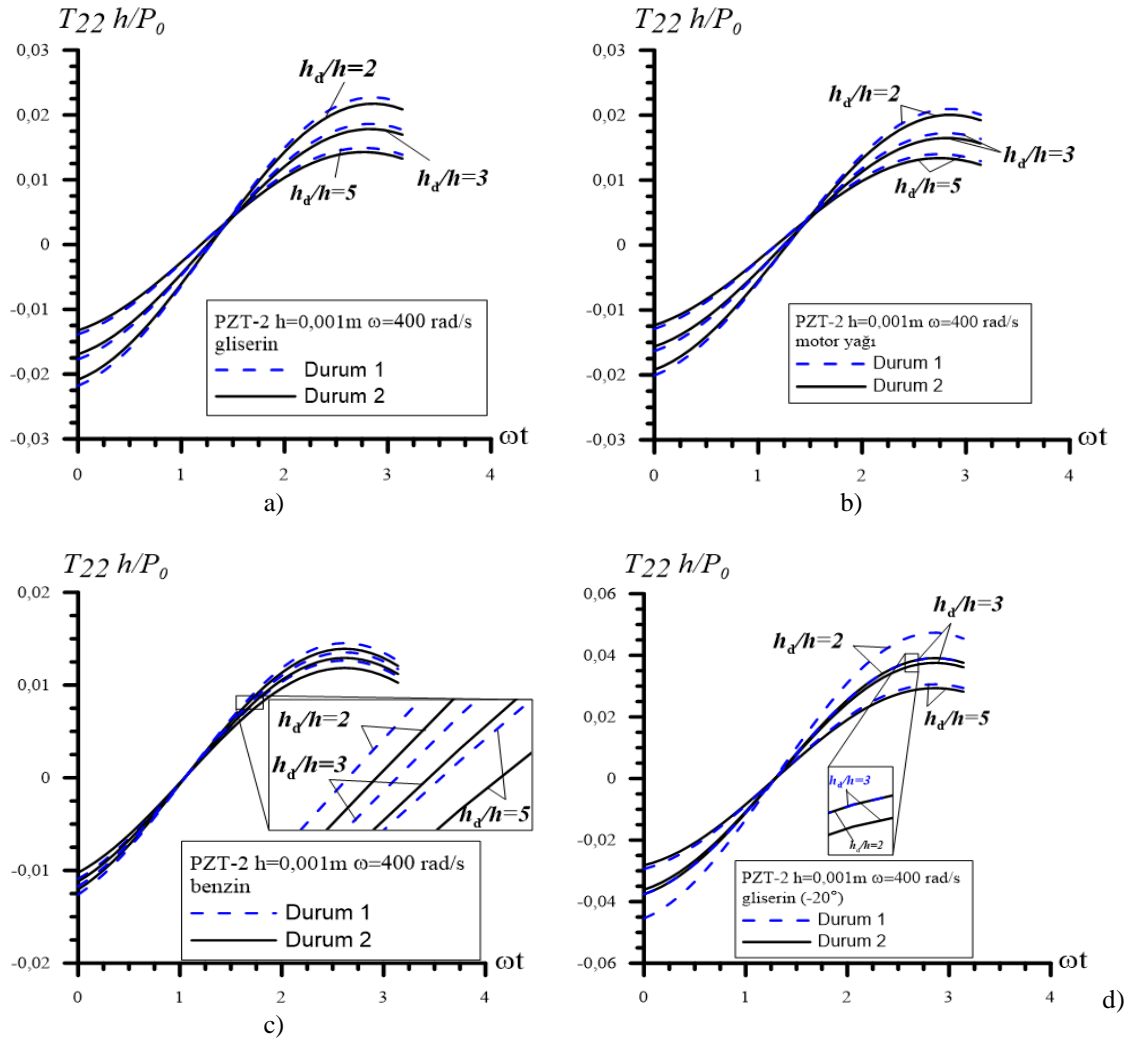


Şekil 3. Plak kalınlığı (h)=0,001m ve titreşim fazı (ωt), $\pi/2$ alındığında a) gliserin b) motor yağı c) benzin ve d) gliserin (-20°) akışkanlarını içeren sistemlere ait ara yüz gerilmesi frekans cevapları

Şekil 3’de ise titreşim fazının $\omega t = \pi/2$ ve plak kalınlığının $h=0.001\text{m}$ olduğu durumda, farklı akışkanlardan oluşan sistemin ara yüz düzlemi gerilmesi frekans cevabı grafikleri verilmiştir. Şekil 2 ve Şekil 3’de verilen sonuçlardan yola çıkılarak, titreşim fazının ara yüz düzlemi gerilmesinin frekans cevabı üzerinde etkili olduğu anlaşılmıştır. Şekil 2’de $\omega t=0$ titreşim fazında, tüm ara yüz gerilme eğrileri negatif bölgedeyken, Şekil 3’de $\omega t=\pi/2$ titreşim fazında ara yüz

gerilme eğrilerinin hepsinin yön değiştirdiği görülmektedir.

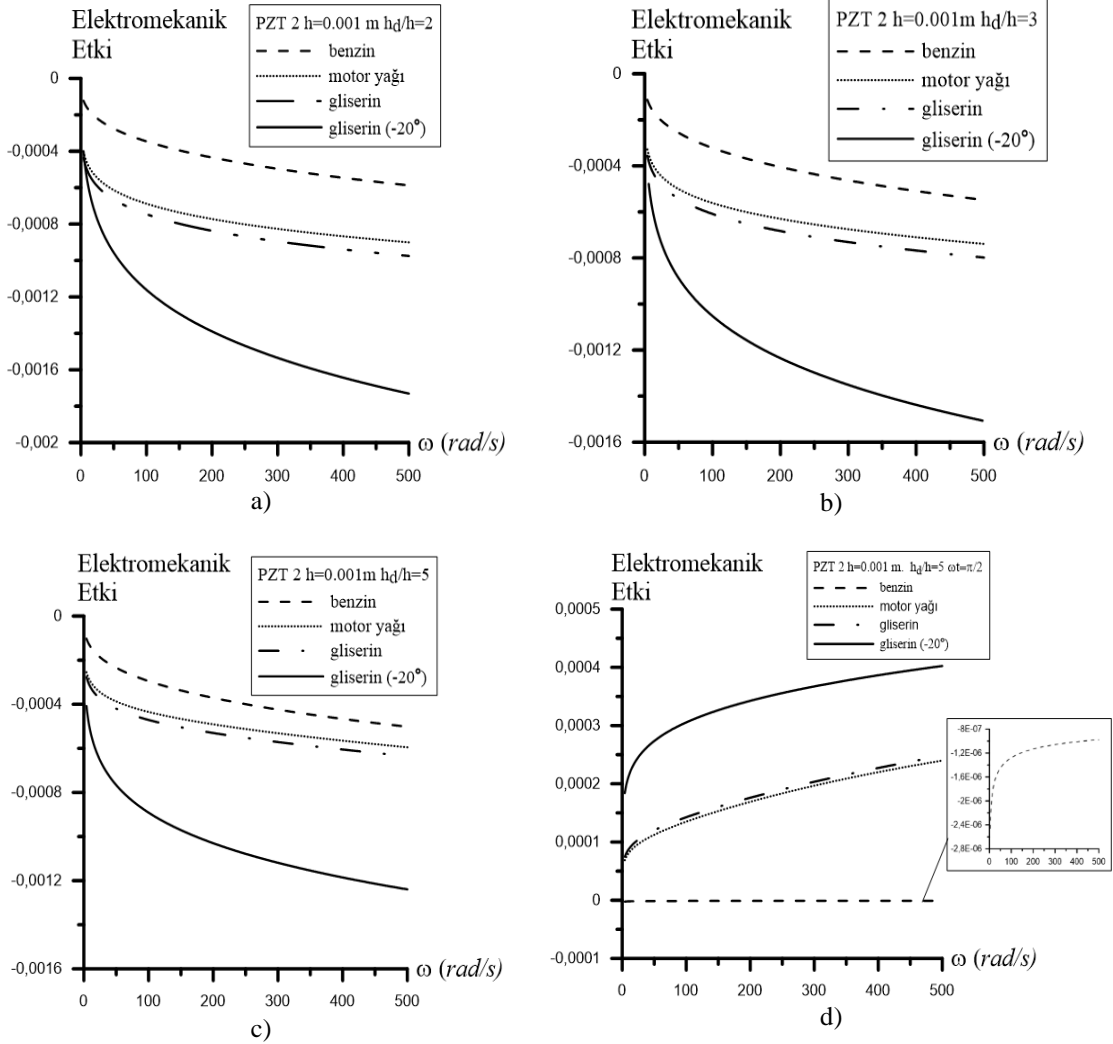
Titreşim fazının ara yüz düzlemi gerilmesine etkisinin daha iyi anlaşılması için, Şekil 4’de ara yüz gerilmesi ile titreşim fazı bağımlılığını gösteren dört farklı akışkana ait grafikler verilmiştir. Bu şekilde $\omega=400\text{ rad/s}$ alınmış olup, a, b, c, d grafikleri sırasıyla gliserin, motor yağı, benzin ve düşük sıcaklıklı gliserin akışkanlarına aittir.



Şekil 4. Plak kalınlığı (h)=0.001m ve titreşim frekansı $\omega=400\text{ rad/s}$ alındığında, a) gliserin b) motor yağı c) benzin ve d) gliserin (-20°) akışkanlarını içeren sistemlere ait ara yüz gerilmesi-titreşim fazı arasındaki bağıntı eğrileri

Plak malzemesinin elektromekanik özelliği, tüm akışkanların ara yüz düzlemi gerilmesinin mutlak değeri üzerinde düşüşe neden olmuştur. Bu düşüş

miktarının akışkan viskozitesi ile bağıntısını incelemek için Şekil 5'deki eğrilere bakılabilir.



Şekil 5. Plak kalınlığı (h)=0,001m ve titreşim fazı (ωt)=0 alındığında, a) $h_d/h = 2$ b) $h_d/h = 3$ c) $h_d/h = 5$ için ve d) titreşim fazı $\omega t = \pi/2$ alındığında, $h_d/h = 5$ için, Durum 1 ve Durum 2'nin sayısal farkına ait grafikler

Şekil 5'de Durum 1 ve Durum 2 için elde edilen sayısal sonuçların farkına ait grafikler tüm akışkanlar için verilmiştir. Şekil 5'de elektromekanik etkinin neden olduğu, azalma miktarları farklı viskozitelere sahip akışkanlar için verilmiştir. Elektromekanik etki, viskozitesi büyük olan akışkanın ara yüz gerilmesinin mutlak değeri

üzerinde daha fazla azalmaya sebep olmuştur. Akışkanın viskozitesinin azalmasıyla gerilme mutlak değerindeki düşüş miktarı azalmıştır. Ayrıca akışkan derinliği/plak kalınlığı (h_d/h) değeri arttıkça elektromekanik özelliğinin etkisi azalmıştır.

Diğer yandan titreşim fazının da plağın elektromekanik etkisini değiştirdiği görülmüştür. Şekil 5’de ki c ve d eğrileri karşılaştırıldığında, titreşim fazının sıfır olduğu durumda, ara yüz gerilmesi üzerindeki elektromekanik etkinin mutlak değerce daha fazla olduğu görülmüştür.

4. SONUÇLAR

Piezoelektrik plak ve sonlu derinlikte sıkıştırılabilir viskoz akışkandan oluşan sistemin mekanik zorlanmış titreşimi incelenmiştir. Plağın hareketi, elasto-elektro dinamiğin piezoelektrik malzemeler için olan kesin denklemleri ile ifade edilmiştir. Akışkanın akım denklemleri ise, doğrusallaştırılmış Navier-Stokes denklemleri ile verilmiştir. Çalışmanın temel amacı; akışkan özelliklerinin, akışkan ve plak ara düzlemindeki basınca (normal gerilme değerine) nasıl etkiğini araştırmaktır. Yapılan teorik çalışmalarda; plak malzemesi PZT-2 olarak seçilmiş olup, sisteme uygulanan mekanik kuvvetin frekansı $4(\text{rad/s}) \leq \omega \leq 500(\text{rad/s})$ aralığında kabul edilmiştir. Akışkan olarak ise gliserin, motor yağı, benzin ve düşük sıcaklıklı (-20°) gliserin akışkanları incelenmiştir.

Akışkan viskozitesinin artışıyla, plak akışkan ara yüz düzlemindeki basıncın mutlak değerinde artış olmaktadır. Tüm grafiklerde, piezoelektrik etki plak akışkan ara yüz düzlemindeki basıncın mutlak değerce azalmasına neden olmaktadır. Piezoelektrik etki, akışkanın viskozitesi arttıkça artmaktadır. Bu çalışma kapsamında akışkan ve piezoelektrik plak etkileşiminin olduğu sistemin dinamik davranışının analizi için bir algoritma geliştirilmiştir. Bu yöntem özellikle plağın sonsuz uzunlukta modellendiği birçok araştırma için kullanılabilir. Çalışmada viskozitesi farklı akışkanlar kullanılarak, bu sistemin değişik çalışma alanlarında ve koşullarda kullanıldığında elde edilecek sonuçlar incelenmiştir.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın bir kısmı, 6-10 Eylül 2021 tarihlerinde Çukurova Üniversitesi’nde gerçekleştirilen 22. Ulusal Mekanik Kongresi’nde sözlü bildiri olarak sunulmuştur.

6. KAYNAKLAR

1. Lamb, H., 1921. Axisymmetric Vibration of Circular Plates in Contact with Water. Proceedings of The Royal Society (London) A, 98, 205–216.
2. McLachlan, N., 1932. The Accession to Inertia of Flexible Discs Vibrating in a Fluid. Proceedings of the Physical Society (London), 44, 546–555.
3. Amabili, M., Kwak, M., 1996. Free Vibrations of Circular Plates Coupled with Liquids: Revising the Lamb Problem. Journal of Fluids and Structures, 7, 743–761.
4. Kwak, H., Kim, K., 1991. Axisymmetric Vibration of Circular Plates in Contact with Water. Journal of Sound and Vibration, 146, 381–389.
5. Kwak, M., 1997. Hydroelastic Vibration of Circular Plates (Fourier-Bessel Series Approach). Journal of Sound and Vibration, 201, 293–303.
6. Athanassoulis, G., Mamis, K., 2012. An Onshore Hydro/piezo/electric System and its Application to Energy Harvesting from Sea Waves. The 2012 World Congress on Advances in Civil, Environmental and Materials Research (ACEM’ 12), 368–387.
7. Renzi, E., 2016. Hydro-electromechanical Modelling of a Piezoelectric Wave Energy Converter. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 472, 2195.
8. Cho, J., Jeong, S., 2017. Design of Hydro Electromagnetic and Piezoelectric Energy Harvesters for a Smart Water Meter System. Sensors and Actuators A: Physical, 261(1), 261–267.
9. Zakaria, H., Loon, C., 2018. The Application of Piezoelectric Sensor as Energy Harvester from Small-Scale Hydropower. International Conference on Civil and Environmental Engineering (ICCEE 2018), 65.
10. Huang, Y., Hsu, H., 2016. Solid-Liquid Coupled Vibration Characteristics of Piezoelectric Hydroacoustic Devices. Sensors and Actuators A: Physical, 238, 177–195.

11. Kuznetsova, I., Zaitsev, B., Borodina, I., 2011. Study of the Hydroacoustic Emitter Based on the Antisymmetric Lamb Wave in a Piezoelectric Ceramic Plate. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 56(11), 1382–1386.
12. Sharapov, V., Zhanna, S., Kunickaya, L., 2014. *Piezo-electric, Electro-Acoustic Transducers*, Springer, New York, USA.
13. Le, Q.L., Capsal, J.F., Lallart, M., Hebrard, Y., Ham, A.V.D., Reffe, N., Geynet, L., Cottinet, P.J., 2015. Review on Energy Harvesting for Structural Health Monitoring in Aeronautical Applications. *Progress in Aerospace*, 79, 147–157.
14. Akbarov, S.D., 2018. Forced Vibration of the Hydro-viscoelastic and -Elastic Systems Consisting of the Viscoelastic or Elastic Plate, Compressible Viscous Fluid and Rigid Wall: a Review. *Appl. Comput. Math.* 17(3), 221-245.
15. Ekicioğlu Küzeci, Z., 2020. *Piezoelektrik Levha, Viskoz Akışkan ve Rijit Duvardan Oluşan Sistemin Zorlanmış Titreşimi*. Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
16. Akbarov, S., Ismailov, M., Aliyev, A., 2017. The Influence of the Initial Strains of the Highly Elastic Plate on the Forced Vibration of the Hydro-Elastic System Consisting of this Plate, Compressible Viscous Fluid, and Rigid Wall. *Coupled System Mechanics*, 6(4), 287–316.

Elektrikli Araçların Kablosuz Güç Transferi Sistemi için Dairesel Bobinli Bir Transformatörün Tasarımı ve Veriminin Analizi

Yıldırım ÖZÜPAK*¹ ORCID 0000-0001-8461-8702

¹Dicle Üniversitesi Silvan Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Diyarbakır

Geliş tarihi: 23.02.2022

Kabul tarihi: 21.03.2022

Atıf şekli/ How to cite: ÖZÜPAK, Y., (2022). Elektrikli Araçların Kablosuz Güç Transferi Sistemi için Dairesel Bobinli Bir Transformatörün Tasarımı ve Veriminin Analizi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37(1), 209-219.

Öz

Kablosuz Güç Transferi (KGT), elektrik enerjisinin iletkenlere ihtiyaç duyulmadan aktarılmasıdır. KGT zamanla değişen elektrik, manyetik veya elektromanyetik alanlar kullanan teknolojilere dayanır. Bu teknolojilerde güç, kısa mesafelerde, manyetik alan ve bobinler arasındaki endüktif kuplaj yoluyla veya elektrik alan ile metal elektrotlar arasındaki kapasitif kuplaj yoluyla aktarılabilir. Diğer bir ifade ile bu sistemin temel çalışma prensibi manyetik rezonansa (MR) dayanmaktadır. Endüktif kuplaja dayalı KGT sistemi, kısa mesafelerdeki elektrikli cihazların şarj edilmesi için kullanılmaktadır. Bu teknolojinin gelişmesi, endüktif kuplajlı güç aktarım sistemini elektrikli araçların şarj uygulamaları için vazgeçilmez hale getirmiştir. Bu çalışmada, elektrikli araçlardaki şarj uygulaması için KGT sisteminin verimliliğini etkileyen faktörler analiz edilmiştir. KGT sisteminde kullanılan transformatörlerin karmaşıklığı nedeniyle, karşılıklı endüktans ve kuplaj katsayısının hesaplanmasını kolaylaştırmak için Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanılmıştır. Bunun için bir elektrik devresini doğrusal olmayan bir eleman modeliyle birleştiren bir simülasyon modeli ANSYS yazılım paketi kullanılmıştır. Dairesel bobinli bir KGT transformatör modeli, Ansys-Maxwell yazılımında modellenmiş ve farklı koşullar altında simüle edilmiştir. Ayrıca tasarlanan KGT sisteminin performansı analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: KGT, Transformatör, Manyetik rezonans, SEY

Design and Efficiency Analysis of a Circular Coil Transformer for Wireless Power Transfer System of Electric Vehicles

Abstract

Wireless Power Transfer (WPT) is the transfer of electrical energy without the need for conductors. WPT relies on technologies that use time-varying electric, magnetic or electromagnetic fields. In these

* Sorumlu yazar (Corresponding author): Yıldırım ÖZÜPAK, yildirimosupak@gmail.com

technologies, power can be transferred over short distances by inductive coupling between the magnetic field and coils or by capacitive coupling between the electric field and metal electrodes. In other words, the basic working principle of this system is based on magnetic resonance (MR). WPT system based on inductive coupling is used for charging electrical devices over short distances. The development of this technology has made the inductive coupling power transmission system indispensable for charging applications of electric vehicles. In this paper, the factors affecting the efficiency of the WPT system for the charging application in electric vehicles are analyzed. Due to the complexity of the transformers used in the WPT system, the Finite Element Method (FEM) is used to facilitate the calculation of mutual inductance and coupling coefficient. For this, a simulation model ANSYS software package is used, which combines an electrical circuit with a nonlinear element model. A circular coil WPT transformer model was modeled in Ansys-Maxwell software and simulated under different conditions. In addition, the performance of the designed WPT system has been analyzed.

Keywords: WPT, Transformer, Magnetic resonance, FEM

1. GİRİŞ

Teknoloji Kablosuz Güç Transferi (KGT), elektrik enerjisini bir vericiden diğer bir alıcıya kablosuz olarak aktarmak için kullanılan umut verici bir teknolojidir. KGT, kablolu bağlantılara oranla sahip olduğu avantajlar sayesinde birçok endüstriyel uygulama için önem arz etmektedir. Kablo taşıma zorluğu olmaması, kolay şarj edebilmesi ve olumsuz çevre koşullarında güç aktarımının verimli bir şekilde gerçekleştirilebilmesi avantajları arasında yer almaktadır. KGT fikri ilk olarak 19. yüzyılın sonlarında Nicola Tesla tarafından ortaya atılmıştır. Elektrik yükünü kablosuz aktarmak için kullanılan kablosuz bir aydınlatma ampulü üretmiştir. Bu amaçla, Tesla, birbirine yakın yerleştirilmiş iki metal plaka kullanmıştır. Bu iki plaka arasından yüksek frekanslı Alternatif Akım (AC) geçirmiş ve ampule yük aktarmayı başarmıştır. Ancak, KGT teknolojisini kullanırken bazı sorunlarla karşılaşmıştır. Plakalar arasındaki mesafe arttıkça gücün azaldığını ve güç transferinde verimin düştüğü saptanmıştır. Bu durum KGT teknolojisinin performansını düşürmektedir. Endüktif Güç İletimi (EGİ) ve Kapasitif Güç İletimi (KGİ) iki önemli KGT teknolojisini oluşturmaktadır. KGİ çok kısa hava boşluklarına sahip düşük güçlü uygulamalara uygulanabilirken, EGİ birkaç metre civarındaki büyük hava boşlukları için kullanılabilir ve çıkış gücü KGİ'den çok daha yüksektir.

KGT ışınımsal ve ışınımsal olmayan yöntemlerle yapılmaktadır. Işınımsal olmayan yöntemlerden manyetik rezonans (MR) yöntemi; insan sağlığına zarar vermemesi ve yüksek verimliliği yönüyle araştırmacılar arasında oldukça ilgi görmektedir. MR kuplaj yöntemi kullanılarak 2 m mesafedeki 60 W gücündeki bir lamba % 40 civarında bir verimle çalıştırılmıştır [1]. İlk başlarda daha çok düşük güç seviyelerinde KGT uygulamaları yapılmaktayken, özellikle son 10 yılda, farklı aktarım mesafelerinde 7-10 kW güç seviyelerine ulaşabilen, % 80-95 arasında verim değerlerine sahip uygulamalar yapıldığı görülmüştür [2].

MR kuplaja dayanan KGT sistemleri; transformatör, besleme kaynağı ve yük devrelerinden meydana gelmektedir. Nüve yapısı ve verici-alıcı bobinler transformatör devresini oluşturmaktadır. Manyetik devre (nüve), verici bobinin besleme frekansı ve bobinlerin rezonansı bu sistemde maksimum enerji transferini sağlamak için önem teşkil etmektedir.

MR kuplajlı KGT sistemlerinin rezonans durumunda çalışması verim açısından önemlidir [3]. Rezonans, KGT sistemlerinde kaynak ile yük arasındaki güç aktarımını oransal olarak artırır ve böylece sistem verimini yükseltmektedir. Bununla beraber MR'nin gerçekleştirilmesinde; alıcı ve verici bobinlerin hizalanmış olması, eğer hizalanma yapılamıyorsa rezonans kondansatörlerinin değerlerinin yeni duruma göre

güncellenmesi gereklidir [4]. KGT sistemlerinde verici tarafın şebeke frekansına göre oldukça yüksek frekanslı bir kaynak ile beslenmesi sistem verimi artıran diğer bir faktördür [5]. Bu sebeple aktarımı yapan bobinlerin tasarımında ve beslemesinde bu durum göz önünde bulundurulmalıdır [6].

KGT sistemlerinde verimi etkileyen en önemli noktalardan diğer biri de düşük kayıp kuplajlı transformator kullanmaktır. Bir transformatorde elektrik enerjisi transferi birincil ve ikincil bobinler arasında manyetik enerji kuplajıyla gerçekleşmektedir. Verimli bir transfer için bu bobinler arasında maksimum manyetik akı geçişi sağlanmalıdır. Hava nüveli transformatorlü KGT sistemlerinde manyetik devre tamamen hava üzerinden tamamlanır. Bu yapı uzun mesafelere enerji aktarımda tercih edilir. Kısa mesafeli enerji aktarımlarında ise hibrit yapılar (hava- manyetik nüve) tercih edilir [7-10].

KGT teknolojileri televizyonlarda, telefon şarj cihazlarında, indüksiyonlu ısıtmada, tıbbi cihazlarda, kalp pillerinde, radyo frekansı tanımlamada, sensörlerde ve robotlarda uygulanabilmektedir [11-18]. KGT sistemi elektrikli araçların şarj uygulaması için mükemmel bir alternatif çözüm sunmaktadır. Elektrikli araçlardaki bataryalar, sınırlı ömrü ve yüksek maliyeti nedeniyle araştırmacılar için zorluk teşkil etmektedir [15]. Elektrikli araç akü şarjı işlemi iki yöntemle yapılır: Kablolar kullanılarak iletken şarj edilebilir veya endüktif kuplaj ile şarj edilebilir. İletken kullanılarak, bataryaları şarj etmek hem uzun bir süre gerektirmekte hem de elektrik çarpmasına neden olabilecek etkenlerden dolayı insan hayatı için olumsuzluk teşkil etmektedir. Endüktif kuplaj ile şarj sistemi ise enerjinin kablosuz olarak şebekeden bobinler vasıtasıyla yüke aktarıldığı kablosuz güç aktarım sistemi şarjıdır.

Kablosuz güç aktarım sistemi şarj teknolojisi, sürücüler için çok daha güvenli, müdahale gerektirmediği için kullanımı kolaydır. Bununla birlikte, bu teknolojinin ana sorunları, verici ve alıcı bobin arasındaki büyük hava boşluğu nedeniyle bağlantının zayıf olması, insanın üretilen

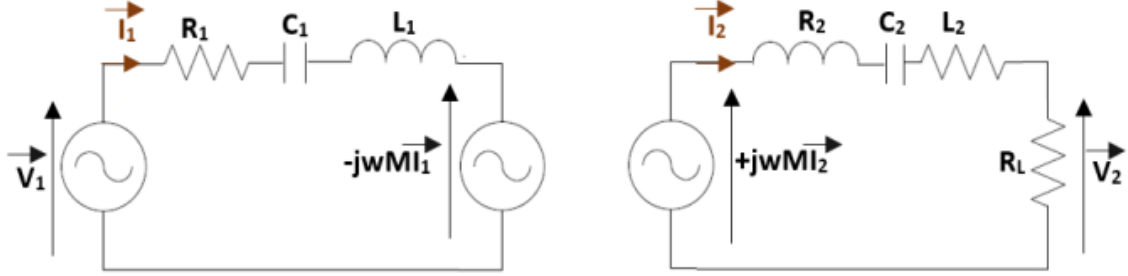
manyetik alana maruz kalması ve düşük sistem verimliliğine neden olan büyük kaçak akıların meydana gelmesidir [12]. Manyetik alan rezonansına dayalı KGT teknolojisi, manyetik alan kuplajını en üst düzeye çıkarmak ve rezonans frekansında güç aktarım kapasitesini artırmak için kullanılır [13]. Manyetik rezonans kullanılarak kablosuz güç aktarım sisteminin verimliliğini artırmak amacıyla akıyı yoğunlaştırmak ve sızıntıyı azaltmak için sisteme bir ferrit çekirdek ve alüminyum kalkan eklenmiştir.

Bu çalışmada, MR'ye dayalı kuplaj kullanan bir manyetik rezonanslı KGT transformator modeli sunulmuştur. Ansys-Maxwell yazılımı kullanılarak Sonlu Eleman Yöntemi (SEY) ile MR'ye dayalı bir KGT sisteminin analizi yapılmıştır. Bunun için dairesel bir bobin modeli seçilmiştir. Karşılıklı endüktans ve kuplaj katsayısı, farklı koşullar altında belirli mesafeler için hesaplanmıştır. Bu iki parametre, KGT sistem verimliliğinin analizinde büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, Ansys-Maxwell ile farklı hava boşlukları, yanlış hizalama değişimi, ferrit çekirdek ve alüminyum kalkanın farklı şekillerde eklenmesi gibi sistem bağlantısını etkileyen faktörlerin etkileri incelenerek KGT sisteminin bu değişkenlere bağlı olarak simülasyon ve analizi yapılmıştır.

2. YÖNTEM

2.1. Manyetik Rezonansa Dayalı KGT Transformator Modeli

Elektromanyetik Manyetik rezonansa dayalı KGT sistemlerinde güç, hava boşluğu ile ayrılmış iki bobin arasında kablosuz olarak aktarılır. Araçların altında bulunan alıcı bobine R_x , verici bobinden T_x akan akım tarafından üretilen bir manyetik alan gönderilir. Bu manyetik alan, elektrikli araçta pili şarj etmek için kullanılan alıcı R_x 'de bir gerilim indükler. Farklı KGT teknolojileri arasında manyetik rezonanslı KGT sistemi, özellikle elektrikli araç uygulaması için yüksek güç aktarım verimliliği ve en önemlisi yakın mesafede yüksek kablosuz iletim gücü sunmaktadır [14]. Şekil 1'de, elektrikli araçlar uygulaması için manyetik rezonansa dayalı bir KGT sistemi verilmiştir.



Şekil 1. Elektrikli araçlar için manyetik rezonansa dayalı KGT sistem modeli

Burada, L_1 ve L_2 sırasıyla primer ve sekonder taraflarının endüktansları, R_1 ve R_2 primer ve sekonder tarafın dirençleri, C_1 ve C_2 birincil ve ikincil tarafın kapasitörleri, R_L eşdeğer yük direnci ve M , bobinler arasındaki karşılıklı endüktansı ifade etmektedir. Ayrıca, endüktif bileşen iptal edilerek primer ve sekonder tarafa bir dengeleme kapasitörü eklenmiştir. KGT sistemlerinde dört farklı kompanzasyon topolojisi bulunmaktadır: seri-seri (SS), seri-paralel (SP), paralel-paralel (PP) ve paralel-seri topolojileridir [15]. [15]'e göre SS topolojisi, birincil kapasitansının kuplaj katsayısına bağlı olmadığı tek topolojidir. SS kompanzasyon teknolojisi için hesaplanan kapasitörler Eşitlik 1 ve 2 ile verilmiştir [17]:

$$C_1 = \frac{1}{\omega^2 L_1} \quad (1)$$

$$C_2 = \frac{1}{\omega^2 L_2} \quad (2)$$

Verici ve alıcı bölümlerinin gerilim denklemleri (Eşitlik 3-4):

$$V_1 = Z_{T1} I_1 - j\omega M I_2 \quad (3)$$

$$Z_{T2} I_2 = j\omega M I_1 \quad (4)$$

Burada, Z_{T1} ve Z_{T2} verici ve alıcı bobinin aşağıdaki şekilde ifade edilen empedansdır (Eşitlik 5-6):

$$Z_{T1} = Z_{C1} + Z_{R1} + Z_{L1} = \frac{1}{j\omega C_1} + R_1 + j\omega L_1 \quad (5)$$

$$Z_{T2} = Z_{C2} + Z_{R2} + Z_{L2} = \frac{1}{j\omega C_2} + R_2 + j\omega L_2 \quad (6)$$

Rezonans frekansında Eşitlik 1 ve 2'den aşağıda verilen sonuca varılmaktadır (Eşitlik 7-9):

$$Z_{C1} + Z_{L1} = 0 \quad (7)$$

$$Z_{C2} + Z_{L2} = 0 \quad (8)$$

Sonuç olarak;

$$V_1 = R_1 L_1 - j\omega M I_2 \quad (9)$$

Alıcı bobinde I_2 akan akım Eşitlik 10'da verildiği gibi ifade edilmektedir.

$$I_2 = \frac{j\omega M}{R_2 + R_L} \times I_1 \quad (10)$$

Gerilim kaynağı tarafından P cinsinden iletilen giriş gücü (Eşitlik 11):

$$P_{in} = V_1 I_1 = \frac{R_1 \times (R_2 + R_L) + (\omega M)^2}{R_2 + R_L} \times I_1^2 \quad (11)$$

şekindedir. Böylece, yükün çıkış gücü P (Eşitlik 12):

$$P_{out} = R_L I_2^2 = R_L \times \frac{\omega^2 M^2 I_1^2}{(R_2 + R_L)^2} \quad (12)$$

Şeklinde olmaktadır. Burada η güç aktarım verimliliği, şu şekilde yazılabilen P_{out} 'un P_{in} 'ne oranıdır (Eşitlik 13):

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{R_L \times (\omega M)^2}{(R_2 + R_L) \times [R_1 \times (R_2 + R_L) + (\omega M)^2]} \quad (13)$$

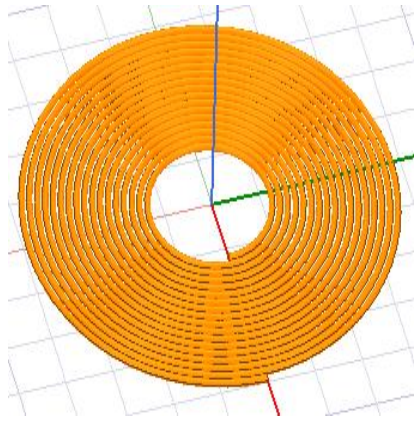
$R_L \gg R_2$ ise, daha yüksek frekans ve daha büyük karşılıklı endüktansın daha yüksek verim anlamına geldiği sonucuna varılmaktadır (Eşitlik 14).

$$\eta \approx \frac{1}{1 + \frac{R_1 R_2}{(\omega M)^2}} \quad (14)$$

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

3.1. SEY ile Bobin Tasarımı

Bobin, enerjiyi elektrik formundan ile manyetik forma dönüştürdüğü için kablosuz güç aktarım sisteminde vazgeçilmez bir bileşendir. Bu yüzden, indüksiyon veriminin düşük olması tüm sistemin verimliliğinde bir düşüş meydana getirmektedir. Bu çalışmada, referans bir dairesel bobin modeli seçilmiştir. Dairesel bobin, Ansys-Maxwell yazılımı kullanılarak modellenip simüle edilmiştir. Şekil 2’de tasarlanan bobin modeli sunulmuştur.



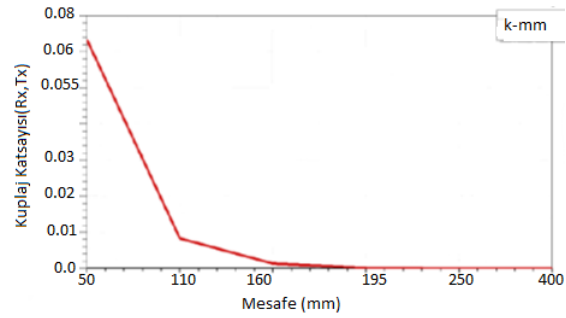
Şekil 2. Referans dairesel bobin modeli

3.2. Hava Boşluğu Mesafesinin Analizi

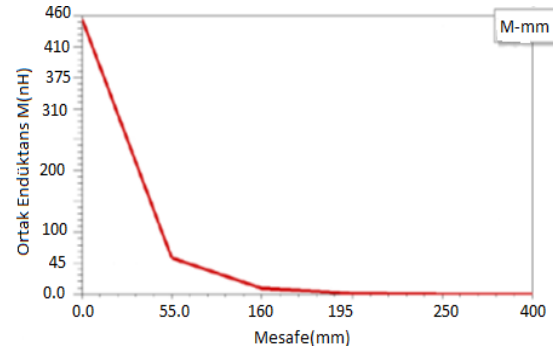
Hava boşluğu, aracın şasisi ile toprak arasındaki z-mesafesini temsil eden verici ve alıcı bobin arasındaki dikey boşluktur. Önceki bölümde bahsedildiği gibi dairesel bobin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Çalışmayı basitleştirmek için bu yapı hem verici hem de alıcı bobin için kullanılmıştır. Çizelge 1’de ve Şekil 3 ve 4’te 55 mm ile 250 mm arasında değişen bir hava boşluğu ile sırasıyla kuplaj katsayısı ve karşılıklı endüktansın simülasyon sonuçları verilmiştir.

Çizelge 1. Dairesel çekirdekli bobin modelinin simülasyon sonuçları

Mesafe (mm)	Kuplaj katsayısı	Ortak endüktans (nH)
55	0,065	450,1
110	0,009	60,2
160	0,0015	11,1
195	0,0003	0,42
250	0,00005	0,02



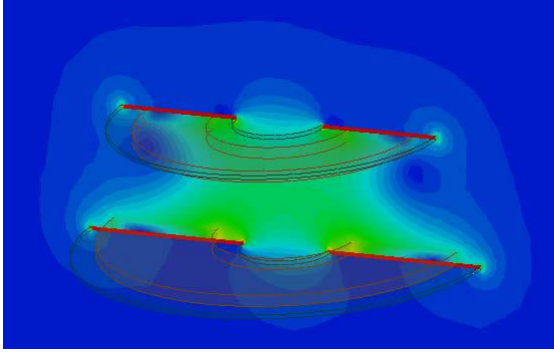
Şekil 3. Kuplaj katsayısı ve boşluk simülasyon sonuçları dairesel çekirdeksiz bobin modelinden



Şekil 4. Boşluğa karşı karşılıklı endüktansın Simülasyon sonuçları dairesel çekirdeksiz bobin modelinden

Çizelge 2, Şekil 3 ve 4’te görüldüğü üzere, iki bobin arasındaki mesafe arttıkça kuplaj katsayısının ve karşılıklı endüktansın azaldığı görülmüştür. Çekirdeksiz transformator, fazla ağırlığa ve fiyata göre avantajları temsil etse bile, verimliliği, elektrikli araç şarjında uygulama alanını sınırlamaktadır. Bu nedenle, sistem verimliliğini artırmak için belirli malzemelerin KGT

transformatörüne eklenmesi gerekmektedir. Hava boşluğunun=55 mm olduğu bir sistemin manyetik alan yoğunluğu grafiği Şekil 5'te sunulmuştur. Mavi ve kırmızı renkler, sırasıyla en düşük ve en yüksek manyetik akı değerlerini temsil etmektedir.



Şekil 5. Dairesel çekirdeksiz bobin modeli için manyetik alan yoğunluğu grafiği

Yukarıda Şekil 5'ten de anlaşılacağı gibi, büyük bir akı sızıntısı meydana gelmiştir. Verici bobin ile alıcı bobin arasındaki z-mesafesi arttıkça manyetik alan çizgileri alıcı bobine daha az ulaşmıştır. Ayrıca, iki bobin arasındaki sızıntı bağlantısı, sekonder bobinden uzaklaşan manyetik alan çizgilerinden kaynaklanıyor olabilir. Bu sorunun üstesinden gelmek için akıyı yoğunlaştırmak ve sızıntıyı azaltmak için bir malzeme eklemek gerekir.

3.3. Yatay Yanlış Hizalama Analizi

Verici ve alıcı bobin arasındaki yanlış hizalama, araç park etme ile ilgilidir, sürücü, aracın %100 elde edilemeyen verici bobini ile hizalandığından emin olmalıdır. [18]'e göre, yatay yanlış hizalamanın, dikey ve açılmalardan daha fazla ortaya çıkma olasılığı yüksektir. Bu nedenle, bu hizasızlığın bir dairesel bobinin kuplaj katsayısı ve karşılıklı endüktansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çizelge 3'te, yatay yanlış hizalama varyasyon sonuçları verilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre, yatay mesafe arttıkça kuplaj katsayısı ve karşılıklı endüktans azalmaktadır. Bu nedenle yatay kaçak akı, düşük kuplaj katsayısı k' 'ye ve dolayısıyla sistem

kuplajında ve verimliliğinde düşüşe neden olan etkenlerden kaynaklanmaktadır.

3.4. Sisteme Ferrit Çekirdek ve Alüminyum Kalkanın Tanıtılması

Bobin sistemine ferrit ve alüminyum eklenmesinin etkisi araştırılmıştır. Ferrit malzemeler, yüksek elektrik direnci ve düşük girdap akımı kayıpları gibi çeşitli avantajlar ve yalnızca birkaç malzemenin sunabileceği şeyleri şekillendirebilme olanağı sunmaktadır [16].

Çizelge 2. Dairesel bobinin yatay hatalı hizalama analizi sonuçları

Mesafe (mm)	Kuplaj katsayısı	Ortak endüktans (nH)
0	0,068	461,4
55	0,019	95,7
110	0,006	10,2
160	0	0
195	0	0
250	0	0

3.5. Ferrit-nüve ve Alüminyum Kalkan Plakaları ile Yapılan Tasarımın Analizi

Bu bölümde, bobin sisteminde basit bir ferrit levha ve alüminyum koruyucu levhanın tanıtımı analiz edilecektir. Ansys-Maxwell'de dairesel bir bobin transformatörü üç koşul altında modellenmiştir:

- Dairesel çekirdeksiz transformatör
- Ferrit çekirdekli dairesel transformatör modeli
- Ferrit çekirdekli ve alüminyum kalkanlı dairesel transformatör modeli

Ansys-Maxwell kullanılarak tasarlanan üç dairesel transformatör modelleri Şekil 6, 7 ve 8'de gösterilmiştir.

Şekil 6'da transformatörün bobin yapısı sunulmuştur. Şekil 7, ferrit plakalı dairesel bir bobinden oluşan yapıyı temsil etmektedir. Şekil 8'de, ferrit ve alüminyum plakalara sahip

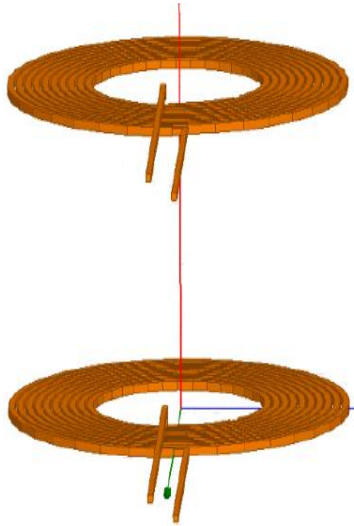
dairesele bir bobinden oluşuşı yapı verilmiştir. Çizelge 3'te kalkan plakların özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3. Ferrit çekirdek ve alüminyum kalkan ölçüleri

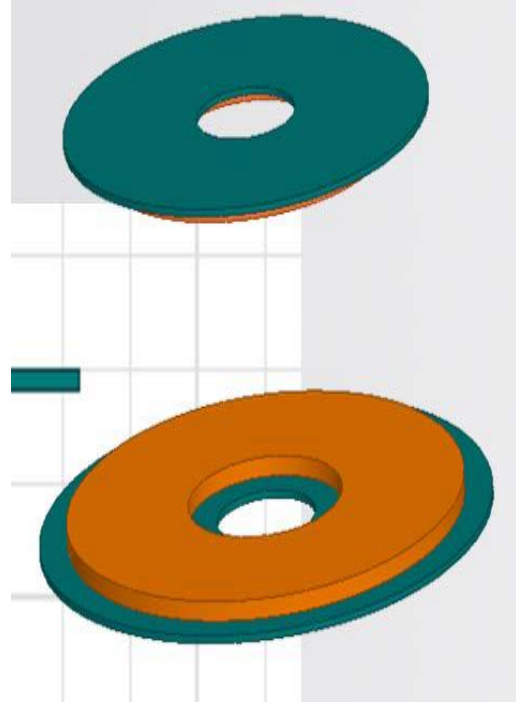
	Ferrit disk	Alüminyum plak
Yarıçap	87 mm	112 mm
Kalınlık	1,4 mm	1,4 mm

Şekil 6'da verilen dairesele nüvesiz transformatör, iki bakır bobinden oluşur ve manyetik alan sızıntısı nedeniyle düşük bir manyetik bağlantı sunmaktadır. Manyetik indüksiyon bağlantıyı güçlendirmek, kuplajı iyileştirmek ve yakınlık kayıplarını en aza indirmek için bobinler manyetik bir malzemenin etrafına yerleştirilir. Transformatörün yapısına ferrit ve alüminyumun malzemelerinin dahil edilmesi ile akı yoğunlaşmış ve sızıntı etkisi azalmıştır.

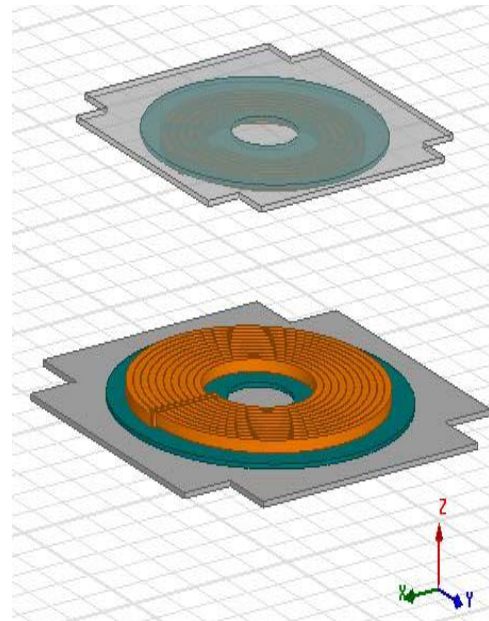
Farklı durumları analiz etmek için, Ansys-Maxwell yazılımında 75 kHz frekansında, aralığın 55 mm ile 250 mm arasında değişen varyasyonu ile bir simülasyon gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar Çizelge V ve VI'da verilmiştir. Çizelge V ve VI'da verilen sonuçlara göre, her durumda, iki bobin arasındaki mesafe arttıkça kuplaj katsayısı ve karşılıklı endüktans değerlerinin azaldığı görülmüştür.



Şekil 6. Durum 1: Dairesel çekirdeksiz transformatör, boşluk=90 mm



Şekil 7. Durum2: Ferrit çekirdekli dairesele transformatör modeli, boşluk=90 mm



Şekil 8. Durum 3: Ferrit çekirdekli ve alüminyum kalkanlı dairesele transformatör modeli, boşluk=90 mm

Çizelge 4. Ferrit çekirdekli dairesel bobin modelinin simülasyon sonuçları

Mesafe (mm)	Kuplaj katsayısı	Ortak endüktans (nH)
55	0,101	1,120
110	0,0121	0,176
160	0,0023	0,0261
195	0,000406	0,0048
250	0,000022	0,00014

Çizelge 5. Ferrit çekirdekli ve alüminyum kalkanlı dairesel bobin modelinin simülasyon sonuçları

Mesafe (mm)	Kuplaj katsayısı	Ortak endüktans (nH)
55	0,0961	1,0620
110	0,0122	0,1381
160	0,001901	0,02310
195	0,000354	0,000879
250	0,000018	0,000141

Verici bobinin üstüne ve alıcının altına ferrit plaka eklenmesi bu değeri artırır. Ferritli bobin, tüm 3 durum arasında yalnızca en yüksek bağlantı katsayısı değerini temsil eder. Çünkü ferrit manyetik akıyı yoğunlaştırır ve kaçak manyetik alan miktarını azaltır. Ancak sızıntıdan

olabildiğince kurtulmak için alüminyum plak eklemek uygundur. Alüminyumun ferritli dairesel bobine eklenmesi, bağlantı katsayısını ve karşılıklı endüktans değerlerini azaltır.

3.6. Farklı Ferrit Nüveli Şekillerinin Analizi

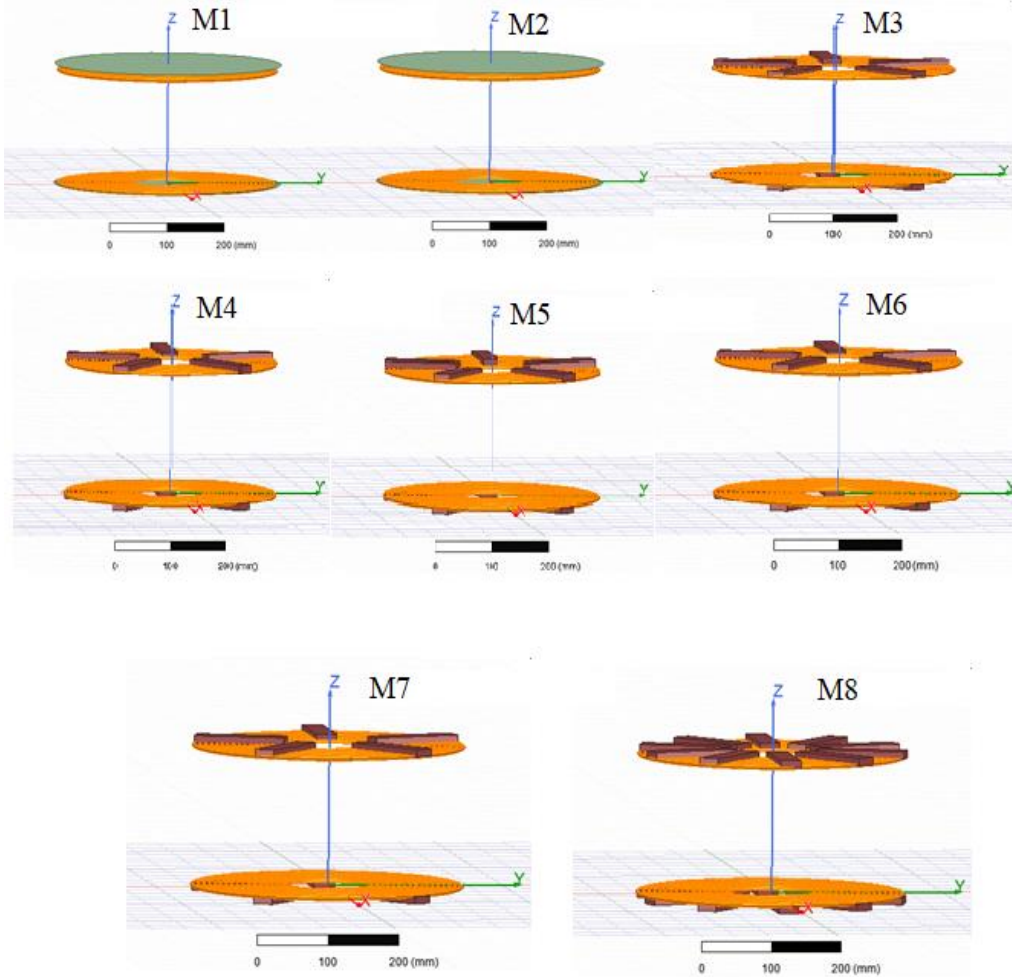
Bu bölümde, hava boşluğu 100 mm'de sabitlenerek ve ferrit şeklinin ve yerleşiminin kuplaj katsayısı ve karşılıklı endüktans üzerindeki etkisi incelenmiştir. Farklı ferrit nüveli şekillere sahip sekiz dairesel transformatör bobin modeli Ansys-Maxwell ile modellenmiş ve simüle edilmiştir.

Ferritin etkisini analiz etmek için, çap, kalınlık, genişlik, uzunluk gibi bir dizi farklı etkeni hesaba katan çok yönlü bir analiz gerekmektedir. Bunun için transformatörün farklı durum ve konumları için analizler yapılmıştır.

- Durum 1: M1, M2: Kalınlığın dairesel ferrit şekli üzerindeki etkisi.
- Durum 2: M3, M4: Kalınlığın parçalı ferrit şekli üzerindeki etkisi.
- Durum 3: M3, M5: Y eksenli varyasyonunun etkisi.

Çizelge 6. Farklı ferrit şekilli dairesel trafo modelinin tanımı

Modeller	Nüve yapısı	Mesafe (mm)	Kalınlık (mm)	X*Y (mm ²)
1	Disk	84	1,4	
2	Disk	84	4,2	
3	5 parçalı ferrit nüve	84	4,2	10x24
4	5 parçalı ferrit nüve	84	1,4	10x24
5	5 parçalı ferrit nüve	84	1,4	10x24
6	5 parçalı ferrit nüve	84	1,4	5x24
7	5 parçalı ferrit nüve	84	1,4	5x24
8	10 parçalı ferrit nüve	84	1,4	5x24



Transformatör Modelleri

Şekil 9. Farklı ferrit şekillerine sahip sekiz dairesel transformatör modeli

- Durum 4: M3, M6: X eksen varyasyonunun etkisi.
- Durum 5: M3, M7: X ve Y eksen varyasyonunun etkisi.
- Durum 6: M7 ve M8: Ferrit dilim sayısının etkisi.

Genel ölçüm sonuçları Çizelge 7’de özetlenmiştir.

Çizelge 7. Farklı ferrit şekli, boşluk=90 mm dairesel bobin modelinin simülasyon sonuçları

Model	Kuplaj katsayısı	Ortak endüktans (nH)
1	0,012	128,9
2	0,0191	135,2
3	0,0131	140,1
4	0,0101	100,3
5	0,014	97,52
6	0,0091	77,16
7	0,0099	93,17
8	0,0011	82,01

Sonuçlar, 4.2 mm kalınlığındaki diski temsil eden M3'ün, diğer tüm şekillere kıyasla en yüksek bağlantı katsayısı ve karşılıklı endüktans değerine sahip olduğunu göstermektedir. Birinci ve ikinci karşılaştırma sonuçlarından anlaşılacağı gibi, daha yüksek bir kalınlık, kuplaj katsayısı ve karşılıklı endüktans değerlerinde bir gelişme anlamına gelir. Üçüncü, dördüncü ve beşinci karşılaştırmalara göre ferrit boyutunun x ve y eksenleri arasında küçültülmemesi tercih edilir. Son olarak, ferrit segmentinin sayısını artırmak, kuplaj katsayısını ve karşılıklı endüktans değerlerini artırır.

Bu analiz, konumun, transformatörün nüve yapısının ve ferritin boyutunun bağlantı üzerindeki etkisi hakkında bir fikir vermesi için yapılmıştır. Bu şekilde elde edilen sonuçlar, ferrit ilavesinin, sistemdeki ferritin yerleşimine bağlı olarak bağlantı katsayısını ve karşılıklı endüktansı artırabileceğini veya azaltabileceğini göstermektedir. Genel olarak, ferrit bu değerleri artırır. Bununla birlikte, ferrit materyalinin nüveye dahil edilmesi hem bir sistemdeki çekirdek kayıplarını hem de iletkenlerde alan modifikasyonu nedeniyle bakır kayıplarını artırır. Ayrıca, ferrit tasarım zorluğu ve sistem ağırlığı, bobin sistemi tasarlanırken dikkate alınması gereken kritik faktörlerdir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, manyetik rezonans kuplajlı kablosuz güç transferinin sisteminin tasarımı yapılmıştır. Öncelikle düşük kayıp kuplajlı özgün transformatör tasarlanmıştır. Tasarlanan transformatörün bobin yapısı bakır yüksek frekanstaki deri ve yakınlık etkilerini önlemek amacıyla litz telden oluşturulmuştur. Transformatörün manyetik nüve yapısında ferrit malzeme kullanılmıştır. Transformatörde kaçak akıları önlemek amacıyla nüvenin dış yüzeylerine alüminyum levhalar kullanılarak manyetik akı sargılar arasında kalmaya zorlanmış, bu sayede enerji kayıpları en aza indirgenmek amaçlanmıştır. Tasarlanan transformatör seri-paralel rezonans topolojisi ile bir benzetim devresi yardımı ile test edilmiştir. KGT sistem eşleşmesini ve verimini etkileyen parametreler incelenmiştir. Verici bobin ile alıcı bobin arasındaki bağlantı katsayısı ve

karşılıklı endüktans, SEY'e dayanarak çözüm gerçekleştiren Ansys-Maxwell kullanılarak hava boşluğunu ve yatay yanlış hizalamayı ifade eden z mesafesi ve y mesafesinin bir fonksiyonu olarak analiz edilmiştir. Sistem verimliliğini artırmak için ferrit ve alüminyum levhaların kullanılmasının uygun olduğu görülmüştür. Ferrit şekillerin sisteme etkisi ve yerleşimi gerçekleştirilmiştir.

5. KAYNAKLAR

1. Kurs, A., Karalis, A., Moffatt, R.J., Joannopoulos, D.P., Soljacic, M., 2007. Wireless Power Transfer Via Strongly Coupled Magnetic Resonances. *Science*, 317(5834), 83–86.
2. Cederlöf, M., 2012. Inductive Charging of Electrical Vehicles, Stockholm: KTH, School of Electrical Engineering (EES), Electromagnetic Engineering. Master Thesis.
3. Karalis, A., Joannopoulos, D.P., Soljacic, M., 2008. Efficient Wireless Non-radiative Mid-range Energy Transfer. *Annals of Physics*, 323(1), 34–48.
4. Ağçal, A., Bekiroğlu, N., Özçira, S., 2018. Manyetik Rezonanslı Kuplaj ile Kablosuz Enerji Transferinde Hizalanmış ve Hizalanmamış Durumların Limitlerinin İncelenmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30(3), 67-73.
5. Zhang, R., Ho, C.K., 2013. MIMO Broadcasting for Simultaneous Wireless Information and Power Transfer. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 12(5), 1989-2001.
6. Miller, J.M., Onar, O.C., Chinthavali, M., 2014. Primary-side Power Flow Control of Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Charging. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 3(1), 147-162.
7. Aditya, K., Williamson, S.S., 2018. Design Guidelines to Avoid Bifurcation in a Series-series Compensated Inductive Power Transfer System. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(5), 3973-3982.
8. Li, S., Mi, C.C., 2015. Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications. In

- IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 3(1), 4-17.
9. Lassioui, A., Fadil, H.E., Belhaj F.Z., Rachid, A., 2018. Battery Charger for Electric Vehicles Based ICPT and CPT-A State of the Art, Renewable Energies. Power Systems & Green Inclusive Economy (REPS-GIE), Casablanca, 1-6.
 10. Ahn, S., Hwang, C., Park, H.H. 2014. Optimized Shield Design for Reduction of EMF from Wireless Power Transfer Systems. IEICE Electronics Express, 11(2), 20130930–20130930.
 11. Dolara, A., Leva, Longo, Castelli-Dezza S.M.F., Mauri, M., 2017. Coil Design and Magnetic Shielding of a Resonant Wireless Power Transfer System for Electric Vehicle Battery Charging. IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), San Diego, CA, 200-205.
 12. Kim, S., Park, H., Kim, J., Ahn, S., 2014. Design and Analysis of a Resonant Reactive Shield for a Wireless Power Electric Vehicle. in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 62(4), 1057-1066.
 13. Ongayo, D., Hanif, M., 2015. Comparison of Circular and Rectangular Coil Transformer Parameters for Wireless Power Transfer Based on Finite Element Analysis. IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC), Fortaleza, 1-6.
 14. Patil, D., McDonough, M.K., Miller, J.M., Fahimi, B., Balsara, P.T., 2018 Wireless Power Transfer for Vehicular Applications: Overview and Challenges. in IEEE Transactions on Transportation Electrification, 4(1), 3-37.
 15. Mude, K.N., 2015. Wireless Power Transfer for Electric Vehicle. Ph.D Thesis, University of Padova, Italy, March.
 16. Lassioui, A., Fadil, H.E., Rachid, A., Belhaj, F.Z., Tarkany, O., Bajit, A., 2018. Characteristics Analysis of Wireless Power Transfer System for Electric Vehicle Charging Applications. International Symposium on Advanced Electrical and Communication Technologies (ISAECT), Rabat, Morocco, 1-6.
 17. Duarte, R.M., Felic, G.K., 2014. Analysis of the Coupling Coefficient Inductive Energy Transfer Systems. Active Passive Electron. Compon, 2014, 1-6.
 18. Mohammad, M., Choi, S., Islam, Z., Kwak S., Baek, J., 2017. Core Design and Optimization for Better Misalignment Tolerance and Higher Range of Wireless Charging of PHEV. In IEEE Transactions on Transportation Electrification, 3(2), 445-453.

Assessment of Biogas and Syngas Potentials of Cotton Stalks in Turkey

Nazife Işık HAYKIR*¹ ORCID 0000-0002-6657-9663

¹Ankara University, Faculty of Engineering, Department of Energy Engineering, Ankara

Geliş tarihi: 02.08.2021

Kabul tarihi: 21.03.2022

Atıf şekli/ How to cite: HAYKIR, N.I., (2022). Assessment of Biogas and Syngas Potentials of Cotton Stalks in Turkey. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37(1), 221-235.

Abstract

Turkey, being one of the largest producers of world cotton production, utilizes biomass through direct incineration for electricity generation which accounts for 1.5% of the total electricity generation in Turkey. In this work, biogas potential of cotton stalks was assessed to present a foresight to the future biomass valorizations in the country. Cotton stalks harvested in six cities located in the Southeastern, Aegean and Çukurova regions of Turkey were evaluated and discussed with respect to their potential in electricity generation and the invoiced electricity consumption in 2019. These cities were found to yield 15.6 million tonnes of cotton stalks with an annual 3.1 billion m³ of methane and also, 12 TWh of electricity generation that could meet almost 32% of the electricity demand. For Southeastern region, region's electricity consumption could be met by 99.5% with the anaerobic digestion of cotton stalks (9 million tonnes/yr). Methane potentials of cotton stalks were compared with the corresponding syngas yields and lower percentages were obtained for syngas. Anaerobic digestion and thermochemical conversion of agricultural residues, being proposed as energy strategies in this study, could help to accelerate the activities on bioenergy share in Turkey.

Keywords: Cotton stalks, Anaerobic digestion, Biogas, Methane, Syngas

Türkiye’de Pamuk Saplarının Biyogaz ve Sentez Gazı Potansiyelinin Değerlendirilmesi

Öz

Dünya pamuk üretiminin en büyük üreticilerinden biri olan Türkiye, biyokütleyi doğrudan yakma yoluyla kullanmaktadır ve biyokütlenin elektrik üretimine katkısı %1,5'tir. Bu çalışmada, ülkenin gelecekteki biyokütle temelli uygulamalarına bir öngörü sunmak için pamuk saplarının biyogaz potansiyeli değerlendirilmiştir. Türkiye'nin Güneydoğu, Ege ve Çukurova bölgelerinde yer alan altı ilde hasat edilen pamuk sapları, biyokütlenin elektrik üretim potansiyeli ve 2019 yılı faturalı elektrik tüketimi açısından değerlendirilerek tartışılmıştır. Bu illere ait toplam pamuk sapı üretim kapasitesi 15.6 milyon ton olmakla birlikte, söz konusu biyokütlenin yıllık 3,1 milyar m³ metan gazı ve ayrıca elektrik talebinin yaklaşık

*Corresponding author (Sorumlu yazar): Nazife Işık HAYKIR, haykir@ankara.edu.tr

%32'sini karşılayabilecek 12 TWh elektrik üretimine karşılık geldiği bulunmuştur. Güneydoğu Anadolu bölgesi için pamuk saplarının anaerobik çürütülmesiyle (9 milyon ton/yıl) bölgenin elektrik tüketiminin %99,5'inin karşılanabileceği tespit edilmiştir. Pamuk saplarının metan potansiyelleri, karşılık gelen sentez gazı verimleri ile karşılaştırılmış ve sentez gazı için daha düşük yüzdeler elde edilmiştir. Bu çalışmada enerji stratejisi olarak önerilen tarımsal kalıntıların anaerobik çürütülmesi ve termokimyasal dönüşümü, Türkiye'de biyoenerji üretimine yönelik faaliyetlerin hızlandırılmasına yardımcı olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Pamuk sapları, Anaerobik çürütme, Biyogaz, Metan, Sentez gazı

1. INTRODUCTION

1.1. Electricity Production and its Dependency on Biomass

Worldwide interest in biogas production has been receiving attention as a low cost and clean technology promoting biocircular economy. Biogas not only combats with climate change and alleviate fossil fuel dependency, but it also promotes growth in rural areas, generation of organic fertilizer and management of wastes [1]. Biogas is ecofriendly and recognized to introduce healthy cooking replacements for developing regions. It has been reported that roughly 4 million people lost their lives due to unproductive use of solid fuels for cooking purposes [2]. Recently, International Energy Agency (IEA) has reported that global emissions have risen by roughly 2% from December 2019 to December 2020. CO₂ concentration in the atmosphere was reported 410 ppm in year 2018 as 33 billion tons of CO₂ emission took place in the same year [3]. This steady increase will continue as the destructive human activities will remain over the next centuries. For this reason, proposing sustainable strategies such as biogas generation for certain energy needs is noteworthy.

According to International Energy Agency (IEA), world gross electricity generation was 3.9% higher in 2018 than it was in 2017 [4]. In 2018, total production was mainly met by combustible fuels with 66.3%. As shown in Table 1, electricity production by coal and natural gas respectively constituted 38% and 23% of the total as the leading sources in 2018. On the other hand, the share by biofuels and waste corresponded to only 2.4% (IEA, 2020). For Europe, the largest

percentage shared by the nuclear, natural gas and coal (Table 2). Biofuels including primary solid fuels, biogas and liquid biofuels totally made up about 4.1% of the electricity generation [5]. Biogas corresponded to 1.6% of the total generation in Europe [5] where installation of 18202 biogas plants were made according to European Biomass Association [6]. Based on the mentioned data, more effort is required to increase the role of biofuels and make biogas generation more prevalent.

In Turkey, electricity production is heavily dependent on coal, natural gas and hydropower as indicated in Table 3. Biomass as a fuel used in direct combustion provided about 1% of the electricity production in 2018 according to EPDK data [7]. Turkey represents a remarkable capacity for agricultural and livestock residues [8]. Valorization of these residues through anaerobic digestion for the production of biogas for its utilization in combined heat and power (CHP) plants rather than aiming direct combustion can lead to significant reductions in greenhouse gas (GHG) emissions [9]. Based on Turkey's Renewable Energy Action Plan (REAP), the use of renewable energy for electricity generation will be motivated by adding 34 GW of hydropower, 20GW of wind energy, 5 GW of solar energy, 1GW of geothermal and 1 GW of biomass energy by 2023. Thus, 30% of the electricity consumption will be met by renewable sources by 2023 [10]. According to Bioenergy and Food Security (BEFS) Assessment for Turkey, reaching 1 GW increase in biomass energy can be realized through the combination of biogas production by 768 MW and direct combustion by 244 MW from selected biomass within CHP concept [11].

Table 1. World gross electricity production by source in year, 2018 [4]

Source	Share (%)
Coal	38
Oil	2.9
Natural gas	23
Hydropower	16.2
Geothermal and tidal	0.5
Wind	4.8
Solar	2.1
Biofuels and waste	2.4

Table 2. Electricity generation by source in year, 2018 in Europe [5]

Source	Share (%)
Nuclear	22.4
Coal	21.3
Natural gas	19.6
Hydropower	16.1
Wind	9.7
Biofuels	4.1
Solar PV	3.2
Oil	1.4
Waste	1.3
Geothermal	0.48
Tide	0.01
Solar Thermal	0.12
Other sources	0.14

Table 3. Electricity production in Turkey in year 2018 [7]

Source	Electricity production in 2018 (GWh)	Share (%)
Hydropower	59.902,04	20.24
Coal (imported)	62.988,54	21.28
Natural gas	91.639,14	30.96
Lignite	45.087,00	15.23
Wind	19.827,00	6.70
Geothermal	7.430,98	2.51
Biomass	3.240,96	1.09
Bituminous coal	2.844,58	0.96
Asphaltite	2.328,50	0.79
Fuel oil	328,89	0.11
Solar	385,86	0.13
Diesel oil	0,22	0.00
Total	296.003,71	100.00

1.2. Cotton and Cotton Stalks Production

White gold of the agriculture, cotton is a popular industrial crop grown widely across the world and used for the fabrication of natural comfortable clothes that keeps the consumers skin dry in the summer and warm in the winter. It is important for ensuring employment particularly, for textile and agricultural industries [12]. Its production typically requires subtropical and seasonally dry tropical areas in both the northern and southern hemispheres [13]. Cotton plant is fundamentally made up of bolls and straws. The seeds of the plant are found in the bolls where fibers grow. The straw section which left on the field right after the harvest are also referred to as cotton stalks. Cotton stalks are principally the straw, emptied balls, and leaves. Normally, these residues, are buried or burned for the following seeding. However, this brings the release of harmful gases and deteriorates soil fertility [12].

According to International Cotton Advisory Committee (ICAC), total cotton production was reported to be 26.4 million tonnes and the average yield was 775 kg/ha for 2019-2020 season. Since the Asian economies have a significant leading potential regarding cotton consumption, consumption was around 26.2 million tonnes [14]. Turkey is one of the major cotton producers in the world and has the 6th place following India, United States and China. Based on the ICAC's report for March 2020, Turkey also has a significant place considering the area planted and the yield (Table 4). Turkey shares 3.1% the total production. Besides, it is ranked 4th with respect to cotton consumption which is 6.3% of the total world consumption with 1.63 million tonnes. USA falls behind China and India in the total production [15].

As shown in Table 4, the top producer India appears at the bottom of the list with respect to cotton fiber yield and produce cotton yields lower

Table 4. World cotton production for 2019/2020 season [15]

	Countries	Fiber cotton production (000 metric tonnes)	Cotton plantation area (000 ha)	Fiber cotton yields (kg/ha)
1	India	6000	12700	472
2	China	5800	3300	1758
3	USA	4310	4177	1032
4	Brazil	2850	1622	1718
5	Pakistan	1320	2631	513
6	Turkey	815	520	1567
7	Uzbekistan	640	900	712
8	Mexico	369	224	1644
9	Argentina	358	485	737
10	Turkmenistan	307	545	564

than the average. On the other hand, Turkey is one of the best countries with the highest amount of cotton production per unit area. Regarding the position of Turkey with respect to the production and the yield and employment in the cotton industry which is around 2 million people [16], considering by-products of this industrial crop for bioenergy production is as important strategy.

According to TUIK 2018 data, the regions that possess the largest cotton production are

Southeastern region including Şanlıurfa and Diyarbakır, Aegean region including Aydın and İzmir, and Çukurova region including Adana and Hatay (Table 5). These cities hold the largest production being 85% of the total in 2018. Cotton stalks are among the most abundant crop residues (spreaded in the field) in Turkey. Total production capacity of cotton stalks is around 18.5 million tonnes annually [11, 14]. Şanlıurfa is in charge of almost 50% of the total cotton stalks production (Table 6).

Table 5. Cotton and cotton stalks production by regions in 2018 [11,14]

Order	Regions	Cotton (raw) production (tonnes)	Cotton stalk (tonnes)*
1	Southeastern region including Şanlıurfa and Diyarbakır	1272150	9134037
2	Aegean region including Aydın and İzmir	436900	3136942
3	Çukurova region including Hatay and Adana	462600	3321468
	Others	398350	2860153
	Total	2570000	18452600

*Calculated according to Equation 1

Table 6. Top cotton stalk producer cities in Turkey [11,14]

Order	Cities	Production capacity (tonnes)
1	Şanlıurfa	7381040
2	Aydın	2029786
3	Hatay	1845260
4	Diyarbakır	1752997
5	Adana	1476208
6	İzmir	1107156

1.3. Anaerobic Digestion of Biomass and Effect of Biomass Pretreatment

Biogas production takes place by the anaerobic degradation of organic matter mainly into a gaseous mixture and residual solids [17]. During this anaerobic process, four successive steps, hydrolysis, acidogenesis, acetogenesis and methanogenesis are performed by the interaction of distinct microorganisms [18]. The gaseous product includes primarily methane (50-70%) referred to as biomethane and carbon dioxide (10-50%), and some minor gases such as hydrogen sulfide and ammonium in the range of parts per million to a few percent [19].

A wide plethora of raw materials has been offered as energy sources for the production of methane, ranging from municipal waste to food waste and from lignocellulosic biomass to animal manure [20]. Although each possesses the advantage of being abundant and low cost, certain structural restrictions impede the efficient digestion of biomass. For lignocellulosic biomass such as agricultural and forest residues, energy crops, paper wastes and municipal waste [21] which is principally made up of cellulose, hemicellulose and lignin, recalcitrance is the barrier for the release of fermentable sugars [21]. Recalcitrance is the combination of factors such as heterogeneity, cellulose crystallinity and the presence of lignin [22,24]. These factors lead to low biogas yields and slow degradation rates from lignocellulosic feedstocks. For this reason, pretreatment should be conducted to make simple sugars, amino acids and fatty acids easily accessible for the microbial community. Physical strategies such as comminution in combination with chemical pretreatments such as dilute acid pretreatment or alkaline pretreatment could work well for many lignocellulosic feedstocks [25]. Previously, rice straw pretreated via acids, hydrochloric acid, oxalic acid, acetic acid and citric acid at dilute concentrations was used for biogas production.

While oxalic acid gave the best performance concerning enzymatic yields, the highest biogas production was achieved through anaerobic digestion of oxalic and citric acid pretreated biomass [26]. In another study, alkaline pretreatment of birch with 7 wt.% NaOH at 100°C resulted in 50% higher methane production compared to methane production from untreated birch [27]. Ionic liquid (IL) pretreatment has been also explored concerning its effect on biogas production from lignocelluloses. 1-butyl-3-methylimidazolium chloride (BMIMCl), which partially delignified rice straw and disrupted biomass crystallinity upon pretreatment at 140°C for 2 h, improved methane yields from biomass; 233 ml CH₄/g biomass was obtained [28]. Another work successfully demonstrated the impact of mechanical, chemical, and enzymatic pretreatments on biogas production from switchgrass. Performing different combinations of pretreatments, such as grinding-alkaline pretreatment-autoclaving and mulching-enzymatic-alkaline pretreatment resulted in diverse methane yields [29] since there have been principally reductions in the lignin and hemicellulose content of the biomass, disruptions in the crystallinity of cellulose, and an increase in the available surface area.

In this work, methane and electricity generation potentials of cotton stalks were explored for certain regions of Turkey; Southeastern, Aegean, and Çukurova regions. Cotton stalks were initially investigated concerning their composition and evaluated through their proximate and ultimate analysis. Calculations were performed on the basis of the experimental results and the eventual findings were interpreted by considering the electrical potentials of the biomass that meet the latest consumptions of the regions and the cities. Accordingly, this study aims to present a biorefinery perspective to one of the most recognized agricultural wastes of Turkey; cotton stalks.

Table 7. Studies on biogas production from cotton stalks

Cotton stalks particle size	Pretreatment method	CH ₄ yield (mL/g volatile solids)	Benefits of pretreatment	
< 0.45 mm	Not applicable	70.2	-	[42]
<2 mm	Thermophilic microbial consortium that hydrolyze cellulase and hemicellulose for 10 days	111	122.4% higher methane yield relative to untreated biomass	[43]
<3 mm	Hydrothermal pretreatments using hot water liquid, dilute ammonia, recycled liquid from anaerobic digestion	241.6	4.58-fold increase relative to untreated biomass	[44]
<1.19 mm	Acid pretreatment with H ₂ SO ₄ at 0.9% (w/w), 100°C for 60 min Alkaline pretreatment with NaOH at 4% ($W_{NaOH}/W_{biomass}$)	449 (co-digested with swine manure at a mixing ratio of 50:50)	31.7% higher methane yield relative to untreated biomass	[45]
1-3 mm	Steam pretreatment with supercritical CO ₂ at 100 bar, 180°C for 140 min Organosolv-supercritical CO ₂ at 100 bar, 180°C for 140 min	177	Reduction in optimal digestion time from 30 days to 20 days with pretreatment 29% higher methane yield relative to untreated biomass	[46]
<1 mm	Pretreatments for 24 h with KOH at 1.5-6% (w/w), NaOH at 1.5-6% (w/w), Ca(OH) ₂ at 1-4% (w/w) (w/w), Alkali hydrogen peroxide at 1-4% (w/w), H ₂ SO ₄ at 1-4% (w/w), H ₃ PO ₄ at 1-4% (w/w), Steam explosion at 0.9-1.5 MPa for 5-15 min	192	254.3% higher methane yield relative to untreated biomass	[47]
<1 mm	Pretreatment with 4% (w/w) ammonia solution at 80°C for 12 h	218.9	2.71-fold increase relative to untreated biomass	[48]

2. MATERIALS AND METHODS

Cotton stalks derived from the cotton plant (*Gossypium hirsutum*) were obtained from Aegean region of Turkey, air dried and ground with a hammer mill (APEX 314-HP 5.5). They were then sieved to a particle size less than 1 mm. Sulfuric

acid, calcium carbonate, ethanol and the standards; D-glucose and D-xylose were purchased from Merck.

Elemental analysis of the cotton stalks was conducted with LECO, CHNS-932 Elementary Chemical Analyzer. Hitachi Simultaneous

Thermogravimetric Analyzer (TGA) STA 7300 was used to perform the proximate analysis of the biomass (Figure 1). Ash, extractive compositional content of the biomass were measured using the analytical procedures published by the National Renewable Energy Laboratory in Colorado, USA. (NREL) [49-51]. The related data are given in Table 8.

Annual cotton stalks production was calculated according to the following formula,

$$\text{Cotton stalks} \left(\frac{\text{tonnes}}{\text{year}} \right) = \text{Cotton production} \left(\frac{\text{tonnes}}{\text{year}} \right) \times \text{RCR} \quad (1)$$

RCR, residue to crop ratio, is defined as the amount of residues generated to the amount of crop produced and it is dimensionless. This residue yield is a measure of the value of the crop used. For cotton stalk, RCR was obtained as 7.18 according to the literature data collected and verified by General Directorate of Agricultural Research of Turkey (TAGEM). This value is quite high when compared to those determined for cereals (0.10-1.41), fruits (0.2-0.55) and oil seeds (0.1-1.29) indicating the potential of cotton stalks for bioenergy and biomaterials applications [11].

Methane yields were calculated using the Buswell equation (Equation 2) and Equation 3,

$$C_n H_a O_b N_c + \left(n - \frac{a}{4} - \frac{b}{2} - \frac{3c}{4} \right) H_2O \rightarrow \left(\frac{n}{2} + \frac{a}{8} - \frac{b}{4} - \frac{3c}{4} \right) CH_4 + \left(\frac{n}{2} - \frac{a}{8} + \frac{b}{4} + \frac{3c}{4} \right) CO_2 + cNH_3 \quad (2)$$

$$\text{MMY} \left(\text{mL}(\text{g VS})^{-1} \right) = \frac{22.4 \times 1000 \times \left(\frac{n}{2} + \frac{a}{8} - \frac{b}{4} - \frac{3c}{4} \right)}{12n + a + 16b + 14c} \times (1 - \% \text{lignin} - \% \text{ash}) \quad (3)$$

where MMY is the maximum methane yield per unit mass volatile solids in the biomass, %lignin and %ash are the percentage lignin and ash

contents in the biomass. n, a, b, c are coefficients in the empirical formula of cotton stalks determined from the elemental analysis [47,52].

Gross calorific value of the biomass was determined accordingly,

$$\text{HHV}_{\text{biomass}} \left(\text{MJ kg}^{-1} \right) = \{33.5[C] + 142.3[H] - 15.4[O] - 14.5[N]\} \times 10^{-2} \quad (4)$$

where HHV is the higher heating value of cotton stalks per unit mass of biomass. The elements in the brackets

Table 8. Proximate, ultimate and compositional analysis of cotton stalks

Ultimate analysis (wt. %)	
Carbon	44.4
Hydrogen	5.70
Nitrogen	1.40
Sulfur	0
Oxygen ^a	48.5
Proximate analysis (wt. %)	
Total solids	92.9
Volatile solids (VS)	75.0
Fixed carbon (FC)	11.1
Ash	6.9
Empirical elemental formula	CH _{1.5} O _{0.8} N _{0.03}
Compositional analysis (%)	
Extractives	10.4
Cellulose	36.4
Hemicellulose	13.7
Lignin	25.5
Calorific value (MJ kg⁻¹)	
Higher heating value (HHV)	15.3
Lower heating value (LHV)	14.1

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Cotton Stalks Characterization

Table 8 shows the elemental, proximate and compositional analysis of cotton stalks. Accordingly, cotton stalks were found to possess a gross calorific value of 15.3 MJ kg⁻¹. The elemental formula of the biomass was determined as CH_{1.5}O_{0.8}N_{0.03}. Both the HHV and the elemental formula of cotton stalks were in accordance with

the previously reported literature work [36, 54, 47]. Cellulose, hemicellulose and lignin were found respectively as 36.4%, 13.7% and 25.5%. Percentages of volatile solids (75%) and fixed carbon (11.1%) were determined according to the

TGA analysis of biomass (Figure 1). Using Equation 2, maximum methane yield (MMY) of cotton stalks was determined as 271 mL/g VS which corresponded to 203 mL/g biomass.

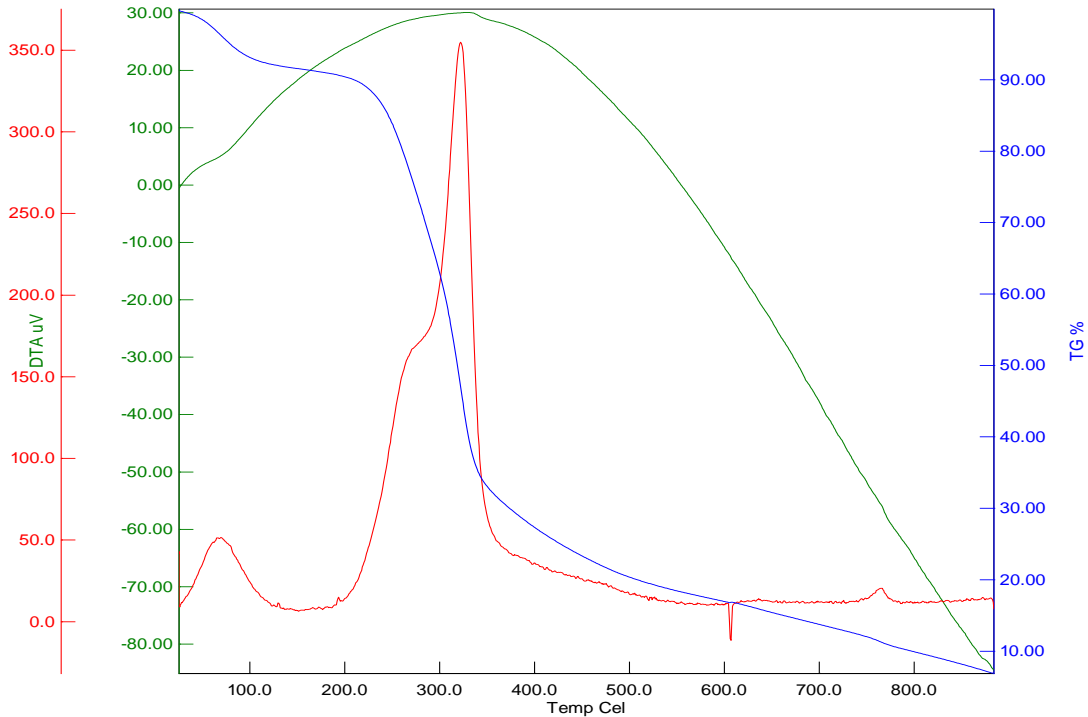


Figure 1. TGA analysis of cotton stalks

3.2. Anaerobic Digestion of Cotton Stalks

The maximum methane and electrical energy potential of six cities' possessing the largest capacity of cotton production were evaluated and presented in Table 9. Table 9 shows the cotton stalks production capacity, volumetric methane production from cotton stalks, electricity generation from methane and invoiced electricity consumption for year 2018. Electric efficiency was assumed as 40% [55] and used in the calculation of electricity generation in MWh for each city. According to the table, Şanlıurfa region contributes to cotton stalks production with 7.4 million tonnes/yr and methane production with 1.5 billion m³/yr. The corresponding electricity generation was found 5.8 TWh/yr which was

around 1.2-fold higher than Şanlıurfa's invoiced electricity consumption in 2019. Aydın located in the Aegean region comes after with roughly 2 million tonnes capacity. Aydın was found to generate 1.6 TWh of electricity from cotton stalks derived methane being 60% of the electricity utilization. Electricity generation from the Diyarbakir's cotton stalks production potential was found 54% of the invoiced electricity consumption. Regarding İzmir, which is the third-most populous city in Turkey and the largest in the Aegean region, the electricity generation by cotton stalks could only provide 5.7% savings. For İzmir potential sources, municipal waste and livestock manure can provide better electricity savings by biogas production. A previous study proposed a model for the management of these wastes by the

implementation of a municipality-owned centralized system constituting eight biogas plants and evaluated the feasibility of the model. Accordingly, the unit cost of electricity was determined as 10 \$ cent/kWh [56]. For İzmir, biogas production from cotton stalks could save only 27% for electricity consumption in commerce [7]. Regarding Çukurova region, roughly 33.4% and 32.3% savings were obtained for Adana and Hatay, respectively.

In total, cotton stalks were found to yield $3 \times 10^9 \text{ m}^3$ of methane annually and a corresponding electricity generation of around 12 TWh/yr. For Southeastern Anatolia region, electricity generated

from cotton stalks derived methane was calculated roughly as 7.2 TWh/yr. This potential can fulfill up to 35% of the electricity consumption in the entire region counting the energy demands of the cities, Gaziantep, Batman, Adıyaman, Siirt, Mardin, Kilis and Şırnak as well. Methane production from İzmir and Aydın's cotton stalks capacity was found to meet almost 13% of the entire region electricity consumption. Çukurova region including, Osmaniye and Mersin, reached around 21 TWh invoiced electricity consumption in 2019. Cotton stalks derived from Adana and Hatay were found capable serving roughly 12% of the total if being valorized for methane generation.

Table 9. Biogas potential of the major cotton producer cities in Turkey

Region/city	Cotton stalk production potential (tonnes/yr)	Methane production potential (m^3/yr)	Electricity generation potential (MWh/yr)	Invoiced electricity consumption (MWh/yr)	Demand met (%)
Southeastern region	9134037	1854209511	7253668	7292615	99.5
Şanlıurfa	7381040	1498351120	5861550	4696184	124.8
Diyarbakır	1752997	355858391	1392118	2596431	53.6
Aegean region	3136942	636799226	2491159	18209780	13.7
İzmir	1107156	224752668	879232	15511094	5.7
Aydın	2029786	412046558	1611926	2698686	59.7
Çukurova region	3321468	674258004	2637697	12812409	20.6
Adana	1476208	299670224	1172310	6754795	17.4
Hatay	1845260	374587780	1465387	4390056	33.4
Total	15592447	3165266741	12382523	38314804	32.3

3.3. Gasification of Cotton Stalks

Combustion of cotton stalks after harvesting is another option to use it as a source of energy. Energy density of cotton stalks being between 14.5-18.1 MJ/kg was found comparable to that of wood (17.4-18.6 MJ/kg). Direct incineration of cotton stalks has been reviewed in several works, pros and cons were put forward. Good burning efficiency was mentioned for cotton stalks and

longer burning time was related to the density of the biomass [57]. Although the ash content of biomass is much lower compared to coal, cotton stalks were found to possess 6-8% ash on dry basis which is a higher amount compared to some common agricultural residues, wheat straw and corn stover and also, wood dust [58]. Apparently, ash not only act as a component to lower the calorific value of the biomass but also creates issues of slagging and fouling causing heat transfer

limitations in the boilers [59]. Regarding the emissions contributing to atmospheric pollution, biomass combustion stands against climate change strategies. At this point, biomass gasification emerges as an important thermochemical route possessing several advantages over direct combustion. Production of syngas as an important versatile mid-product and the production of lower amounts of air pollutants are among significant benefits of biomass gasification. In gasification, biomass is subjected to temperatures around 600-900 °C or even elevated values in the presence of a gasifying agent (air, oxygen, steam, CO₂, or mixtures of these components) in which conversion to a mixture of gaseous products comprising mainly, carbon monoxide (CO), hydrogen (H₂), methane (CH₄) and carbon dioxide (CO₂), a solid product, char and a viscous liquid product, tar is performed [19]. The principal aim of this thermochemical process is to produce synthesis gas, in short, syngas, CO and H₂ which can be valorized into a wide plethora of products, chemicals, liquid fuels and H₂ to generate heat and power [60]. Heating value of syngas was reported to change between 10-15 MJ/m³ and 3-6 MJ/m³ in case of steam and air employed as the gasifying agents, respectively [61]. An earlier literature work reported the gasification of cotton stalks into syngas using a bubbling fluidized bed gasifier [62]. The calculations for this section was performed according to the product gas composition measured in the mentioned study (Table 10). Gasification temperature was 770°C and steam was used as the gasifying agent at 0.52 steam: fuel ratio ((kg/h)/(kg/h)). Based on the given composition and atomic species balances, biomass to syngas conversion yield was calculated as 1.73 m³ syngas/kg cotton stalks which was in accordance with the previously reported yields for a variety of lignocellulosic feedstocks such as rice husk, nut shell, pine and eucalyptus [63]. HHV of the syngas was calculated according to the given equation and found as 6.15 MJ/m³.

$$HHV_{\text{syngas}} = 12.745 \times \%H_2 + 12.63 \times \%CO + 39.819 \times \%CH_4 \quad (5)$$

Table 10. Composition of the product gas obtained after gasification of cotton stalks [62]

Product gas	Vol. %
CO	15.16
CO ₂	9.09
CH ₄	4.29
H ₂	23.18
O ₂	0.86
N ₂	47.44
HHV (MJ/m ³)	6.51
Cotton stalks to syngas conversion yield (m ³ /kg)	1.73

Assuming electric efficiency of 15% for a steam turbine, the electrical energy production from the combustion of the syngas derived upon cotton stalks gasification are given in Table 11. Accordingly, annual electricity generation from syngas was found much less compared to that obtained from biogas. Although higher volumes of gaseous products were obtained from cotton stalks through gasification, electrical energy potential were lower due to the lower HHV_{syngas} being almost one sixth HHV_{methane}. For Southeastern region, syngas was found to meet almost 59% of electricity demand with roughly 16 billion m³ of syngas potential. Besides, electricity generated from syngas in Aegean and Çukurova regions was approximately 8% and 12% of the electricity consumptions, respectively. For Aydın, cotton stalks derived syngas could meet almost 35% of the city's electricity demand.

Table 12 introduces a comparison between two processes from different perspectives. Although anaerobic digestion introduced a lower biomass to fuel conversion, 0.258 m³/kg, estimated electricity generation was almost 2-fold higher compared to the electrical energy provided by the syngas. Gasification does not necessitate chemical or biological pretreatments since ground raw materials can directly be transformed into value-added gaseous products in hours via thermochemical reactions. Despite entailing a biomass deconstruction step particularly for lignocellulosic feedstocks prior to degradation of the organic matter, anaerobic digestion provides an

efficient and clean source of energy for heating and cooking purposes at the household levels. For this reason, putting more research effort is important to motivate the installation of small and pilot scale digesters in certain regions of Turkey for the valorization of agricultural residues.

Table 11. Syngas potential of the major cotton producer cities in Turkey

Region/city	Cotton stalk production potential (tonnes/yr)	Syngas production potential (m ³ /yr)	Electricity generation potential (MWh/yr)	Invoiced electricity consumption (MWh/yr)	Demand met (%)
Southeastern region	9134037	15801884010	4286261	7292615	58.8
Şanlıurfa	7381040	12769199200	3463645	4696184	73.8
Diyarbakır	1752997	3032684810	822616	2596431	31.7
Aegean region	3136942	5426909660	1472049	18209780	8.1
İzmir	1107156	1915379880	519547	15511094	3.3
Aydın	2029786	3511529780	952502	2698686	35.3
Çukurova region	3321468	5746139640	1558640	12812409	12.2
Adana	1476208	2553839840	692729	6754795	10.3
Hatay	1845260	3192299800	865911	4390056	19.7
Total	15592447	26974933310	7316951	38314804	19.1

Table 12. Comparison of anaerobic digestion and gasification of cotton stalks

	Anaerobic digestion of cotton stalks	Gasification of cotton stalks
Total electricity generation (TWh/yr)	12	7.3
Fuel/biomass yield (m³/kg)	0.258 m ³ CH ₄ /kg biomass	1.73 m ³ syngas/kg biomass
HHV_{fuel} (MJ/m³)	39.819	6.51
Advantages	Requires moderate operation temperatures. Promotes development for rural areas. Generation of high-quality rich fertilizer. Co-digestion of nitrogen rich resources with cotton stalks can increase methane yields.	Requires shorter residence times. Syngas represents a significant platform for the production of liquid fuels, hydrogen and chemicals. Reduced environmental concerns and better efficiencies compared to direct incineration.
Disadvantages	Requires elaborate pretreatment techniques and longer residence times.	Requires gas cleaning. Elevated operation temperatures and pressures.

4. CONCLUSIONS

This work demonstrated the electrical energy potential of cotton stalks from six cities that hold the largest cotton and cotton stalks production capacities in Turkey. For Southeastern region

contributing to the biomass production with around 50%, significant savings were obtained. Electrical energy generation with 7.2 TWh/yr was found capable of meeting 35% of the region's entire electricity consumption. For Aydın being the second greatest cotton producer in Turkey, 60%

saving was achieved. These findings were significant to show the potentials of native energy sources of the country and encourage the implementation of bioenergy facilities.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

The author acknowledges the financial support from The Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) via project 116M444.

6. REFERENCES

1. Bhatia, R.K., Ramadoss, G., Jain A.K., Dhiman, R.K., Bhatia, S.K., Bhatt, A.K., 2020. Conversion of Waste Biomass into Gaseous Fuel: Present Status and Challenges in India, *BioEnergy Research* 13(4), 1046–1068.
2. World Health Organization (WHO), 2018. Household air Pollution and Health, <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health>, Erişim Tarihi: 13.4.2021.
3. International Energy Agency (IEA), 2020. Global CO₂ emissions in 2019, <https://www.iea.org/articles/global-co2-emissions-in-2019>, Erişim Tarihi: 13.4.2021.
4. International Energy Agency (IEA), 2020. Electricity Information: Overview, <https://www.iea.org/reports/electricity-information-overview>, Erişim Tarihi: 13.4.2021
5. International Energy Agency (IEA), 2018. Total primary energy supply in Europe, <https://www.iea.org/regions/europe>, Erişim Tarihi: 13.4.2021.
6. European Biogas Association (EBA), 2019. EBA Statistical Report 2019, <https://www.europeanbiogas.eu/eba-statistical-report-2019/>, Erişim Tarihi: 13.4.2021
7. Energy Market Regulatory Authority, 2018. Electricity market development report 2019, <http://epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-0-102/yillik-rapor-elektrik-piyasasi-gelisim-raporlari>, Erişim Tarihi: 13.4.2021.
8. Avcioglu, A., Onurbaş, Türker, U., 2012. Status and Potential of Biogas Energy from Animal Wastes in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(3), 1557–1561.
9. Lansche, J., Müller, J., 2012. Life Cycle Assessment of Energy Generation of Biogas Fed Combined Heat and Power Plants: Environmental Impact of Different Agricultural Substrates. *Engineering in Life Sciences*, 12(3), 313–320.
10. National Renewable Energy Action Plan (REAP) for Turkey, 2016, <https://rise.esmap.org/data/files/library/turkey/EE%20Pillar/EE1.1.pdf>, Erişim Tarihi: 13.4.2021
11. BEFS Assessment for Turkey. 2016, Sustainable Bioenergy Options from Crop and Livestock Residues, <http://www.fao.org/3/i6480e/i6480e.pdf>, Erişim Tarihi: 13.4.2021
12. Maiti, R., Kalam, A., Huda, S., Mandal, D., Arunakumari, C., Begum, S., 2020. Advances in Cotton Science Botany. Production, and Crop Improvement, CRC Press.
13. Bange, M., Baker J.T., Bauer P.J., Broughton, K.J., Constable, G.A., Luo, Q., Oosterhuis, D.M., Osanai, Y., Payton, P., Tissue, D.T., Reddy, K.R., Singh, B.K., 2016. Climate Change and Cotton Production in Modern Farming Systems. ICAC Review Articles on Cotton Production Research No. 6.
14. Ministry of Agriculture and Forestry of Turkey, 2019, Dünyada Pamuk, <https://www.tarimorman.gov.tr/BUGEM/Belgeler/MILLI%20TARIM/PAMUK%20ARALIK%20BÜLTE%20NI.pdf>, Erişim Tarihi: 13.4.2021
15. National Cotton Council (UPK) 2020, 2019 Yılı Pamuk Raporu, http://www.upk.org.tr/User_Files/editor/file/2019%20Pamuk%20Raporu.pdf, Erişim Tarihi: 13.4.2021
16. National Cotton Council (UPK) 2020, Turkey Country Report, http://www.upk.org.tr/User_Files/editor/file/Turkey%20Country%20Report-2019.pdf, Erişim Tarihi: 13.4.2021
17. Demirbas, A., Pehlivan, E., Altun, T., 2006. Potential Evolution of Turkish Agricultural Residues as Bio-gas, Bio-char and Bio-oil Sources. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31(5), 613–620.
18. Demirbas, A., Taylan, O., Kaya, D., 2016. Biogas Production from Municipal Sewage

- Sludge (MSS). *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 38(20), 3027–3033.
19. Molino, A., Nanna, F., Ding, Y., Bikson, B., Braccio, G., 2013. Biomethane Production by Anaerobic Digestion of Organic Waste. *Fuel*, 103, 1003–1009.
 20. Patinvoh, R.J., Osadolor, O.A., Chandolias, K., Horváth, I.S., Taherzadeh, M.J., 2017. Innovative Pretreatment Strategies for Biogas Production. *Bioresource Technology*, 224, 13–24.
 21. Hu, G., Heitmann, J., Rojas, O., 2008. Feedstock Pretreatment Strategies for Producing Ethanol from Wood, Bark, and Forest Residues. *BioResources*, 3(1), 270-294.
 22. Taherzadeh, M.J., Karimi, K., 2008. Pretreatment of Lignocellulosic Wastes to Improve Ethanol and Biogas Production: A Review. *International Journal of Molecular Sciences*, 9(9), 1621–1651.
 23. Karimi, K., Taherzadeh, M.J., 2016. A Critical Review on Analysis in Pretreatment of Lignocelluloses: Degree of Polymerization, Adsorption/Desorption, and Accessibility. *Bioresource Technology*, 203, 348–356.
 24. Chang, V.S., Holtzapple, M.T., 2000. Fundamental Factors Affecting Biomass Enzymatic Reactivity. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 84–86(1–9), 5–37.
 25. Patinvoh, R.J., Osadolor, O.A., Chandolias, K., Horváth, I.S., Taherzadeh, M.J., 2017. Innovative Pretreatment Strategies for Biogas Production. *Bioresource Technology*, 224, 13–24.
 26. Amnuaycheewa, P., Hengaroonprasan, R., Rattanaporn, K., Kirdponpattara, S., Cheenkachorn, K., Sriariyanun, M., 2016. Enhancing Enzymatic Hydrolysis and Biogas Production from Rice Straw by Pretreatment with Organic Acids. *Industrial Crops and Products*, 87, 247–254.
 27. Mirahmadi, K., Kabir, M., Jeihanipour, A., Karimi, K., Taherzadeh, M., 2010. Alkaline Pretreatment of Spruce and Birch to Improve Bioethanol and Biogas Production. *Bioresources*, 5, 928-938.
 28. Gao, J., Chen, L., Ke Yuan, Huang, H., Yan, Zo., 2013. Ionic Liquid Pretreatment to Enhance the Anaerobic Digestion of Lignocellulosic Biomass. *Bioresource Technology*, 150, 352–358.
 29. Frigon, J.C., Mehta, P., Guiot, S., 2012. Impact of Mechanical, Chemical and Enzymatic Pre-Treatments on the Methane Yield from the Anaerobic Digestion of Switchgrass. *Biomass and Bioenergy*, 36, 1–11.
 30. YunYan, M., WanLi, X., GuangMu, T., MeiYing, G., QuanHong, X., 2017. Effect of Cotton Stalk Biochar Application on Soil Microflora of Continuous Cotton Cropping Under Use of Antagonistic Actinomycetes. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 25(3), 400-409.
 31. El Saeidy, E., 2004. Technological Fundamentals of Briquetting Cotton Stalks as a Biofuel, Doctoral Dissertation. Humboldt Universität zu Berlin, Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät.
 32. Reddy, N., Yang, Y., 2009. Properties and Potential Applications of Natural Cellulose Fibers from the Bark of Cotton Stalks. *Bioresource Technology*, 100(14), 3563–3569.
 33. Haykir, N.I., Bakir, U., 2013. Ionic Liquid Pretreatment Allows Utilization of High Substrate Loadings in Enzymatic Hydrolysis of Biomass to Produce Ethanol from Cotton Stalks. *Industrial Crops and Products*, 51, 408–414.
 34. Semerci, I., Guler, F., 2018. Protic Ionic Liquids as Effective Agents for Pretreatment of Cotton Stalks at High Biomass Loading. *Industrial Crops and Products*, 125, 588-595.
 35. Wu, M., Jia-Kun, L., Zhong-Ya, Y., Bo, W., Xue-Ming, Z., Feng, X., Run-Cang, S., 2016. Efficient Recovery and Structural Characterization of Lignin from Cotton Stalks Based on a Biorefinery Process Using a γ -Valerolactone/Water System. *RSC Advances*, 6(8), 6196–6204.
 36. Kantarelis, E., Zabaniotou, A., 2009. Valorization of Cotton Stalks by Fast Pyrolysis and Fixed Bed Air Gasification for Syngas Production as Precursor of Second Generation Biofuels and Sustainable Agriculture. *Bioresource Technology*, 100(2), 942–947.
 37. Keshav, P.K., Shaik, N., Koti, S., Linga, V.R., 2016. Bioconversion of Alkali Delignified

- Cotton Stalks Using Two-stage Dilute Acid Hydrolysis and Fermentation of Detoxified Hydrolysate into Ethanol. *Industrial Crops and Products*, 91, 323–331.
38. Wang, M., Zhou, D., Wang, Y., Wei, S., Yang, W., Kuang, M., Ma, L., Fang, D., Xu, S., Du S., 2016. Bioethanol Production from Cotton Stalk: A Comparative Study of Various Pretreatments. *Fuel*, 184, 527–532.
39. Li, Q., Yang, M., Wang, D., Li, W., Wu Y., Zhang, Y., Xing, J., Su, Z., 2010. Efficient Conversion of Crop Stalk Wastes into Succinic Acid Production by *Actinobacillus Succinogenes*. *Bioresource Technology*, 101(9), 3292–3294.
40. Zheng, J., Yi, W., Wang, N., 2008. Bio-Oil Production from Cotton Stalk. *Energy Conversion and Management*, 49(6), 1724–1730.
41. Rincon, L., Puri, M., Kojakovic, A., Maltoglou, I., 2019. The Contribution of Sustainable Bioenergy to Renewable Electricity Generation in Turkey: Evidence Based Policy from an Integrated Energy and Agriculture Approach. *Energy Policy*, 130, 69–88.
42. Zhang, H., Khalid, H., Wanwu, Li, He, H., Liu, G., Chen, C., 2018. Employing Response Surface Methodology (RSM) to Improve Methane Production from Cotton Stalk. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(8), 7618–7624.
43. Yuan, X., Ma, L., Wen, B., Zhou, D., Kuang, M., Yang, W., Cui, Z., 2016. Enhancing Anaerobic Digestion of Cotton Stalks by Pretreatment with a Microbial Consortium (MC1). *Bioresource Technology*, 207, 293–301.
44. Mehrdad, A., Sheng, K., Gharibi, A., 2012. Technical Assessment of Bioenergy Recovery from Cotton Stalks Through Anaerobic Digestion Process and the Effects of Inexpensive Pre-Treatments. *Applied Energy*, 93, 251–260.
45. Cheng, Xi-Yu, Zhong, C., 2014. Effects of Feed to Inoculum Ratio, Co-Digestion, and Pretreatment on Biogas Production from Anaerobic Digestion of Cotton Stalk. *Energy & Fuels*, 28(5), 3157–3166.
46. Alafif, R., Wendland, M., Amon, T., Pfeifer, C., 2020. Supercritical Carbon Dioxide Enhanced Pre-treatment of Cotton Stalks for Methane Production. *Energy*, 194, 116903.
47. Zhang, H., Ning, Z., Khalid, H., Zhang, R., Liu, G., Chen C., 2018. Enhancement of Methane Production from Cotton stalks Using Different Pretreatment Techniques. *Scientific Reports*, 8(1), 3463.
48. Ghasemian, M., Zilouei, H., Asadinezhad, A., 2016. Enhanced Biogas and Biohydrogen Production from Cotton Plant Wastes Using Alkaline Pretreatment. *Energy & Fuels*, 30(12), 10484–10493.
49. Sluiter, A., Hames, B., Ruiz, R.O., Scarlata, C., Sluiter, J., Templeton, D., 2008a. Determination of Ash in Biomass. *Natl. Renew. Energy Lab.* 1-6.
50. Sluiter, A., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J., Templeton, D., 2008b. Determination of Extractives in Biomass. NREL TP-510-42619. Laboratory Analytical Procedure (LAP).
51. Sluiter, A., Hames, B., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J., Templeton, D., Crocker, D., 2008c. Determination of Structural Carbohydrates and Lignin in Biomass. in: *Laboratory Analytical Procedure (LAP)*. National Renewable Energy Laboratory.
52. Buswell, A.M., 1957. *Fundamentals of Anaerobic Treatment of Organic Wastes. Sewage and Industrial Wastes*, 29(6), 717–721.
53. Demirbaş, A., 1997. Calculation of Higher Heating Values of Biomass Fuels. *Fuel*, 76(5), 431–434.
54. Kanca, A., 2020. Investigation on Pyrolysis and Combustion Characteristics of Low Quality Lignite. Cotton Waste, and Their Blends by TGA-FTIR, *Fuel* 263: 116517.
55. Şenol, H., Zenk, H., 2020. Determination of the Biogas Potential in Cities with Hazelnut Production and Examination of Potential Energy Savings in Turkey. *Fuel*, 270, 117577.
56. Yalcinkaya, S., 2020. A Spatial Modeling Approach for Siting, Sizing and Economic Assessment of Centralized Biogas Plants in Organic Waste Management. *Journal of Cleaner Production*, 255, 120040.
57. Hamawand, I., Gary, S., Pam, P., Sayan, C., Talal, Y., Guangnan, C., Saman, S., Saddam,

- A.L., John, B., Joshua, H., 2016. Bioenergy from Cotton Industry Wastes: A Review and Potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66, 435–448.
58. Danish, M., Naqvi, M., Farooq, U., Naqvi, S., 2015. Characterization of South Asian Agricultural Residues for Potential Utilization in Future 'Energy Mix'. *Energy Procedia*, 75, 2974–2980.
59. Afif, R.Al., Pfeifer, C., Pröll, T., 2020. *Advances in Cotton Research*.
60. Peng, W.X., Wang, L.S., Mirzaee, M., Ahmadi, H., Esfahani, M.J., Fremaux, S., 2017. Hydrogen and Syngas Production by Catalytic Biomass Gasification. *Energy Conversion and Management*, 135, 270–273.
61. Wang, L., Weller, C.L., Jones, D.D., Hanna, M.A., 2008. Contemporary Issues in Thermal Gasification of Biomass and its Application to Electricity and Fuel Production. *Biomass and Bioenergy*, 32(7), 573–581.
62. Karatas, H., Olgun, H., Akgun, F., 2013. Experimental Results of Gasification of Cotton Stalks and Hazelnut Shell in a Bubbling Fluidized Bed Gasifier under Air and Steam Atmospheres. *Fuel*, 112, 494–501.
63. Gañan, J., Al-Kassir, A., Miranda, A.B., Turegano, J., Correia, S., Cuerda, E.M., 2005. Energy Production by Means of Gasification Process of Residuals Sourced in Extremadura (Spain). *Renewable Energy*, 30(11), 1759–1769.

Bir Konfeksiyon İşletmesinde Seçilmiş Ergonomik Risklerin İş Sağlığı ve Güvenliği Kapsamında Analizi ve Risk Değerlendirmesi

Serkan GÜLERER¹ ORCID 0000-0002-1012-7449

Emel Ceyhun SABİR^{*2} ORCID 0000-0002-2385-1524

¹Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalı, Adana

²Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Adana

Geliş tarihi: 07.07.2021

Kabul tarihi: 21.03.2022

Atıf şekli/ How to cite: GÜLERER, S., SABİR, E.C., (2022). Bir Konfeksiyon İşletmesinde Seçilmiş Ergonomik Risklerin İş Sağlığı ve Güvenliği Kapsamında Analizi ve Risk Değerlendirmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37(1), 237-248.

Öz

Bu çalışmada, seçilmiş büyük ölçekli, dış giyim alanında üretim yapan bir hazır giyim işletmesinde ergonomi ve iş kazalarının oluşmasına ait seçilmiş ergonomik riskler değerlendirilmiştir. Bu ergonomik riskler; ağır kaldırma, uzun süre çalışma, yoğun odaklanma, tekrarlayan hareketler ve uzanma, çekme, dönme vb. hareketler olmak üzere beş açıdan tanımlanmıştır. Risk değerlendirme için Fine Kinney metodu kullanılmıştır. Çalışmada hazır giyim işletmelerinde Ayakta durma ve elle taşıma gibi faaliyetlerin çok fazla olduğu ve bu nedenle uygunsuz çalışma duruşları, gerilme, zorlanma gibi büyük ergonomik risklerin olduğu tespit edilmiş ve çözüm önerileri ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: İş sağlığı ve güvenliği, Konfeksiyon işletmesi, Ergonomi, Ergonomik risk değerlendirme, Fine Kinney metodu

Analysis and Risk Assessment of Selected Ergonomic Risks in the Apparel Industry in the Context of Occupational Health and Safety

Abstract

The ergonomics and chosen ergonomic risks connected to the occurrence of occupational accidents in a large-scale ready-made garment manufacturing company were assessed in this study. Heavy lifting, lengthy work, intense focus, repeated actions and reaching, pushing, twisting, and other ergonomic dangers are divided into five categories. For risk evaluation in the study, the Fine Kinney approach was employed. In the study, it was decided that there are too many activities in ready-made clothes firms, such as standing and carrying by hand, and that there are significant ergonomic concerns, such as incorrect working postures, stress, and strain, and that solutions have been proposed.

Keywords: Occupational health and safety, Garment mill, Ergonomics, Ergonomic risks, Fine Kinney method

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Emel Ceyhun SABİR, emelc@cu.edu.tr

1. GİRİŞ

Endüstride insanın fizyolojik özelliklerine uygun çalışma koşullarının sağlanabilmesinde sağlık-hastalık-iş arasında bir ilişki olduğu düşüncesi ön plana çıkmış ve bu alanda yapılan çalışmalar hız kazanmıştır. Ergonomi; çalışanların sağlığının korunmasını ön planda tutarak işin daha verimli yapılabilmesine katkıda bulunan bir disiplindir. Ergonomik olarak iş organizasyonu, iş güvenliği, iş planlaması yapılmış bir iş ortamının çalışanların iş sağlığı, güvenliği ve verimliliğine direk etkileri vardır [1,2].

İşyerlerinde insan sağlığı ve güvenliğini etkileyebilecek birçok risk faktörü vardır. Fiziksel risk faktörlerinde tekrarlanma, uygunsuz duruş, statik duruş, aşırı güç, sıkışma gibi kavramlar yer almaktadır [3,4]. Bu faktörlerden en önemlilerinden birisi de ergonomik risk faktörleridir. Ergonomik risk faktörleri kendi içerisinde ağır kaldırma, tekrarlayan hareketler, uzanma, çekme, dönme vb. hareketler, uzun süre çalışma ve yoğun odaklanma, uygunsuz çalışma duruşları olmak üzere 5'e ayrılmıştır [4]. Bu faktörler doğrudan rahatsızlıkları tetiklemektedir ve rahatsızlıkların fizyolojik süreci ile bağlantısı bulunmaktadır [5].

Çalışma hayatında ergonomik açıdan fiziksel risklere maruz kalmaya bağlı olarak kas-iskelet sistemi hastalıkları çalışanlarda sıkça görülen sağlık sorunudur. Çalışanlarda görünen, iş kaynaklı ağrı, hareket kısıtlanması ve sakatlıklarla seyredabilen, öncelikle kaslar, tendonlar, ligamanlar ve diskler gibi yumuşak dokuları etkileyen kas iskelet sistemi rahatsızlıkları iş ile ilgili kas iskelet sistemi rahatsızlığı olarak kabul edilmektedir. Günümüzde meslek rahatsızlıkları içerisinde bunlar oldukça önemli bir paya sahiptir [6]. Kas-iskelet sistemi rahatsızlıkları, uzun süreli şiddetli ağrı ve sakatlığın en yaygın nedenidir ve önemli sağlık ve sosyal destek maliyetlerine yol açar [7]. Mesleki kas iskelet sistemi hastalıkları beli, boynu ve üst ekstremiteleri (elleri, dirsekleri ve omuzları) etkiler. Sıklıkla bel ve el tutulur.

Omuz-Boyun Hastalıkları: Rotator cuff hastalığı, biceps tendiniti, servikal spondilozis, vb. omuz-boyun hastalıkları olarak daha çok görülür.

Üst Ekstremitte Hastalıkları: El-kol titreşimine bağlı hastalık, kol, dirsek ve bilekte tendinit, sinir sıkışmasına bağlı tablolar, karpal tünel sendromu vb. hastalıklardır.

Bel ve Alt Ekstremitte Hastalıkları: Bel ağrısı, disk hernisi vb. hastalıklardır.

Bu çalışmanın amacı, bir hazır giyim işletmesinde çalışanların mesleki kas ve iskelet sistemi rahatsızlıklarından kaynaklı ergonomik risk faktörlerini tespit etmek, işgücü ve zaman kaybını minimum düzeye indirerek verimi arttırmaya yönelik öneriler vermektir. Konfeksiyon işletmelerinde yapılan bir anket çalışmasında, işletmelerin çalışanlarına İSG eğitimleri verdikleri, işyerlerinde yapılan sıkı denetleme ve periyodik kontrollerin etkisi ile çalışanların ISG konusunda oldukça bilgili olduğu ve ISG farkındalıklarının yeterince geliştiği saptanmıştır [8]. Konfeksiyon sektörünün emek yoğun olması dolayısıyla bu sektörde insan faktörünün üretim verimliliği doğrudan etkilenmektedir [9]. Konfeksiyon işletmelerinde kas iskelet sistemlerinin en az düzeyde etkilenmesini sağlamak amacıyla iş etüdü gibi verimlilik artırma çalışmaları yapılmaktadır [10,11]. Konfeksiyon işçileri kesim, dikim, ütü vb. gibi pekçok emek gerektiren işlerde çalışırlar. Bu çalışanlar işleri boyunca tekrarlayan işler yaparken işle ilgili kazalar, ergonomik zorlanmalar, kimyasal maddelere maruz kalma gibi birçok sorunla karşılaşmaktadırlar [12]. Çalışmada büyük ölçekli bir hazır giyim işletmesi insan ve makine potansiyeli yönünden incelenmiş ve proseslerde maruz kalınan ergonomik riskler, görev tanımlarına göre, tespit edilmiştir. Riskler, tehlike durumuna göre sınırlandırılmış ve devamında risk analizi yapılarak riskleri azaltacak/ortadan kaldıracak önlemler sonuçlar ortaya konulmuştur.

2. MATERYAL VE METOD

2.1. Materyal

Bu çalışmada etüt edilen iş, yaklaşık 350 çalışanı olan seçilmiş bir hazır giyim işletmesinin tüm üretim aşamalarındaki ergonomik risklerin tespiti. İşletmede günlük çalışma süresi 9 saat 30 dk ve haftada 6 gün olup, ayda toplam 24 iş günü çalışılır. Hazır giyim işletmesinde, ergonomik riskleri en aza indirmek ve iyileştirme-geliştirme yapılmasına karar verebilmek için, işletmede kumaşın depoya gelmesinden üretilen ürünlerin sevkiyat aşamasına kadar tüm prosesler ergonomik riskler açısından incelenmiştir. Seçilen hazır giyim işletmesinde üretim iş akış şeması Şekil 1'de verilmiştir. İşletme pazarlama, planlama, kesim, dikim ve son işlemler şeklinde üretim akışına sahiptir.

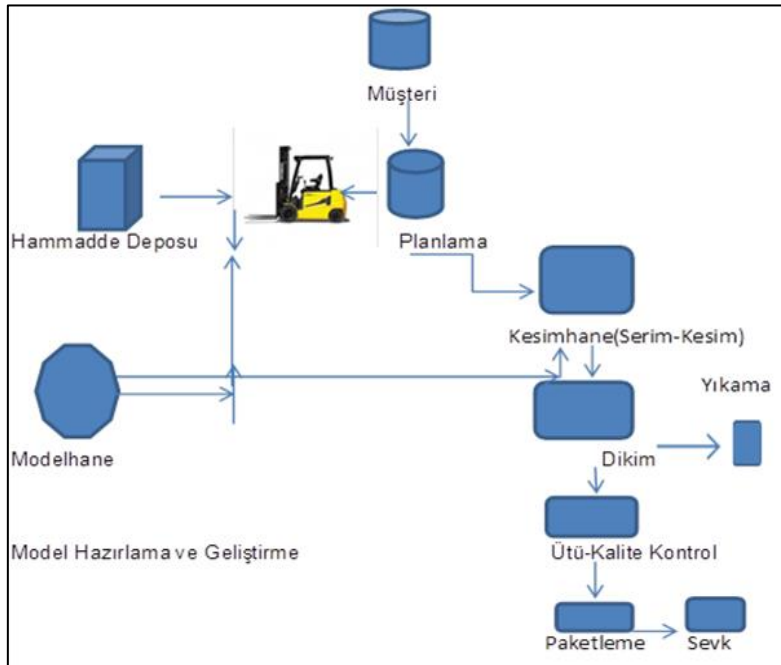
2.2. Metod

İş akışına göre her aşamada (istasyonda) bütün çalışanların ergonomik durumu ele alınmıştır.

Bunun için risk değerlendirmesi yapılmıştır. Bu çalışmada riskin tanımı ağır kaldırma, uzun süre çalışma, yoğun odaklanma, tekrarlayan hareketler ve uzanma, çekme, dönme vb. hareketler olmak üzere beş açıdan tanımlanmıştır. Risk değerlendirmesinde yöntem olarak Fine Kinney metodu kullanılmıştır.

Fine-Kinney yöntemi sadece kaza olma olasılığı ve sıklığını değil risk altındaki kişilerin tehlikeli alanda bulunma yani tehlikeye maruz kalma sıklığını da dikkate alır. Bu nedenle diğer çok kullanılan matris risk analizi yöntemine göre daha güvenilir ve doğru analiz yapma imkanı tanır. Fine Kinney yönteminde risklerin derecelendirilmesi, risklerin ortaya çıkma olasılığı, tehlikeye maruz kalma sıklığı ve oluşturduğu etkinin sayısal değerlerinin çarpımı ile yapılır. Yani kısaca risk; olasılık, sıklık ve etki değerlerinin çarpımıdır [13].

Fine-Kinney risk değerlendirme tablosu Çizelge 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Hazır giyim işletmesinde üretim iş akış şeması

Çizelge 1. Fine Kinney risk değerlendirme tablosu [13]

OLASILIK	AÇIKLAMA	FREKANS / SIKLIK	AÇIKLAMA	ŞİDDET	AÇIKLAMA	RİSK DEĞERİ	RİSK DEĞERLENDİRME SONUCU
10	Kabul Edilemez Risk	10	1 saatte birkaç defa	100	Birden fazla ölümlü kaza	$R \geq 400$	İş durdurulmalı, hemen önlem alınmalı / YÜKSEK RİSK
6	Ciddi Risk	6	Günde 1 veya birkaç defa	40	Öldürücü kaza	$200 \leq R < 400$	Çok önemli, aksiyon planına alınmalı / CİDDİ RİSK
3	Önemli Risk	3	Haftada 1 veya birkaç defa	15	Kalıcı hasar, iş kaybı	$70 \leq R < 200$	Önemli, aksiyon planına alınmalı, takip edilmeli / TAKİP, EK KONTROL
1	Düşük Katlanılabilir Risk	2	Ayda 1 veya birkaç defa	7	Önemli hasar, dış ilkyardım	$20 \leq R < 70$	Aksiyon planına alınmalı, gözetim altında tutulmalı / GÖZETİM
0,5	Anlamsız Önemsiz	1	Yılda birkaç defa	3	Küçük hasar, dahili ilkyardım	$R < 20$	Öncelikli değil, aksiyon planına alınmayabilir / ÖNEMSİZ RİSK
0,2	Beklenmez	0,5	Yılda 1 veya daha seyrek	1	Ucuz atlatma		

DEĞERLENDİRME TABLOSU						RİSK DERECELENDİRME				ARTIK RİSK DERECELENDİRME							
No	Bölüm	Faaliyet	Tehlike ve Tehlike Kaynağı	Risk	Etkilenecek Kişiler	Mevcut Durum	Olasılık(O)	Şiddet(S)	Frekans(F)	RDS	Alınması Gereken Önlem	Sorumlu	Termin	Olasılık(O)	Şiddet(S)	Frekans(F)	RDS
1																	
2																	
3																	

3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Etüt edilen iş, hazır giyim işletmesinde tüm üretim aşamalarında gerçekleşen faaliyetlerin iş sağlığı ve güvenliği kapsamında, ergonomik yönden risk değerlendirmesidir. Bu iş için seçilen hazır giyim işletmesinde kumaş depo, kesimhane, dikimhane, ütü-paketleme ve yıkama olmak üzere 5 birim (ana proses) bulunmaktadır. İşletmedeki birimler için iş akış şeması oluşturularak süreçler, mevcut durum etüt çalışması ile, analiz edilmiştir. Bu bölümde, hazır giyim işletmelerinde ergonomik açıdan yüksek riskli olan kesimhane ve yıkama bölümünde ergonomik riskin tespiti yapılarak Fine Kinney metodu ile risk değerlendirilmesi

yapılmıştır. Elde edilen veriler çizelgeler halinde sunularak yorumlanmıştır.

3.1. Kumaş Depo Bölümüne ait Araştırma Bulguları ve Risk Değerlendirmesi

Kumaş depo bölümünde bütün alt işlemlere ait ergonomik risklerin tespiti yapılarak Fine Kinney metodu ile risk değerlendirilmesi yapılmıştır. Kumaş depo bölümünde kumaşın depoya sevki anında çalışanın vücut konumu ve vücudun etkilenen bölgesi Çizelge 2’de verilmiştir. Fine Kinney metodu ile yapılan kumaş depo bölümünde ana işlemlerin ergonomik risk değerlendirme tablosu Çizelge 3’de verilmiştir.

3.2. Kesimhane Birimine Ait Araştırma Bulguları ve Risk Değerlendirmesi

Kesimhane bölümünde bütün alt işlemlere ait ergonomik risklerin tespiti yapılarak Fine Kinney metodu ile risk değerlendirilmesi yapılmıştır. Kesimhane bölümünde kumaş rulosunu taşıma anında çalışanın vücut konumu ve vücudun etkilenen bölgesi Çizelge 4’de verilmiştir. Fine Kinney metodu ile yapılan kesimhane bölümünde ana işlemlerin ergonomik risk değerlendirme tablosu Çizelge 5’de verilmiştir.

3.3. Dikimhane Bölümüne Ait Araştırma Bulguları ve Risk Değerlendirmesi

Dikimhane bölümünde bütün alt işlemlere ait ergonomik risklerin tespiti yapılarak Fine Kinney Metodu ile risk değerlendirilmesi yapılmıştır. Dikimhane bölümünde ürünün dikilmesi anında çalışanın vücut konumu ve vücudun etkilenen bölgesi Çizelge 6’da verilmiştir. Fine Kinney Metodu dikimhane bölümünde ana işlemlerin ergonomik risk değerlendirme tablosu Çizelge 7’de verilmiştir.




3.4. Ütü ve Paketleme Bölümüne Ait Araştırma Bulguları ve Risk Değerlendirmesi

Ütü ve paketleme bölümünde bütün alt işlemlere ait ergonomik risklerin tespiti yapılarak Fine Kinney metodu ile risk değerlendirilmesi yapılmıştır. Ütü ve paketleme bölümünde kolileme anında çalışanın vücut konumu ve vücudun etkilenen bölgesi Çizelge 8’de verilmiştir. Fine Kinney Metodu ütü ve paketleme bölümünde ana işlemlerin ergonomik risk değerlendirme tablosu Çizelge 9’da verilmiştir.

3.5. Yıkama Birimine Ait Araştırma Bulguları ve Risk Değerlendirmesi

Yıkama biriminde bütün alt işlemlere ait ergonomik risklerin tespiti yapılarak Fine Kinney metodu ile risk değerlendirilmesi yapılmıştır. Yıkama bölümünde ürünün sıkma makinasına atılıp sıkılması anında çalışanın vücut konumu ve vücudun etkilenen bölgesi Çizelge 10’da verilmiştir. Fine Kinney Metodu kesimhane bölümünde ana işlemlerin ergonomik risk değerlendirme tablosu Çizelge 11’de verilmiştir.




Çizelge 2. Kumaş depo bölümünde kumaşın depoya sevkî anında vücut konumu-vücutta etkilenen bölge etüt formu

Ana işlem yeri	Alt işlem	Seçilmiş hazır giyim işletmesinden doğrudan gözlem yoluyla alınan örnek görüntüler		
		a)	b)	c)
1) Kumaş Depo	Araçtan kumaş indirip depoya sevkî			
İş anında vücut konumu		Ayakta durma Gerilme	Ayakta durma Uygunsuz çalışma duruşları Gerilme, zorlanma	Ayakta durma Uygunsuz çalışma duruşları Gerilme, zorlanma
Vücutta etkilenen bölge		Bel ağrısı Bel fıtığı ve Sinir sıkışması	Bel ağrısı, Bel fıtığı ve Sinir sıkışması	Bel ağrısı Bel fıtığı ve Sinir sıkışması

Çizelge 3. Kumaş depo bölümünde ana işlemlerin ergonomik risk değerlendirme tablosu

NO	DEĞERLENDİRME TABLOSU				RISK DERECELENDİRME				Alınması Gereken Önlem	Sorumlu	Termin	ARTIK RISK DERECELENDİRME					
	Bölüm	Faaliyet	Tehlike ve Tehlike Kaynağı	Risk	Mevcut Durum	Etkilenecek Kişiler	Olasılık(O)	Şiddet(S)				Frekans(F)	RD	Olasılık(O)	Şiddet(S)	Frekans(F)	RD
1	Kesimhaneye Çalışma Alanları	Kumaş rulosunu taşıma	Kumaş rulosunu taşıma	Bel ağrısı, disk hernisi	Kumaş rulolar el ile kaldırılarak taşınıp, indirilmektedir.	Çalışanlar	3	15	6	270	Kumaş rulolarının kaldırma işleminin kaldırma letme ekipmanlarıyla yapılması.	İşveren	İvedilikte	1	15	2	30
2	Kesimhaneye Çalışma Alanları	Pastal serimi esnasında uygunsuz çalışma duruşları, uzanma, çekme, dönme vb. hareketler	Pastal serimi esnasında uygunsuz çalışma duruşları, uzanma, çekme, dönme vb. hareketler	Ayak ve bacakta rahatsızlık, varis, bel fıtığı, sinir sıkışması,	Pastal serimi el ile yapılmaktadır.	Çalışanlar	3	7	6	126	Pastal seriminin otomatik pastal serim makinasıyla yapılması.	İşveren	İvedilikte	1	7	3	21
3	Kesimhaneye Çalışma Alanları	Kumaşların elektrikli motor veya makasla kesimi sırasında uygunsuz çalışma duruşları, Uzanma, çekme, dönme vb. hareketler	Kumaşların elektrikli motor veya makasla kesimi sırasında uygunsuz çalışma duruşları, Uzanma, çekme, dönme vb. hareketler	Kol, dirsek ve bilekte tendinit, sinir sıkışması, bel fıtığı	Elektrikli motorla kesim yapılırken aşırı uzanma, dönme vb. hareketler yapılmaktadır.	Çalışanlar	6	7	6	252	Elektrikli motorla kesimin uzanmaya gerek kalmayacak şekilde belirli alanda yapılması ve çalışanlara bu konuda eğitimlerin verilmesi.	İşveren	İvedilikte	1	7	3	21
4	Kesimhaneye Çalışma Alanları	Kumaşlara tela yapıştırmak ve metolamak	Kumaşlara tela yapıştırmak ve metolamak	Tekrarlayan hareketler, Uzun süre çalışma	Tela yapıştırırken ergonomik olmayan sandalye üzerinde uzun süre çalışılmaktadır.	Çalışanlar	3	3	6	54	Tela yapıştırırken oturtulan seviyenin tela işleminin yapıldığı seviyede ve ergonomik olması gerekmektedir. Uzun süre tela yapıştırma işlemlerinde çalışanların zaman dilimlerinde değiştirilmesi.	İşveren	İvedilikte	1	3	2	6

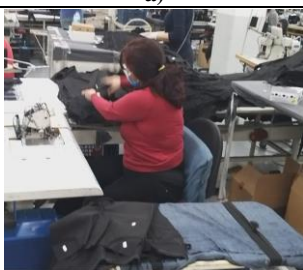


Çizelge 4. Kesimhanede kumaş rulosunu taşıma anında vücut konumu-vücutta etkilenen bölge etüt formu

Ana işlem yeri	Alt işlem	Seçilmiş hazır giyim işletmesinden doğrudan gözlem yoluyla alınan örnek görüntüler		
2) Kesimhaneye	Kumaş rulosunu taşıma	a)	b)	c)
				
		Uygunsuz çalışma duruşları Gerilme, zorlanma Tekrarlayan hareketler	Uygunsuz çalışma duruşları	Ağır kaldırma Gerilme, zorlanma Tekrarlayan hareketler
İş anında vücut konumu				
Vücutta etkilenen bölge		Bel ağrısı Bel fıtığı Sinir sıkışması	Bel ağrısı Bel fıtığı Sinir sıkışması	Ayak ve bacakta rahatsızlık Bel fıtığı Sinir sıkışması

Çizelge 5. Kesimhane bölümünde ana işlemlerin ergonomik risk değerlendirme tablosu

NO	DEĞERLENDİRME TABLOSU				RISK DERECELENDİRME				Alınması Gereken Önlem	Sorumlu	Termin	ARTIK RISK DERECELENDİRME				
	Bölüm	Faaliyet	Tehlike ve Tehlike Kaynağı	Risk	Mevcut Durum	Etkilenecek Kişiler	Olasılık(O)	Şiddet(Ş)				Frekans(F)	RD	Olasılık(O)	Şiddet(Ş)	Frekans(F)
1	Kesimhane	Çalışma Alanları	Kumaş rulosunu taşıma	Bel ağrısı, disk hernisi	Kumaş rulolan el ile kaldırılarak taşınıp, indirilmektedir.	Çalışanlar	3	15	6	270	İşveren	İvedilikte	1	15	2	30
2	Kesimhane	Çalışma Alanları	Pastal serimi esnasında uygunsuz çalışma duruşları, uzanma, çekme, dönme vb. hareketler	Ayak ve bacakta rahatsızlık, varis, bel fıtığı, sinir sıkışması,	Pastal serimi el ile yapılmaktadır.	Çalışanlar	3	7	6	126	İşveren	İvedilikte	1	7	3	21
3	Kesimhane	Çalışma Alanları	Kumaşların elektrikli motor veya makasla kesimi sırasında uygunsuz çalışma duruşları, Uzanma, çekme, dönme vb. hareketler	Kol, dirsek ve bilekte tendinit, sinir sıkışması, bel fıtığı	Elektrikli motorla kesim yapılırken aşırı uzanma, dönme vb. hareketler yapılmaktadır.	Çalışanlar	6	7	6	252	İşveren	İvedilikte	1	7	3	21
4	Kesimhane	Çalışma Alanları	Kumaşlara tela yapıştırmak ve metolamak	Tekrarlayan hareketler, Uzun süre çalışma	Tela yapıştırırken ergonomik olmayan sandalye üzerinde uzun süre çalışılmaktadır.	Çalışanlar	3	3	6	54	İşveren	İvedilikte	1	3	2	6



Çizelge 6. Mevcut durum dikimhanede ürünün dikilmesi anında vücut konumu-vücutta etkilenen bölge etüt formu

Ana işlem yeri	Alt işlem	Seçilmiş hazır giyim işletmesinden doğrudan gözlem yoluyla alınan örnek görüntüler		
Dikimhanede Ana İşlemler	Ürünün dikilmesi	a)	b)	c)
				
		Uzun süre çalışma Yoğun odaklanma Uzanma, çekme, dönme vb. hareketler	Tekrarlayan hareketler Uygunuz çalışma duruşları Uzanma, çekme, dönme vb. hareketler	Ayakta durma Tekrarlayan hareketler
İş anında vücut konumu				
Vücutta etkilenen bölge				
	Rotator cuff hastalığı Disk aşınmaları	Bel ağrıları Servikal spondiloz	Disk aşınmaları Ayak ve bacakta rahatsızlık	

Çizelge 7. Dikimhane bölümünde ana işlemlerin ergonomik risk değerlendirme tablosu

DEĞERLENDİRME TABLOSU				RISK DERECELENDİRME				ARTIK RISK DERECELENDİRME									
No	Bölüm	Faaliyet	Tehlike ve Tehlike Kaynağı	Risk	Mevcut Durum	Etkilenecek Kişiler	Olasılık(O)	Şiddet(S)	Frekans(F)	RDS	Alınması Gereken Önlem	Sorumlu	Termin	Olasılık(O)	Şiddet(S)	Frekans(F)	RDS
1	Dikim	Çalışma alanları	Ürünü dikime alırken veya dikim aşamasında uzun süre çalışma ve yoğun odaklanma, tekrarlayan hareketler, uygunsuz çalışma duruşları, uzanma, çekme, dönme vb. hareketler	Ayak ve bacakta rahatsızlık Varis Bel ağrıları Disk aşınmaları	Ürün dikim esnasında elle öne ve yan tarafa belden eğilerek verilmektedir.	Çalışanlar	3	7	10	210	Makinalar arasında mesafenin kısa tutulması ve çalışanlara ergonomi eğitimi verilmesi.	İvcedilikle	03.03.2020	1	7	3	21
2	Dikim	Çalışma alanları	Kalite kontrol yapılırken uzun süre ayakta durma, tekrarlayan hareketler.	Ayak ve bacakta rahatsızlık Varis Bel ağrısı	Kalite kontrol yapılırken uzun süre ayakta durulmakta ve tekrarlayan hareketler yapılmaktadır.	Çalışanlar	3	3	6	54	Çalışanın kalite kontrol yaparken ürüne çok uzanmaması için ürünün kısa mesafede olacak şekilde bulundurulması. Çalışanlara ergonomi eğitimi verilmesi.	İşveren	İvcedilikle	1	3	2	6
3	Dikim	Çalışma alanları	Ürünün pakete sevki esnasında genilme, zorlanma ve tekrarlayan hareketler.	Bel ağrısı Bel fitiği Sinir sıkışması	Ürünün sevki yapılırken 4 tekerli araçla itilip kuvvet uygulayarak götürülmektedir.	Çalışanlar	3	15	6	270	Ürünü taşıırken belden kuvvet vererek araç itilmemeli veya çekilmemeli. Kollardan kuvvet verilerek araç ilerletilmeli. Çalışanlara ergonomi eğitimi verilmelidir.	İşveren	İvcedilikle	1	15	2	30




Çizelge 8. Ütü ve paketleme bölümünde kolileme anında vücut konumu-vücutta etkilenen bölge etüt formu

Ana İşlem Yeri	Alt İşlem	Seçilmiş hazır giyim işletmesinden doğrudan gözlem yoluyla alınan örnek görüntüler		
4) Ütü ve Paketleme Ana İşlemler	Kolileme	a)	b)	c)
				
İş anında vücut konumu		Tekrarlayan hareketler Ayakta durma	Tekrarlayan hareketler Uzanma, çekme, dönme vb. Hareketler	Ayakta durma Uzun süre çalışma
Vücutta etkilenen bölge		Ayak ve bacakta rahatsızlık Bel ağrıları Biceps tendinit hastalığı	Disk aşınmaları Rotator cuff hastalığı	Ayak ve bacakta rahatsızlık Bel ağrısı

Çizelge 9. Ütü ve paketleme bölümünde ana işlemlerin ergonomik risk değerlendirme tablosu

Ütü ve paketleme Çalışma alanları	Ayak ve bacakta rahatsızlık, varis, bel ağrıları, disk aşınmaları	Ayakta uzun süre tekrarlayan hareketlerle yoğun bir şekilde ütöleme yapılmaktadır.	Çalışanlar	3	7	10	210	Çalışanlara ergonomi eğitimi verilmesi. Uzun süre aynı tekrarlayan hareketler yapıldığı için belli aralıklarda çalışanları dinlendirme. Çalışanlar arasında sirkülasyon yapılması.	İşveren İvedilikle	1	7	6	42	
Ütü ve paketleme Çalışma alanları	Uzun süre ayakta durma, tekrarlayan hareketler	Ayak ve bacakta rahatsızlık, varis, bel ağrısı	Kalite kontrol ve aksesuar takımı yapılırken uzun süre ayakta durulmakta ve tekrarlayan hareketler yapılmaktadır.	Çalışanlar	3	3	10	90	Çalışanlara ergonomi eğitimi verilmesi. Belli aralıklarda çalışanların dinlendirilmesi. Çalışanlar arasında sirkülasyon yapılması.	İşveren İvedilikle	1	3	6	18
Ütü ve paketleme Çalışma alanları	Uzun süre çalışma ve yoğun odaklanma, Tekrarlayan hareketler	Ayak ve bacakta rahatsızlık, varis,	Ürünleri katlama ve poşetleme işlemi ayakta ve yoğun olarak uzun süre çalışma olarak yapılmaktadır.	Çalışanlar	3	3	10	90	Çalışanlara ergonomi eğitimi verilmesi. Belli aralıklarda çalışanların dinlendirilmesi. Çalışanlar arasında sirkülasyon yapılması.	İşveren İvedilikle	1	3	6	18
Ütü ve paketleme Çalışma alanları	Tekrarlayan hareketler, Uygunsuz çalışma duruşları, Uzanma, çekme, dönme vb. hareketler	Ayak ve bacakta rahatsızlık, Varis, Bel ağrıları, disk aşınmaları, Biceps tendinit hastalığı	Ürünleri kolleme işlemi elle ve ayakta uzun süre uygunsuz çalışma duruşu olacak şekilde ve kollenen üründe elle taşıma yaparak palete dizilmektedir.	Çalışanlar	3	7	10	210	Kolleme yaparken ön ve yan tarafa aşırı derecede belden eğilerek uzanılmamalı. Koliyi palete taşıma işlemi elle değil transpalet ile yapılmalıdır.	İşveren İvedilikle	1	7	6	42

Çizelge 10. Yıkama bölümünde ürünün sıkama makinasına atılması anında vücut konumu-vücutta etkilenen bölge etüt formu

Ana işlem yeri	Alt işlem	Seçilmiş hazır giyim işletmesinden doğrudan gözlem yoluyla alınan örnek görüntüler		
5) Yıkamada Ana İşlemler	Ürünün sıkama makinasına atılıp sıkılması	a)	b)	c)
				
		Ayakta durma, Uzanma, çekme, dönme vb. hareketler	Ayakta durma, Uzanma, çekme, dönme vb. hareketler	Ayakta durma, Uzanma, çekme, dönme vb. hareketler
		Rotator cuff hastalığı Bel ağrıları	Bel ağrıları, Biceps tendinit hastalığı	Rotator cuff hastalığı Servikal spondiloz

Çizelge 11. Yıkama bölümünde ana işlemlerin ergonomik risk değerlendirme tablosu

O.N	Bölüm	Faaliyet	Tehlike ve Tehlike Kaynağı	Risk	Mevcut Durum	Etkilenecek Kısıtlar	RİSK DERECELENDİRME				Alınması Gereken Önlem	Sorumlu	Termin	ARTIK RİSK DERECELENDİRME			
							Olasılık(O)	Şiddet(\$)	Frekans(F)	RD				Olasılık(O)	Şiddet(\$)	Frekans(F)	RD
1	Yıkama Çalışma Alanları		Tekrarlayan hareketler , uygunsuz çalışma duruşları, uzanma, çekme, dönme vb. hareketler	Rotator cuff hastalığı, Bel ağrılan, disk aşınmaları,	Ürün yıkama makinasına atılırken ayakta ve el ile el arabasından alınıp yıkama makinasına atılmaktadır.	Çalışanlar	3	15	6	270	Ürünün taşındığı arabanın daha yüksek seviyede olacak şekilde monte edilmesi. Bu şekilde çalışanın eğilme ve kalkma hareketinin minimum düzeye indirilmesi.	İşveren	İvedilikte	1	15	3	45
2	Yıkama Çalışma Alanları		Tekrarlayan hareketler , uygunsuz çalışma duruşları, uzanma, çekme, dönme vb. hareketler	Rotator cuff hastalığı, Bel ağrılan, disk aşınmaları,	Ürün sıkma makinasına atılırken ayakta ve el ile el arabasından alınıp sıkma makinasına atılmaktadır	Çalışanlar	3	15	6	270	Ürünün taşındığı arabanın daha yüksek seviyede olacak şekilde monte edilmesi ve vücuda daha yakın mesafede olacak şekilde çalışılarak eğilme ve kalkma hareketinin minimum düzeye indirilmesi.	İşveren	İvedilikte	1	15	3	45
3	Yıkama Çalışma Alanları		Tekrarlayan hareketler , uygunsuz çalışma duruşları, uzanma, çekme, dönme vb. hareketler	Rotator cuff hastalığı, Bel ağrılan, disk aşınmaları,	Ürün kurutma makinasına atılırken ayakta ve el ile el arabasından alınıp kurutma makinasına atılmaktadır.	Çalışanlar	3	15	6	270	Ürünün taşındığı arabanın daha yüksek seviyede olacak şekilde monte edilmesi. Bu şekilde çalışanın eğilme ve kalkma hareketinin minimum düzeye indirilmesi.	İşveren	İvedilikte	1	15	3	45
4	Yıkama Çalışma Alanları		Uzun süre ayakta durma, tekrarlayan hareketler, kötü postür	Ayak ve bacadaki rahatsızlık, varis, bel ağrısı	Kalite kontrol ve aksesuar takımı yapılırken uzun süre ayakta durulmakta ve tekrarlayan hareketler yapılmaktadır.	Çalışanlar	3	3	10	90	Çalışanlara ergonomi eğitimi verilmesi. Belli aralıklarda çalışanların dinlendirilmesi. Çalışanlar arasında sirkülasyon yapılması.	İşveren	İvedilikte	1	3	6	18
5	Yıkama Çalışma Alanları		Tekrarlayan hareketler , Uygunsuz çalışma duruşları, uzanma, çekme, dönme vb. hareketler	Rotator cuff hastalığı, Bel ağrılan, disk aşınmaları, Biceps tendinit hastalığı	Ürün ütü ve paketlemeye sevk edilirken 4 tekerli araçla itilip kuvvet uygulayarak götürülmektedir.	Çalışanlar	3	15	6	270	Ürünü taşıırken belden kuvvet vererek araç itilmemeli veya çekilmemeli. Kollardan kuvvet verilerek araç ilerletilmeli. Çalışanlara ergonomi eğitimi verilmelidir.	İşveren	İvedilikte	1	15	2	30

3. SONUÇ VE ÖNERİLER

Hazır giyim işletmeleri ergonomik açıdan riskli işletmelerdir. Risk değerlendirmesi verilerinde ergonomik tehlikelerin olabileceği ve ergonomiye önem verilmesi gerektiğine dikkat çekilmektedir. Tekrarlı hareketlerin çok sık olduğu hazır giyim işletmelerinde çalışanların işletmede güvenli ve sağlıklı koşullarda çalışması için gerekli olan ergonomi bilimi her iş alanında uygulanması hem çalışan hem de işveren açısından son derece fayda sağlamaktadır. Hazır giyim işletmelerinde ergonomi prensiplerine uyulmadığı durumlarda ortaya çıkabilecek tehlikeler ve riskler belirtilmiştir.

Bu çalışmada hazır giyim işletmesinde ergonomik risk faktörlerine dair genel bir inceleme yapılmış olup aşağıdaki öneriler sunulmuştur:

- Çalışanların çalışma esnasında kullandığı parçalara ve ürünlere en yakın ve en kolay şekilde ulaşması sağlanmalıdır.
- Ayakta çalışanlara belirli aralıklarla dinlenebilmeleri adına oturabilecekleri sandalye veya tabure sağlanmalıdır.
- Elle taşıma işlerinde, uygun taşıma ekipmanlarının kullanılması sağlanmalıdır.
- Bölümdeki çalışanlara yaptığı işin özelliğine göre ve özellikle elle taşıma işlerinde uygun çalışma şekli ve güvenli davranışları içeren ergonomi eğitimi verilmelidir.

Yukarı da yer alan öneriler ergonomik risk faktörlerinin azaltılmasında, uygun iş ekipmanları kullanılmasının ve çalışma ortamında ergonomik tasarım yapılmasının çalışanların üst ekstremitelere

bel ve alt ekstremitte hastalıklarının azaltılması için önem taşımaktadır. Aşağıda işyeri bölümleri ile çalışanların en fazla şikayetlerinin olduğu vücut bölgeleri yer almaktadır:

- Kesimhane çalışanlarında en fazla sırt, boyun, omuz ve bel
- Ütü bölümü çalışanlarında en fazla boyun, ayak/bilek, el/el bileği
- Dikim bölümü çalışanlarında en fazla sırt , boyun, bel
- Kalite kontrol bölümü çalışanlarında en fazla boyun ve ayak/bilek
- Paketleme bölümü çalışanlarında en fazla sırt ve bel,
- Depo-sevkiyat bölümü çalışanlarında sırt, omuz, bel, ayak/bilek ağrısının olduğu görülmektedir.

Çalışanların ergonomik risklerden kaynaklanan şikayetleri ile yaş, cinsiyet, o işi ne kadar süredir yaptıkları gibi parametrelere yönelik istatistiksel analiz, anket çalışmalarının yapılması ve kas-iskelet sistemindeki zorlanmaları ölçen aletler kullanılması önerilmektedir.

4. KAYNAKLAR

1. Berry, C., 2009. A Guide to Ergonomics, Occupational Safety and Health Division, N.C. Department of Labor, <https://digital.ncdcr.gov/digital/collection/p249901coll22/id/23661>, Erişim Tarihi: 10.08.2021
2. Yalçın, E., Ayvaz, B., 2018. İşletmelerde İş Sağlığı ve Güvenliği Açısından Ergonomik Risk Ölçümü: Tekstil Sektöründe Bir Uygulama. İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 17(34), 13-30.
3. Deste, M., Sever, S., 2019. İmalat İşletmelerinde Ergonomik Risk Değerlendirme Yöntemleri Üzerine Bibliyometrik Bir Analiz. Ekev Akademi Dergisi, İcoae Özel Sayısı 2019, 209-224, <http://www.ekevakademi.org/> Makaleler/719561717_11%20Mustafa%20DESTE-Sami%20SEVER.pdf, Erişim Tarihi: 11.01.2021.
4. Ergör, A., 2014. İnternet: HAS 5030 Biyolojik ve Ergonomik Risk Etmenleri. Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 3(3), ÖS: Ergonomi 2015, 623-629.
5. Kahraman, M.F., 2012. Ergonomik Risk Değerlendirme Yöntemlerinin Çok Ölçütlü Karar Verme Teknikleri ile Önceliklendirilmesi ve Bütünleşik Bir Model Önerisi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 103.
6. Felekoğlu, B., Özmehmet Taşan, S., 2017. İş ile İlgili Kas İskelet Sistemi Rahatsızlıklarına Yönelik Ergonomik Risk Değerlendirme: Reaktif/proaktif Bütünleşik Bir Sistematik Yaklaşım. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 32(3), 777-793.
7. <http://www.eumusc.net>, The European Musculoskeletal Conditions Surveillance and Information Network. Musculoskeletal health in Europe report v5.0., [http://www.eumusc.net/myUploadData/files/Musculoskeletal Health in Europe Report v5.pdf.](http://www.eumusc.net/myUploadData/files/Musculoskeletal%20Health%20in%20Europe%20Report%20v5.pdf), Erişim tarihi 12.01.2022.
8. Ağırhan, M., 2020. Tekstil ve Konfeksiyon Sektöründe İş Sağlığı ve Güvenliği Farkındalık ve Uygulanabilirlik Araştırması: Trakya Örneği. İstanbul Ticaret Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi, 19(37), 57-68.
9. Cömert, M., Doba Kadem, F., 2015. Dikim Bandında Bir Proses Analizinin Uygulanması. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 30(1), 151-166.
10. Kumaş, Z., Sabır, E.C., Duru Baykal, P., 2016. Konfeksiyon İşletmesinin Verimliliği İçin İş Etüdü Tekniği Kullanımı. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 31(1), 175-189.
11. Karabulut, M., Yıldız Kumru, P., Onursal, F.S., 2020. Altı Sigma Yaklaşımı ve Tekstil Sektöründe Bir Uygulama, Beykoz Akademi Dergisi, 8(1), 1-19.
12. Doba Kadem, F., 2017. Ready-made Garment (RMG) Industry and Occupational Health and Safety. 2nd International Mediterranean Science

Bir Konfeksiyon İşletmesinde Seçilmiş Ergonomik Risklerin İş Sağlığı ve Güvenliği Kapsamında Analizi ve Risk Değerlendirmesi

and Engineering Congress, October 25-27, 2017.

- 13.** Kinney, G.F., Wiruth, A.D., 1976. Practical Risk Analysis for Safety Management. NWC Technical Publication 5865, Naval Weapons Center, China Lake CA, USA, 1976.

Yüzeysel Su Kaynağından İçme Suyu Eldesinde Alkali Koagülasyon Metodunun Uygulanması ve Kalsiyum Sertliğinden İleri Gelen Kireç Taşı Oluşumu

Hasan Kıvanç YEŞİLTAS¹ ORCID 0000-0003-3331-3209
Turan YILMAZ^{*1} ORCID 0000-0003-1265-7117

¹Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Adana

Geliş tarihi: 11.01.2021 Kabul tarihi: 21.03.2022

Atıf şekli/ How to cite: YEŞİLTAS, H.K., YILMAZ, T., (2022). Yüzeysel Su Kaynağından İçme Suyu Eldesinde Alkali Koagülasyon Metodunun Uygulanması ve Kalsiyum Sertliğinden İleri Gelen Kireç Taşı Oluşumu. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37(1), 249-260.

Öz

Bu çalışmada, Türkmenistan Cumhuriyeti'nde bulunan yüzeysel bir su kaynağından temin edilen doğal suda bulanıklık ve kalsiyum parametrelerinin alkali koagülasyon metodu ile giderimi çalışılmıştır. Araştırma neticesinde %99 değerinde bulanıklık ve %33,50 değerinde kalsiyum giderimi elde edilmiştir. Ayrıca soda ilavesi ile kalsiyum giderim değeri %81'e çıkarılmıştır.

Anahtar Kelimeler: İçme suyu arıtma, Sertlik giderimi, Alkali koagülasyon, Membran kirlenmesi

Application of Alkaline Coagulation Method in Obtaining Drinking Water from Surface Water Source and Limestone Formation Caused by Calcium Hardness

Abstract

In this study, the removal of turbidity and calcium parameters in natural water obtained from a surface water source in the Republic of Turkmenistan by alkaline coagulation method was studied. As a result of the research, 99% turbidity and 33.50% calcium removal were obtained. In addition, the calcium removal value was increased to 81% with the addition of soda.

Keywords: Drinking water treatment, Hardness removal, Alkaline coagulation, Membran fouling

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Turan YILMAZ, tyilmaz@cu.edu.tr

1. GİRİŞ

İçme suyu temin edilen su kaynakları, buldukları çevreleri ile sürekli olarak etkileşim içerisinde olan doğal sistemlerdir. Bünyelerinde barındırdıkları safsızlıklardan kaynaklı olarak tüketilmeleri öncesinde yasal mevzuatlarca belirlenmiş analizlerin yapılması ve su sisteminin tanınması önemli bir husus olmaktadır.

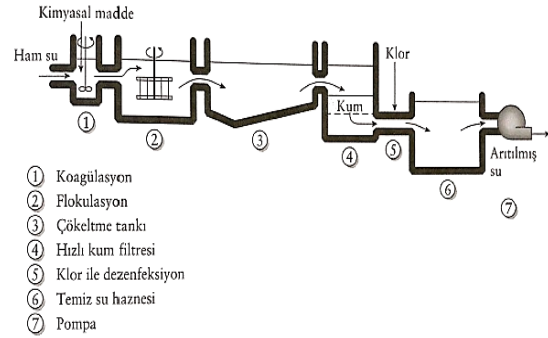
Su sistemlerinde doğal ya da insani faaliyetlerden kaynaklı olarak çeşitli kirleticiler yaygın olarak bulunmaktadır. Bu kirleticiler belirli konsantrasyonların altında canlılar açısından herhangi bir olumsuz etmene sebebiyet vermezken konsantrasyonlarının artması neticesinde ise istenmeyen olumsuz etkiler meydana getirmektedir.

Su sistemlerinde görülmekte olan yaygın iyonlardan ikisi ise su sertliğinin kaynaklarından olan kalsiyum ve magnezyum katyonlardır. Bu çok değerlikli katyonları içeren sular özellikle ısıtıldıklarında kalsiyum karbonat oluşumu sebebiyle çaydanlık ve ısıtma kazanlarının dibini kaplamakta, su iletim borularında ise tıkanmalara sebebiyet vermektedir. Toplam sertlik (TS) parametresinin canlılar üzerinde olumsuz etkisi olmamakta olup suyun TS konsantrasyonunun 250 mg CaCO₃/L'yi geçmesi durumunda evsel kullanım açısından uygun olmamaktadır [1,2].

Ayrıca içme sularında alüminyum, krom, bakır, kadmiyum, bakır, nikel, demir, mangan ve kurşun vb. canlılık için zararlı elementler de su bünyesinde bulunabilmektedir. Bu elementlerin canlı bünyesinde bulunması durumunda ise çeşitli sağlık problemlerine meydana gelebilmektedir [3-6]. Dolayısıyla partiküler ve çözülmüş maddelerin yanı sıra mikrobiyal açıdan da çeşitli kirleticileri yapısında barındıran doğal suların ilgili yasal mevzuatlara uygun şekilde arıtma işlemine tabi tutulmadan içme suyu olarak kullanılmaları mümkün olmamaktadır [7,8].

Akarsu ve göl gibi doğal sulardan içme suyu hazırlanmasında dezenfeksiyon işlemi önem taşımakta olup geleneksel arıtma metodu olarak koagülasyon, flokülasyon ve çöktürme (KFC)

prosesi kullanılmaktadır [1]. Ülkemizde de doğal sulardan içme suyu eldesinde yerel yönetimler tarafından tercih edilmekte olan KFC prosesine ait akım şeması Şekil 1'de yer almaktadır.



Şekil 1. Klasik su arıtma akım şemasının KFC bölümü [3]

Koagülasyon, flokülasyon ve çöktürme prosesi, görevi birbirinden farklı üç adet reaktörün sıralı bir şekilde (Şekil 1) işletilmesi ile gerçekleştirilen kimyasal bir arıtma metodudur. KFC prosesinde, karışımli bir ortamda, arıtılacak suya kimyasal madde (koagülant) eklenerek suda mevcut partiküler maddelerinin stabiliteilerinin bozulması sağlanarak, kendi ağırlıkları ile çökelmeye hazır flokların oluşturulması gerçekleştirilmektedir [9]. Sıralı sistem KFC reaktörlerinden ilkinde yüksek karıştırma hızında çalışılmakta olup koagülant eklenmesi neticesinde koloidal maddelerin stabiliteilerinin bozulması hedeflenmektedir. İkinci ünite ise daha yavaş karıştırma hızında çökelmeye hazır flokların çökmemesi sağlanarak daha büyük flokların elde edilmesi amaçlanır. Son ünite ise karıştırma işlemi sonlandırılmakta olup su içerisinde mevcut başta askıda katı madde (AKM) ve bulanıklık olmak üzere çeşitli organik ve inorganik kirleticilerin çöktürülerek giderilmesi gerçekleştirilmektedir [2,7].

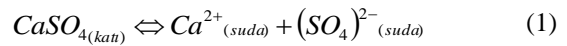
KFC metodu ile içme sularının arıtılmasında çoğunlukla, bünyesinde alüminyum ve demir bulunan (alüminyum sülfat, demir-III-klorür ve demir sülfat gibi) çeşitli inorganik koagülantlar kullanılmaktadır [10,11]. Ayrıca ham suyun bileşimine göre arıtmada hangi koagülantın kullanılmasının uygun olacağı ve uygun koagülant dozunun belirlenmesi için jar test adı verilen

artılabilirlik çalışması yapılarak uygun arıtma şartları belirlenmektedir [12]. Alüm (alüminyum sülfat) ve demir-III-klorür gibi bünyesinde anyon ve katyon bulunduran kimyasallar suda iyonlaşarak suyun iletkenlik değerini arttırmakta olup koagülant katyonları (Al^{3+} ve Fe^{3+} vb.) su içerisinde mevcut negatif yüklü kolloidler ile floklar oluşturarak kirleticilerin gideriminde kullanılmaktadır [13]. Su ortamında, koagülantların iyonlaşmasının arıtma açısından önemli faydaları bulunurken kalıntı miktarlarının canlı sağlığı açısından istenmeyen sağlık sorunlarına sebep olacağı bilinmektedir. Örneğin içme sularında Al^{3+} katyonlarının bulunması durumunda zaman içerisinde istenmeyen bir hastalık olan alzaymır hastalığı canlı bünyesinde meydana gelebilmektedir [14]. Koagülant kalıntıları sadece çıkış suyunda tespit edilmemekte olup meydana gelen atık çamurda da bulunmaktadır. Bu çamurların bertarafı ise ayrı bir işletme kalemi olmaktadır [15]. İstenir ise yasal zorunluluk [16].

Klasik KFC metoduna kıyasla daha kaliteli çıkış suyu değerlerine ulaşılabilen membran filtrasyon sistemleri de içme sularının arıtılmasında yaygın olarak kullanılan diğer bir arıtma prosesidir [17]. Membran filtrasyon, membran olarak adlandırılan seçici ve geçirgen materyalden, basınçlı bir ortamda arıtılacak suyun geçirilmesi ile bünyesinde bulunan safsızlıkların uzaklaştırılması olarak kısaca tanımlanmaktadır. Arıtılacak kirleticinin türüne ve atıksuyun yapısına göre özel olarak üretilen membranlar gözenek çapları ve işletme basınçlarına göre ultra filtrasyon (UF), mikrofiltrasyon (MF), nanofiltrasyon (NF) ve ters osmoz (TO) olmak üzere dört sınıfa ayrılmaktadır [18]. İçme suyu arıtımında ise mikrobiyal kirliliğin yanında AKM ve kolloidal madde gideriminde de yüksek oranlarda verim alınan NF sistemleri yaygın olarak tercih edilmektedir [19,20]. Ayrıca araştırmacılar tarafından membran proseslerinin, zaman içerisinde klasik KFC metodunun yerini alabileceği bildirilmektedir [17,21]. Fakat membran sistemleri, hassas reaktörler olup bünyelerinde yer alan seçici geçirgen yapının korunması ve periyodik bakımlarının düzenli olarak yapılması sistemin sürdürülebilirliği açısından önem taşımaktadır [22]. Ayrıca arıtılacak

suyun çözünmüş ve kolloidal madde içeriği fazla olması durumunda ön arıtma yapılması ve işletme esnasında düzenli olarak periyodik bakımlarının yapılması gerekmektedir [11,18]. Aksi halde suda mevcut safsızlıklardan kaynaklı olarak membranın gözeneklerinde tıkanmalar meydana gelebilmekte ya da membranın yüzeyi tamamen kapanabilmektedir. Membran kirlenmesi olarak nitelendirilen bu olumsuz durumun meydana gelmesi ile birlikte sistemin arıtma verimi düşmekte ve zaman içerisinde membran malzemesi geri dönülmez deformasyonlar ile karşı karşıya kalmaktadır [17,22].

Sülfat iyonu, doğal sulara yaygın olarak bulunan temel elementlerden biridir. Nehir sistemlerinde sülfat konsantrasyonu 0-630 mg/L konsantrasyonunda değişirken göl ve yeraltı sularında sırası ile 0-250 mg/L ve 0-230 mg/L arasında değişmektedir. Sülfat konsantrasyonu deniz suyunda ise genel olarak 2,7 g/L seviyesinde olmaktadır [23]. Yüksek sülfat içeriğine sahip doğal sulara ise su içerisinde bulunan kalsiyum ve baryum gibi çözünmüş mineral tuzları gene su içerisinde bulunan sülfatlar ile reaksiyona girerek kalsiyum sülfat (Eşitlik 1) ve baryum sülfat bileşiklerini oluşturmaktadır. Bu tip suların içme suyu eldesinde, membran filtrasyon proseslerinin kullanılması durumunda seçici ve geçirgen membranın yüzeyi sülfatlı bileşikler ile kaplanmakta ve arıtma verimi olumsuz olarak etkilenmektedir [22,24,37]. Ayrıca sülfat iyonu için içme suyu temininde istenilen sınır değer 250 mg/L'dir. Sınır değerini aşılması durumunda suyun tadında bozulmalar meydana gelmekte olup suyun iletilmesi esnasında korozyona sebebiyet vermektedir. 500-750 mg/L arasındaki sülfat konsantrasyonlarında ise insanların sindirim sisteminde tahrişe neden olmakta ve ishale sebebiyet vermektedir [5,23].



Bu çalışmada Türkmenistan Cumhuriyeti'nde bulunan bir yüzeysel su kaynağından temin edilen su numunesi ile alkali koagülasyon metodu kullanılarak bulanıklık ve kalsiyum giderimi çalışılmıştır. Bu çalışmanın önemi ise çalışılmış

olan su numunesinin yüksek miktarda sülfat iyonu muhteva etmesidir. Bu sayede alkali koagülasyon metodunun laboratuvar ortamında uygulanması ile ilgili temel bir giderim çalışması literatüre sunulurken ayrıca kireç taşı oluşumu ve KFC metodu ile kontrolü hakkında birlikte çalışılmış bir araştırma hazırlanmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Materyal

2.1.1. Çalışmada Kullanılan Yüzeysel Su

Bu çalışmada kullanılan ham su, Türkmenistan Cumhuriyeti'nde bulunan yüzeysel bir doğal su kaynağından temin edilmiştir. Ham su numunesinde; pH, alkalinite, bulanıklık, AKM, toplam sertlik, sülfat çamur hacim indeksi, kalsiyum, magnezyum, sodyum, potasyum, alüminyum, krom, demir, mangan, nikel ve kurşun olmak üzere 16 adet parametrenin analizleri yapılmıştır.

2.1.2. Kullanılan Cihazlar ve Reaktifler

Bu çalışmada gerçekleştirilmiş olan pH, bulanıklık ve sülfat ölçümleri sırası ile WTW marka 3110 model pH metre, Nanocolor marka 100 D model spektrofotometre ve Perkin Elmer marka TU-188 model UV-VIS spektrofotometre cihazları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. AKM analizlerinde Whatman GF/C filtre kağıdı kullanılmış olup kalsiyum, magnezyum, sodyum, potasyum, alüminyum, krom, demir, mangan, nikel ve kurşun analizleri ise Perkin Elmer marka Optima 2100 DV model ICP-OES cihazı ile ölçülmüştür. Alkali koagülasyon çalışmasında koagülant olarak sodyum hidroksit (NaOH, Merck) ve soda (Na_2CO_3 , Merck) kimyasalları kullanılmıştır.

2.2. Metot

2.2.1. Arıtılabilirlik Çalışması ve Alkali Koagülasyon

Doğal sularda bulunan AKM ve bulanıklık parametreleri çöktürme havuzu kullanılarak

düşürülebilmektedir. Bulanıklık ve AKM miktarının azaltılması neticesinde ise arıtma ünitesinde yer alan mekanik aksamlar korunmakta ve çöktürme ünitesinden sonra yer alan arıtma ünitesinin de yükü azaltılmaktadır [7,9]. Bu çalışmada kullanılan ham suda çamur hacim indeksi (ÇHİ) deneyi (imhoff hunisi, 1 saat bekleme süresi) gerçekleştirilerek arıtma alkali koagülasyon prosesi öncesinde çöktürme havuzu gereksinimi incelenmiştir. ÇHİ deneyini takiben ham atıksuyun KFC prosesi ile arıtılabilirliği çalışmıştır.

Jar test cihazı ile pH 10,5'de sürdürülen alkali koagülasyon uygulamasında 0,5 L numune hacmi seçilerek sodyum hidroksit (NaOH) koagülantı kullanılmıştır. Hızlı karıştırma (koagülasyon), yavaş karıştırma (flokülasyon) ve çöktürme aşamalarına ait reaksiyon süreleri (ve karıştırma hızları) üç aşama için sırası ile 3 dakika (120 dev/dk.), 20 dakika (30 dev/dk.) ve 30 dakika olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmada ayrıca ham suyun alkalinite değeri soda (Na_2CO_3) eklenmesi ile artırılarak alkali koagülasyon uygulaması tekrarlanmıştır. Suda mevcut olan kalsiyum ve magnezyum iyonlarının miktarına göre soda miktarı hesaplanmış olup 250 mg/L soda eklenmiştir. Alkali koagülasyon uygulaması bir önceki aşama ile aynı şartlarda gerçekleştirilmiştir.

2.2.2. Analitik Metotlar

Bu çalışmada pH, alkalinite, toplam sertlik (TS), AKM, sülfat ve çamur hacim indeksi analizleri Çizelge 1'de yer alan metotlara uygun olarak gerçekleştirilmiştir [25]. Kalsiyum, magnezyum, sodyum, potasyum, alüminyum, krom, demir, mangan, nikel ve kurşun analizleri ise Perkin Elmer marka ICP OES (Optima 2100 DV) cihazı ile EPA Method 200.7'e uygun olarak ölçülmüştür [26]. Bulanıklık ölçümleri ise DIN 38 404-C2-4'e uygun olarak tamamlanmıştır [27].

Çizelge 1. Analizleri gerçekleştirilen deneyler ve metotları [20]

Deney Adı	Metot
pH	4500 H ⁺ B
Alkalinite	SM-2320 B
Toplam Sertlik	SM-2340 C
Askıda Katı Madde	SM-2540 D
Sülfat	SM-4500 E
Çamur Hacim İndeksi	SM-2710 D

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Doğal (Ham) Su Karakterizasyonu

Aritılabilirlik çalışmasında kullanılan ham su numunesinde, bu çalışmanın materyal ve metot bölümünde belirtilmiş olan 16 adet analiz yapılarak su karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Aritılacak ham su numunesine ait analiz sonuçları ve TS-266'da yer alan sınır değerleri Çizelge 2'de yer almaktadır.

Çizelge 2. Ham atıksu karakterizasyonu ve TS-266 sınır değerleri

Parametre	Değer	TS-266 Sınır Değer [5]
pH	8	6,5-9,5
Alkalinite, mg CaCO ₃ /L	108	-
Bulanıklık, NTU	1185	5
AKM, mg/L	1520	-
Sülfat, mg/L	2532	250
TS, mg CaCO ₃ /L	269	-
Kalsiyum, mg/L	76,35	200
Magnezyum, mg/L	18,77	50
Sodyum, mg/L	86,49	175
Potasyum, mg/L	4,55	12
Alüminyum, mg/L	0,0395	0,200
Kadmiyum, mg/L	Ölçülemedi	0,005
Krom, mg/L	0,056	0,050
Bakır, mg/L	Ölçülemedi	2
Demir, mg/L	0,071	0,200
Mangan, mg/L	0,003	0,050
Nikel, mg/L	Ölçülemedi	0,020
Kurşun, mg/L	0,005	0,010

Aritılacak olan ham suyun kalitesinin bilinmesi, arıtma yönteminin seçilmesinde ve proses dizaynında önemli bir husus olmaktadır [3]. Bu

çalışmada kullanılacak olan doğal su numunesinin bir behere alınarak karıştırılmasını takiben aşırı bulanık olduğu gözlenmiştir. Dolayısıyla öncelikli olarak bulanıklık ve askıda katı madde gideriminin gerekliliği anlaşılmıştır. Laboratuvarındaki gözlemleri takiben ham suyun bulanıklık değerinin 1185 NTU ve AKM değerinin 1520 mg/L olduğu tespit edilmiştir. Bulanıklık suda mevcut ince parçacıklar ile partiküler maddelerden kaynaklanmakta olup 5 NTU değerinin üstündeki bulanıklık değerleri kolaylıkla fark edilebilmektedir [3].

pH parametresi, su arıtımında, tesislerinin tasarımı ve işletilmesi açısından dikkat edilmesi gereken önemli bir kontrol parametresidir [9]. İçme sularında arzu edilen pH değerinin 6 ile 9 arasında olması istenirken daha yüksek pH değerlerinde suyun tadında istenmeyen tatsızlıklar meydana gelmektedir [3,4]. Düşük pH değerlerinde ise suyun iletiği isale hatlarında korozyona sebebiyet verirken aynı zamanda da ortamın asidik olması neticesinde suda mevcut kadmiyum, krom, bakır vb. metallerin çözünürlüğünü artmaktadır [3,24]. pH parametresi ayrıca doğal ekosistemlerin su kalitesi hakkında fikir veren önemli bir kalite parametresi olup bu çalışmada kullanılan ham suyun pH değeri 8 olup su kalitesi ve kullanılabilirliği açısından uygun olmaktadır [28]. Suyun tampon kapasitesinin bir ölçüsü olan alkalinite, pH parametresi ile ilişkili olup su içerisinde mevcut karbonat ve bikarbonat iyonlarının matematiksel eşitliği olarak ifade edilmektedir [24]. Bu çalışmada kullanılan ham suyun alkalinite değeri 108 mg CaCO₃/L'dir. KFC prosesinde sudaki alkalitenin artırılması neticesinde arıtma veriminin yükseldiği bilinmekte olup ham suyun alkalinite değerinin artırılması ile daha yüksek giderim verimleri elde edilebilmektedir [2].

Temin edilen ham suyun sülfat ve toplam sertlik konsantrasyonları sırası ile 2532 mg/L ve 269 mg/L olmaktadır. TS-266'da yer alan sınır değerlerin üstünde değerler olması sebebiyle sülfat ve TS giderimi gerçekleştirilmeden ham suyun içme suyu olarak kullanılması mümkün

olmamaktadır. Ayrıca iletim hattında oluşacak tabakalaşma problemlerinin de önlenmesi amacıyla TS parametresinin kontrol edilmesi önemli olmaktadır.

Kalsiyum, magnezyum, sodyum ve potasyum mineralleri insan fizyolojisi için önemli elementler olup düzenli olarak canlı bünyesine düzenli olarak alınması gerekmektedir. Kalsiyum ve magnezyum elementleri birlikte kemik oluşumuna katılmakta olup kalp ve dolaşım sisteminde kullanılmaktadır. Sodyum ve potasyum elementleri ise sinir hücrelerinde kullanılmaktadır. Kalsiyum ayrıca kanın pıhtılaşması ve sinir uyarılarının iletilmesi açısından da önemli bir elementtir [29]. Kalsiyum, magnezyum, sodyum ve potasyum elementleri için TS-266'da yer alan sınır değerler sırası ile 200 mg/L, 50 mg/L, 175 mg/L ve 12 mg/L olmaktadır [5]. İçme sularında kalsiyum fazlalığında taş oluşma potansiyeli artmaktadır. Magnezyum fazlalığı ishale sebep olurken sodyum ve potasyum fazlalığında ise suda tuzluluk hissi yaratır, tat problemlerine sebep olmaktadır [30]. Ham suyun kalsiyum, magnezyum, sodyum ve potasyum değerlerinin (Çizelge 1) TS-266'da yer alan sınır değerlerinden düşük olduğu anlaşılmıştır.

Çizelge 1 incelendiği zaman ham suyun alüminyum, mangan ve krom değerlerinin TS-266'da yer alan sınır değerlerinin altında olduğu görülmektedir. Fakat krom değerinin TS 266'ya göre yüksek çıkması sebebiyle uygun arıtımının gerçekleştirilmesi gerekmektedir [5].

Ham suda mevcut kadmiyum, bakır ve nikel elementleri için ise analizin gerçekleştirildiği cihazın ölçüm limitinin altında kalması sebebiyle ölçümler gerçekleştirilememiştir. Analizin yapıldığı cihazın ölçüm yapabileceği en alt limit ölçüm değerleri kadmiyum, bakır ve nikel elementleri için sırası ile 0,0012 mg/L, 0,0012 mg/L ve 0,0038 mg/L olmaktadır. İlgili üç element için ICP-OES cihazının ölçüm limitleri üzerinden yapılan değerlendirmede, ham suyun kadmiyum, bakır ve nikel konsantrasyonlarının TS-266'da yer alan sınır değerlerden düşük olduğu anlaşılmıştır.

3.2. Ham Suda Çökebilir Katı Madde Hacminin Belirlenmesi

Doğal sular, çevresel etmenlerinde (yağış, rüzgar ve yüzeysel akış gibi.) etkisi ile katı madde muhtevası açısından zengin ortamlardır. Ham suda yer alan katı maddelerin arıtma tesisine ulaşmasını takiben giderilmesi ya da azaltılması tesisin mekanik aksamının zarar görmesini engellemektedir [7]. Bu amaçlar ile çöktürme havuzu inşa edilerek ham sudan katı madde muhtevasının giderimi gerçekleştirilmektedir.

Biyolojik arıtma tesislerinde, aktif çamurun çökelme davranışının tespiti ve arıtma tesisinde çöktürme havuzlarının verimliliğinin kontrol edilmesi amacıyla çamur hacim indeksi (ÇHİ) deneyi periyodik olarak gerçekleştirilmektedir. Ayrıca hâlihazırda ÇHİ deneyi çökelme tanklarının performansının da değerlendirilmesinde kullanılan en uygun metot olmaktadır [3,6].

Bu çalışmanın materyal ve metot bölümünde belirlenmiş olan yöntem uygun olarak ham suda ÇHİ analizi yapılmıştır. ÇHİ analizini takiben ham suyun çökebilir katı hacmi 11 mL/L olarak tespit edilmiştir. Şekil 1'de ÇHİ deneyinin başlangıcına ve ÇHİ deneyi sonrasında ait görüntüler sırası ile yer almaktadır.



Şekil 1. Ham suyun ÇHİ analizine başlanmadan önceki (sol) ve ÇHİ analizi sonrası (sağ) görüntüleri

ÇHI deneyi sonrasında ham suyun bulanıklığının azaldığı tespit edilmiş olup (Şekil 1) bekleme süresinin arttırılması ile tespit edilen ÇHI değerinin yükseleceği düşünülmektedir. İçme suyu temininde ham suyun kaynağına uygun olarak arıtma tesisinin girişinde dezenfeksiyon işlemi yapılmakta olup katı madde muhtevasının giderilmesi ile dezenfeksiyon işleminin de verimi arttırılabilmektedir [1,7]. Ayrıca kurulacak olan çöktürme ünitesini takiben KFÇ prosesinde de koagülant kullanımında azalma meydana gelirken giderilen madde miktarının azalması ile birlikte KFÇ prosesinin bir çıktısı olan atık çamur miktarı da azalacaktır.

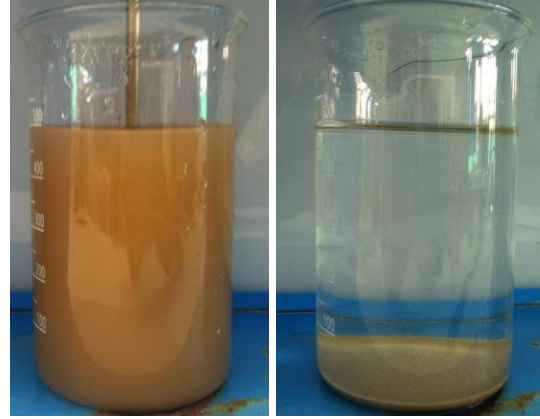
3.3. Alkali Koagülasyon ve Arıtılabilirlik Çalışması

Yüzeysel su sistemlerinde yaygın olarak bulunmakta olan kil ve silt içeriğinden kaynaklı olarak önemli ölçüde bulanıklık bulunmaktadır. Sürekli hareket halinde olan bu partiküller bünyelerinde bulunan elektrostatik yükten kaynaklı olarak bir araya gelmeleri engellenmektedir [1]. Su ortamında kendi halinde çökelemeyen bu tanecikler taşıdıkları yük (+ ya da -) durumuna göre zıt bir yük ile yüklenmekte ve zıt iyonlardan oluşan ikinci bir tabaka oluşturmaktadır. Oluşan bu tabaka çift tabaka olarak adlandırılmakta ve su ortamına eklenen koagülant vasıtasıyla bu çift tabaka sıkıştırılmaktadır. Sıkışan partiküller ise su ortamında yer alan diğer partiküller ile birbirlerine yaklaşmakta ve koloidal taneciklerin birleşmesi neticesinde pıhtılar oluşmaktadır [31]. Karıştırma işleminin etkisinde oluşan bu pıhtılar neticesinde ise su ortamında bulunan süspansiyon katı, renk, virüs, bakteri ve alglerin uzaklaştırılması da sağlanılmaktadır [32].

Bu çalışmada koagülant olarak seçilen NaOH kimyasalı su ortamında iyonlaşarak Na^+ ve OH^- iyonları olarak su sisteminde çözünmektedir. OH^- iyonu varlığında sistemin pH değeri yükselmekte ve su içerisinde mevcut metallere, metal oksitler şeklinde çöktürülerek uzaklaştırılmaktadır. Ayrıca su ortamının pH'ı artması neticesinde su içerisinde mevcut Ca^{+2} ve Mg^{+2} iyonları sırası ile kalsiyum

karbonat ($CaCO_3$) ve magnezyum hidroksit [$Mg(OH)_2$] olarak çökecek ve sistemde oluşan flokların artmasına sebep olmaktadır [3,31,32].

Doğal suyun giderim veriminin izlenmesinde Çizelge 2.'de limit değerin üzerinde görülen bulanıklık parametresi ile birlikte kireç taşı oluşumunun ve koagülantın etkisinin gözlenmesi amacıyla toplam sertlik, kalsiyum ve magnezyum parametreleri takip edilmiştir. Arıtılabilirlik çalışması öncesi ve sonrasına ait fotoğraflar Şekil 2'de yer almaktadır.



Şekil 2. Alkali koagülasyon öncesi (sol) ve sonrasına (sağ) ait fotoğraflar görüntüleri

Ham suda gerçekleştirilen arıtılabilirlik çalışması sonrasında bulanıklığının gözle görülebilir bir şekilde azaldığı gözlenmiştir (Şekil 2). Arıtılmış suyun berrak üst fazından alınan numunelerde suyun görsel durumunun tespiti için bulanıklık, sertlik değişiminin izlenmesi amacıyla TS, kalsiyum ve magnezyum ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca canlı bünyesinde bulunması gereken önemli temel elementlerden sodyum ve potasyum konsantrasyonları tespit edilmiştir. Sodyum parametresine ayrıca alkali koagülasyonda kullanılan koagülantın bileşiminde bulunması sebebiyle kontrol edilmesi gerekmektedir. İlgili analizlere ait sonuç çizelgesi, ilgili parametrelerin TS-266'ya göre limit değerleri ve analiz sonuçlarının TS-266 ile karşılaştırılması Çizelge 3'de yer almaktadır [5].

Çizelge 3. KFC sonrası çıkış suyu değerlerinin TS-266 standart değerleri ile karşılaştırılması

Parametre	Değer	TS-266	Kontrol
Bulanıklık, TE/F	<2	5	Uygun
TS, mg CaCO ₃ /L	184	-	-
Kalsiyum, mg/L	50,77	200	Uygun
Magnezyum, mg/L	13,77	50	Uygun
Sodyum, mg/L	82,52	175	Uygun
Potasyum, mg/L	4,95	12	Uygun

Özyonar ve ark., Sivas içme suyu arıtma tesisi girişinden temin ettikleri ham su numunesinde alümin ve demir tuzlarını kullanarak KFC metodu ile bulanıklık giderimi çalışmışlardır. Araştırmacılar giderim çalışması neticesinde alümin, demir sülfat ve demir klorür koagülantları ile sırası ile %94,5; %93,9 ve %95,3 bulanıklık giderimi elde etmişlerdir [33]. Berktaş ve ark., Konya iline içme suyu temin edilmesinde kullanılan içme suyu arıtma tesisinde kullanılmakta olan kimyasal madde miktarının optimizasyonunu çalışmışlardır. Çalışma neticesinde araştırmacılar içme suyundaki bulanıklık değerinin 5 NTU değerinin altına düşürülmesi için 35 mg/L dozunda alüminyum sülfat dozlamasının yeterli olacağını ve 0,01 mg/L dozunda koagülant yardımcısı olarak polielektrolit ilave edilmesi gerektiğini bildirmişlerdir [34].

Alkali koagülasyonu takiben Çizelge 3'te ölçülmüş olan tüm parametrelerin başlangıç değerlerinden daha az olduğu (Çizelge 1) tespit edilmiştir. Kireç taşı oluşumunun kontrol edilmesi amacıyla toplam sertlik parametresi dolayısıyla kalsiyum sertliğinin giderilmesi amaçlanmış olup ham suyun kalsiyum miktarında %33,50 giderim elde edilmiştir. Ayrıca analizi gerçekleştirilmiş olan altı adet parametrenin TS-266'ya uygun olduğu fakat arıtılmış suyun içilebilir nitelikte olması için yapılmış analizlerin yeterli olmadığı TS-266'da da belirtilmiştir. Özellikle ham suda bulunan krom elementinin

standartlarda yer alan sınır değeri aşması sebebiyle alkali koagülasyonu takiben membran filtrasyon tekniğinin tercih edilmesi ile içme suyu standartlarına uygun içilebilir su elde edilebilecektir.

KFC ünitesini takiben NF sisteminin kurulacak olması durumunda içme suyu olarak kullanılacak suda kalsiyum, magnezyum gibi besleyici elementler bulunacaktır. Fakat TO sistemi kullanılır ise saf su niteliğinde çıkış suyu elde edileceğinden canlılar için besleyici elementler ve minerallerin isteğe bağlı olarak sonradan arıtılmış suya eklenebilmektedir. Eğer ki KFC prosesinden elde edilen arıtılmış su ile TO çıkışında elde edilen arıtılmış su belirli oranlarda karıştırılır ise içme suyunun mineral içeriği artırılarak daha besleyici bir su elde edilmesi mümkündür.

Bu durumun daha iyi gözlenmesi amacıyla TO prosesini temsilen saf su ve KFC prosesine ait çıkış suyu sırası ile %25 ve %75 oranında karıştırılarak yeni bir su bileşimi hazırlanmıştır. Hazırlanmış olan karışıma ait analiz sonuçları ve TS-266'da yer alan standartlar ile karşılaştırılması Çizelge 4'de yer almaktadır.

Çizelge 4. Hazırlanan karışıma ait değerlerin TS-266 standart değerleri ile karşılaştırılması

Parametre	Değer	TS-266	Kontrol
Bulanıklık, TE/F	<2	5	Uygun
TS, mg CaCO ₃ /L	135,90	-	Uygun
Kalsiyum, mg/L	37,40	200	Uygun
Magnezyum, mg/L	10,19	50	Uygun
Sodyum, mg/L	61,16	175	Uygun
Potasyum, mg/L	3,67	12	Uygun

Bu çalışmada belirlenen karışım oranları (%75-25 oranı) arazi ölçeğinde yapılacak olan tasarımlar için bir alternatif olarak seçilmiş olup ham suyun

kalitesine ve arıtma sisteminin işletme şartlarına göre değişiklik gösterecektir. Ayrıca KFÇ çıkışı ile TO çıkışının karışımından sonra KFÇ çıkışında hazırlanan arıtılmış su seyreltilmekte olup TS-266'da yer alan tüm kalite parametrelerin kontrol edilmesi gerekmektedir.

Kalsiyumdan ileri gelen sertlik karbonat ve karbonat olmayan sertlik olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Karbonat sertliği giderilmesi ekonomik ve pratik olup karbonat olmayan sertliğin giderilmesi kompleks ve maliyetli olmaktadır. Kireç taşı, yapısında bulunan sülfat anyonundan (Eşitlik 1) kaynaklı olarak karbonat olmayan sertlik sınıfına girmekte ve suya eklenecek olan karbonat tuzları ile oluşumu kontrol edilmektedir [1,2]. Bu amaç ile çalışmanın bir sonraki aşaması olan ham suya soda (Na_2CO_3) eklenmesi ile ham suyun alkalitesi yükseltilmiş ve bir önceki aşamada gerçekleştirilen alkali koagülasyon çalışması tekrarlanmıştır. Alkali koagülasyonu takiben berrak üst sudan alınan numunede yapılan analizlere ait sonuçlar Çizelge 5'de yer almaktadır.

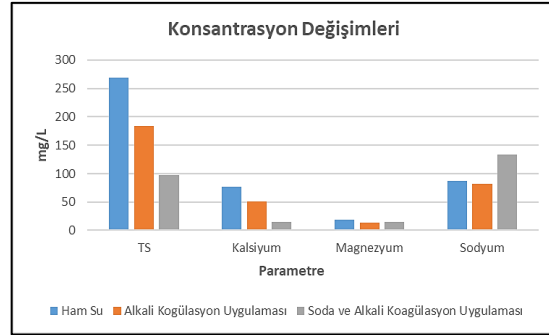
Çizelge 5. Alkali koagülasyon ile birlikte soda kullanılması durumunda çıkış suyu değerleri

Parametre	Değer
Bulanıklık, TE/F	<2
TS, mg CaCO_3 /L	98
Kalsiyum, mg/L	14,40
Magnezyum, mg/L	14,89
Sodyum, mg/L	133

Alkali koagülasyon çalışmasında soda kullanılarak ham suyun toplam sertlik, kalsiyum ve magnezyum miktarları düşürülmüş, kalsiyum miktarında ham suya göre %81 oranında azalma gerçekleştirilmiştir. Soda kullanılmadan yapılmış olan alkali koagülasyon çalışmasında kalsiyum giderimi %33,50 olmaktadır. Soda eklenerek gerçekleştirilen alkali koagülasyon uygulamasında ise %71 kalsiyum giderimi elde edilmiştir. Bu durum ise suda mevcut kalsiyum iyonlarının soda ile reaksiyona girerek kalsiyum karbonat çökeltilmesi (Eşitlik 2) oluşturmasından kaynaklıdır [2].



Çizelge 1 ve 5'de yer alan sodyum değerleri karşılaştırılması durumunda ham suyun sodyum konsantrasyonunun 86,49 mg/L (Çizelge 1) değerinden 133 mg/L (Çizelge 6) değerine yükseldiği arıtılabilirlik çalışmasına ait sonuçlar incelenirken tespit edilmiştir. Bu durum ise araştırmada kullanılmış olan sodyum karbonat (soda) kimyasalından kaynaklanmaktadır. Sodanın su ortamında iyonlaşması ile bileşiminde bulunan sodyum iyonları su ortamına geçerek çıkış suyunda sodyum miktarını arttırmaktadır (Eşitlik 2). TS, kalsiyum, magnezyum ve sodyum parametrelerinin bu çalışma boyunca tespit edilen değişimleri Şekil 3'de yer almaktadır



Şekil 3. TS, kalsiyum, magnezyum, sodyum ve potasyum parametrelerinin değişimleri

Alkali koagülasyon çalışmaları sonucunda ham suyun TS ve kalsiyum konsantrasyonlarının ham sudaki başlangıç değerlerine göre azaldığı Şekil 3'de görülmektedir. Magnezyum parametresinin ise çalışma boyunca fazla bir değişim göstermediği tespit edilmiş olup sodyum parametresinin soda ilavesi ile arttığı tespit edilmiştir. TS-266'ya göre içme suları için sodyum parametresinin sınır değeri ise 175 mg/L'dir. Temel arıtma olarak KFÇ prosesinin kullanılması durumunda çıkış suyunda sodyum miktarının kontrol edilerek kontrollü olarak soda kullanılması önemli bir husustur.

Ham suya eklenmiş olan soda miktarının artırılması ile kalsiyum giderimi

arttırılabilmektedir. Fakat ham sudan kalsiyumun tamamen giderilmesi KFC metodu ile mümkün olmamaktadır [24]. Ayrıca sertlik giderimi içinde çözünürlük kısıtlamaları geçerli olup suda mevcut sertliğin çöktürme metodu ile tamamen giderilmesi mümkün değildir [1]. Dolayısıyla arıtma tesisinde kullanılacak olan soda dozunun belirlenmesinde işletme maliyeti ile birlikte oluşan atık çamur miktarı birlikte değerlendirilerek laboratuvar çalışmalarını takiben belirlenmelidir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada %99 değerinde bulanıklık ve soda ilavesi ile %81 değerinde kalsiyum giderimi elde edilmiştir. Çalışmada kullanılmış olan sodyum hidroksit koagülantı (NaOH) pahalı bir kimyasal olarak nitelendirilmekte olduğundan yerine kalsiyum hidroksit $[Ca(OH)_2]$ kimyasalının kullanılması ile işletme masrafının azaltılabileceği ve daha yüksek giderim verimi elde edilebileceği düşünülmektedir. Ayrıca içme suyu eldesinde özellikle kireç taşı oluşumunun kontrol edilmesi amacıyla bir ön arıtma prosesi olarak koagülasyon-flokülasyon ve çöktürme metodunun kullanılması neticesinde membran üzerinde meydana gelen kireç taşı tabakalaşmasının kontrol edilebileceği anlaşılmaktadır.

5. KAYNAKLAR

1. Vesilind, P.A., Morgan, S.M., Heine, L.G., 2011. Çevre Mühendisliğine Giriş, Çeviri Editörü: Prof. Dr. İsmail Toröz. Nobel Akademik Yayınları, Ankara.
2. Reynolds, T.D., Richards, P.A., 2011. Çevre Mühendisliğinde Temel İşlemler ve Süreçler. Çeviri Editörü: Ülker Bakır Öğütveren. Efil Yayınevi, Ankara.
3. Davis, M.L., 2015. Su ve Atıksu Mühendisliği Tasarım Esasları ve Uygulamaları. Çeviri Editörü: Prof. Dr. İsmail Toröz. Nobel Akademik Yayınları, Ankara.
4. Selek, Z., Karaaslan, Y., 2019. Ekosistem Esaslı Su Kalitesi Yönetimi. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Ankara.
5. <https://dobisu.marmara.edu.tr/orta-menu/yararli-bilgiler/icme-suyu-kabul-edilebilir-degerler>, Erişim Tarihi: 01.01.2021.
6. Leal, C., del Río, A.V., Mesquita, D.P., Amaral, A.L., Castro, P.M.L., Ferreira, E.C., 2020. Sludge Volume Index and Suspended Solids Estimation of Mature Aerobic Granular Sludge by Quantitative Image Analysis and Chemometric Tools. Separation and Purification Technology, 234, 116049.
7. Eroğlu, V., 2008. Su Tasfiyesi. Çevre ve Orman Bakanlığı, Ağustos 2008, Ankara.
8. 6 Temmuz 2019 tarihli ve 30823 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan İçme Suyu Temin Edilen Suların Kalitesi ve Arıtılması Hakkında Yönetmelik.
9. Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe, K.J., Tchobanoglous, G., 2005. MWH’s Water Treatment: Principles and Design. John Wiley & Sons. Hoboken, New Jersey, Amerika Birleşik Devletleri.
10. Brusseau, M.L., Pepper, I.L., Gerba, C.P., 2019. Environmental and Pollution Science, Third Edition. Academic Press, Elsevier.
11. Sillanpää, M., Ncibi, M.C., Matilainen, A., Vepsäläinen, M., 2018. Removal of Natural Organic Matter in Drinking Water Treatment by Coagulation: A Comprehensive Review. Chemosphere, 190, 54-71.
12. Berkay, A., Aydın, M.E., Pektaş, M., 1997. İçme Suyu Arıtımında Kimyasal Madde Kullanımı ve Optimizasyonu. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 3(1), 255-260.
13. Duan, J., Gregory, J., 2003. Coagulation by Hydrolysing Metal Salts. Advances in Colloid and Interface Science, 100-102, 475-502.
14. Martyn, C.N., Barker, D.J.P., Osmond, C., Harris, E.C., Edwardson, J.A., Lacey, R.F., 1989. Geographical Relation Between Alzheimer’s Disease and Aluminium in Drinking Water. The Lancet, 333(8629), 59-62.
15. Muthuraman, G., Sasikala, S., 2014. Removal of Turbidity from Drinking Water Using Natural Coagulants. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 20, 1727-1731.

16. 02 Nisan 2015 tarihli ve 29314 sayılı Resmi Gazete’de Yayımlanan Atık Yönetimi Yönetmeliği, Ankara.
17. Chang, H., Liang, H., Qu, F., Liu, B., Yu, H., Du, X., Li, G., Snyder, S.A., 2017. Hydraulic Backwashing for Low-pressure Membranes in Drinking Water Treatment: A Review. *Journal of Membrane Science*, 540, 362-380.
18. Aslan, M., 2016. *Membran Teknolojileri*. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Türkiye Çevre Koruma Vakfı, Ankara.
19. Bu, F., Gao, B., Shen, X., Wang, W., Yue, Q., 2019. The Combination of Coagulation and Ozonation as a Pre-treatment of ultrafiltration in Water Treatment. *Chemosphere*, 231, 349-356.
20. Leiknes, T., Ødegaard, H., Myklebust, H., 2004. Removal of Natural Organic Matter (NOM) in Drinking Water Treatment by Coagulation-microfiltration Using Metal Membranes. *Journal of Membrane Science*, 242, 47-55.
21. Zularisam, A.W., Ismail, A.F., Salim, M.R., Sakinah, M., Matsuura, T., 2009. Application of Coagulation-ultrafiltration Hybrid Process for Drinking Water Treatment: Optimization of Operating Conditions Using Experimental Design. *Separation and Purification Technology*, 65, 193-210.
22. Al-Amoudi, A.S., 2010. Factors Affecting Natural Organic Matter (NOM) and Scaling Fouling in NF membranes: A review. *Desalination*, 259, 1-10.
23. Zak, D., Hupfer, M., Cabezas, A., Jurasinski, G., Audet, J., Kleeberg, A., McInnes, R., Kristiansen, S.M., Petersen, J., Liu, H., Goldammer, T., 2020. Sulphate in Freshwater Ecosystems: A Review of Sources, Biogeochemical Cycles, Ecotoxicological Effects and Bioremediation. *Earth-science Reviews*, 212, 103446.
24. Petrucci, R.H., Herring, F.G., Madura, J.D., Bissonnette, C., 2012. *Genel Kimya İlkeler ve Modern Uygulamalar*. Onuncu Baskında Çeviri, Palme Yayınevi, Ankara.
25. APPA, AWWA, WEF, 2012. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association, New York.
26. U.S. EPA., 1994. Method 200.7: Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry, Revision 4.4. Cincinnati, OH.
27. DIN 38 404-C2-4. German Standard Methods for The Examination of Water, Waste Water and Sludge.
28. 30 Kasım 2012 tarihli ve 28483 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanan Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği, Ankara.
29. Jing, M.L.W., Anua, S.M., Mazlan, N., 2019. Concentration of Magnesium, Calcium and Potassium in Drinking Water; A Comparison between Tap Water and Bore Water. *Journal of Energy and Safety Technology*, 02:01, 01-08.
30. <https://dobisu.marmara.edu.tr/ortamenu/yararli-bilgiler/icme-kullanma-suyu-parametrelerinde-bulunan-iyonlarin-fazlaliginin-insan-sagligi-uzerindeki-etkileri>, Erişim Tarihi: 01.01.2021.
31. Tchobanoglus, G., Burton, F., Stensel, H.D., 2003. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. American Water Works Association. *Journal*, 95(5), 201.
32. Eroğlu, V., 2008. *Su Tasfiyesi*. Çevre ve Orman Bakanlığı.
33. Özyonar, F., Karagözoğlu, B., 2012. İçme Sularından Elektrokoagülasyon ve Kimyasal Koagülasyon ile Bulanıklığın Giderimi. *Gazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27(1).
34. Berktaş, A., Aydın, M.E., Pektaş, M., 2011. İçme Suyu Arıtımında Kimyasal Madde Kullanımı ve Optimizasyonu. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 3(1), 255-260.
35. Khan, M.R., Wabaidur, S.M., Busquets, R., AlAmmari, A.M., Azam, M., Alsubhi, A., 2020. Trace Identification of Sulfate Anion in Bottled and Metropolitan Water Samples Collected from Various Provinces of Saudi Arabia. *Journal of King Saud University-Science*, 32, 1986-1992.

- 36.** Sadeghalvad, B., Khorshidi, N., Azadmehr, A., Sillanpää, M., 2020. Sorption, Mechanism, and Behavior of Sulfate on Various Adsorbents: A Critical Review. *Chemosphere*, 263, 128064.
- 37.** Uchymiak, M., Lyster, E., Glater, J., Cohen, Y, 2008. Kinetics of Gypsum Crystal Growth on a Reverse Osmosis Membrane. *Journal of Membrane Science*, 314, 163-172.

Fast Computation of Parameters of the Random Variable that is Logarithm of Sum of Two Independent Log-normally Distributed Random Variables

Zekeriya TÜFEKÇİ*¹ ORCID 0000-0001-7835-2741
Gökay DİŞKEN² ORCID 0000-0002-8680-0636

¹Çukurova University, Faculty of Engineering, Department of Computer Engineering, Adana
²Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Department of Electrical and Electronic Engineering, Adana

Geliş tarihi: 11.02.2022 Kabul tarihi: 21.03.2022

Atıf şekli/ How to cite: TÜFEKÇİ, Z., DİŞKEN, G., (2022). Fast Computation of Parameters of the Random Variable that is Logarithm of Sum of Two Independent Log-normally Distributed Random Variables. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37(1), 261-270.

Abstract

In this paper, two fast methods are proposed for computation of mean and variance of a random variable which is logarithm of two log-normally distributed random variables. It is shown that mean and variance can be computed using only one dimensional numerical integration method. The speed of the proposed algorithms is compared with the baseline algorithm. Simulation results showed that the first proposed method decreases the execution time by an average of 43.98 %. Simulation results also showed that the second proposed method is faster than the first proposed method for the variances greater than 0.325.

Keywords: Sum of log-normally distributed random variables, Parallel model combination, Numerical integration, Robustness.

İki Bağımsız Log-Normal Dağıtılmış Rastgele Değişkenin Toplamının Logaritması Olan Rastgele Değişkenin Parametrelerinin Hızlı Hesaplanması

Öz

Bu çalışmada, iki log-normal dağılımlı rasgele değişkenin logaritması olan rasgele değişkenin ortalama ve varyansını hesaplamak için iki hızlı metot sunulmuştur. Ortalama ve varyansın sadece bir boyutlu nümerik integral metodu ile hesaplanabileceği gösterilmiştir. Önerilen algoritmanın hızı temel algoritmanın hızı ile karşılaştırılmıştır. Benzetim sonuçları önerilen ilk yöntemin çalışma zamanını ortalama %43,98 azalttığını göstermiştir. Benzetim sonuçları ayrıca önerilen ikinci metodun 0,325'ten büyük varyanslar için birinci yöntemden daha hızlı olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Log-normal dağılımlı rasgele değişkenlerin toplamı, Paralel model kombinasyonu, Nümerik integral, Gürbüzlük

*Corresponding author (Sorumlu yazar): Zekeriya TÜFEKÇİ, ztufekci@cu.edu.tr

1. INTRODUCTION

The parameters of a random variable that represents the log of sum of two log-normally distributed random variables, are required to be estimated for some signal processing applications. These parameters can be used for estimating the distribution of sum of log normally distributed random variables [1,2], and for the Parallel Model Combination (PMC) [3-6] which is our main case for developing the methods proposed in this paper.

The sum of log-normal random variables has applications in many fields such as telecommunication [1,7,8], financial modelling [9], physics [10], and so forth. Many techniques have been developed for estimating distribution of sum of log-normally distributed random variables [1,2, 7,8]. Schwartz-Yeh [1] method and the method proposed in [2] need to use parameters of log of sum of log-normally distributed random variables. Therefore, methods proposed in this paper for estimating the parameters of the log of sum of two log-normally distributed random variables can be used for estimating the distribution of sum of log-normally distributed random variables [1,2].

The PMC is a technique for estimating the noisy speech models using the noise and clean speech models. Noise severely degrades the performance of speech recognition systems [11]. The PMC is one of the most effective techniques used for speech recognition under noisy conditions. In PMC, the noisy speech model parameters are estimated using the clean speech models and noise model. Estimating the noisy speech model parameters is almost the same as estimating the parameters of a random variable which is obtained by taking the logarithm of the sum of two log-normally distributed random variables. Therefore, the method proposed in this paper can be used as a part of numerical integration based PMC.

There are three different PMC techniques which are log-normal approximation [3], data-driven approach [4,5] and numerical integration [6]. The

numerical integration technique estimates the noisy speech model parameters with the highest accuracy among the other PMC methods but demands the highest computation time. In this paper, we propose two new fast methods which can be used in PMC, for estimating the parameters (mean and variance) of logarithm of random variable which is obtained by adding two log-normally distributed random variables. Numerical integration-based PMC method is explained in [6], however, the accuracy of the estimated parameters and computational complexity of the numerical integration method are not discussed in this paper. In this paper, we discuss the accuracy and computational complexity of the proposed numerical integration methods.

2. ADDING TWO LOG-NORMALLY DISTRIBUTED RANDOM VARIABLES

Let S_i and N_i be two independent Gaussian random variables with means μ_{s_i} , μ_{n_i} and variances σ_{s_i} , σ_{n_i} , respectively. We define a new random variable O_i such that

$$O_i = \log(e^{S_i} + e^{N_i}) = S_i + \log(1 + e^{X_i}) \quad (1)$$

where $X_i = N_i - S_i$. X_i is also a Gaussian random variable with mean $\mu_{X_i} = \mu_{n_i} - \mu_{s_i}$ and variance $\sigma_{X_i}^2 = \sigma_{n_i}^2 + \sigma_{s_i}^2$ since S_i and N_i are Gaussian random variables. We want to compute the mean and variance of the random variable O_i . There is no closed form of solution for mean and variance. Two dimensional numerical integration can be used to compute mean and variance. However, dimension of integration can be reduced to one as follows. Let us drop the index i for the sake of simplicity. The mean is

$$\mu_o = \mu_s + E[\log(1 + e^X)] \quad (2)$$

The variance is;

$$\begin{aligned} \sigma_o^2 &= E\left[\left(S + \log(1+e^X)\right)^2\right] - \mu_o^2 \\ &= \sigma_s^2 + E\left[2(S - \mu_s)\log(1+e^X) + (\log(1+e^X))^2\right] \\ &\quad - \left(E\left[\log(1+e^X)\right]\right)^2 \\ &= \sigma_s^2 + E\left[2\rho^2(\mu_x - X)\log(1+e^X) + (\log(1+e^X))^2\right] \\ &\quad - \left(E\left[\log(1+e^X)\right]\right)^2 \end{aligned} \tag{3}$$

where $\rho = \frac{E\left[(X - \mu_x)(S - \mu_s)\right]}{\sigma_x \sigma_s} = \frac{-\sigma_s}{\sigma_x}$

3. COMPUTING THE MEAN AND VARIANCE USING GAUSS-HERMITE QUADRATURE

If the function $f(x)$ is well approximated by a polynomial of order $2N-1$, then Gauss-Hermite quadrature is a good estimate of the integral $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)e^{-x^2} dx$.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)e^{-x^2} dx \approx \sum_{i=1}^N w_i f(x_i) \tag{4}$$

In this case where x_i and w_i are Gauss-Hermite abscissa and weights, respectively [12] and N is the number of abscissa and weights used. It is known that if x_i is an abscissa then $-x_i$ is also an abscissa [12]. This property of abscissa reduces the number of exponents by almost a factor of two since $e^{x_i} = 1/e^{-x_i}$. The accuracies of μ_o and σ_o^2 which are computed using Equation 4 depend on how well the function $f(x)$ is approximated by a polynomial of order $2N-1$. In order to compute μ_o and σ_o^2 using Equation 4, We need to compute the following expectations:

$$E\left[\log(1+e^X)\right] = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\log\left(1+e^{\mu_x + \sqrt{2}\sigma_x x}\right)}{\sqrt{\pi}} e^{-x^2} dx \tag{5}$$

$$E\left[(\log(1+e^X))^2\right] = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\left(\log\left(1+e^{\mu_x + \sqrt{2}\sigma_x x}\right)\right)^2}{\sqrt{\pi}} e^{-x^2} dx \tag{6}$$

and

$$E\left[(X - \mu_x)\log(1+e^X)\right] = \int_{-\infty}^{+\infty} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sigma_x x \frac{\log\left(1+e^{\mu_x + \sqrt{2}\sigma_x x}\right)}{\sqrt{\pi}} e^{-x^2} dx \tag{7}$$

Computations of exponents and logarithms demand most of the computation time in computing μ_o and σ_o^2 using Gauss-Hermite quadrature. Therefore, we consider comparing only the number of exponents and logarithms. In order to compute μ_o and σ_o^2 using Equations 2-7 with N abscissa, computations of N logarithms, and $(\lfloor N/2 \rfloor + 1)$ exponents are required, where $\lfloor x \rfloor$ is the floor of x . In this paper, the algorithm which uses Equations 2-7 to compute μ_o and σ_o^2 is referred as the baseline method.

3. FAST COMPUTATION OF MEAN AND VARIANCE

In this paper, two methods for fast computation of the mean (μ_o) and variance (σ_o^2) are proposed. The first method is based on approximating the function $\log(1+e^x)$ for computing mean and variance using Gauss-Hermite quadrature. The latter method is based on approximating the functions $\log(1+e^x)$, $(\log(1+e^x))^2$, and the complementary error function $\text{erfc}(x)$ for computing μ_o and σ_o^2 .

We need to decide on the error criterion for approximating these functions. In this paper, maximum relative error is minimized to find approximate expressions for these functions. If $f(x)$ is the function and $\hat{f}(x)$ is the approximation of $f(x)$, then the relative error is defined as

$$\left| \frac{f(x) - \hat{f}(x)}{f(x)} \right| \tag{8}$$

$\log(1+e^x)$ can be approximated as

$$\log(1+e^x) \approx \sum_{i=1}^K a_i e^{ix} = \sum_{i=1}^K a_i (e^x)^i \text{ for } x \leq 0 \quad (9)$$

where a_i 's are chosen to minimize the error for the given criteria, and K is the number of coefficients. One exponent, one logarithm and one addition are needed to compute $\log(1+e^x)$. However, the number of arithmetic operations can be replaced by one exponent, $(K-1)$ additions, an $2(K-1)d$ multiplications using equation (9). For $x > 0$, $\log(1+e^x)$ can be computed using the equality $\log(1+e^x) = x + \log(1+e^{-x})$. Similarly, $[\log(1+e^x)]^2$ can be approximated as

$$[\log(1+e^x)]^2 \approx \sum_{i=2}^M b_i e^{ix} \text{ for } x \leq 0 \quad (10)$$

where b_i 's are chosen to minimize the error for the given criteria, $(M - 1)$ is the number of coefficients. $\text{erfc}(x)$ can be approximated using

$$\text{erfc}(x) \approx e^{-x^2} \sum_{i=1}^R c_i t^i \text{ for } x \geq 0 \quad (11)$$

where $t = \frac{1}{1+ax}$ and R is the number of coefficients. a , and c_i 's are chosen to minimize the error between $\text{erfc}(x)$ and the approximation of $\text{erfc}(x)$ for the given criteria. $\text{erfc}(x)$ can be computed using $\text{erfc}(x) = 2 - \text{erfc}(-x)$ for $x \leq 0$. For all the functions that were approximated, maximum relative error is minimized, and Parks-McClellan [13] algorithm is used to find the approximations of these functions. Table I shows the maximum relative approximation errors in percentage for 3, 4, 5 and 6 coefficients for the functions $\log(1+e^x)$, $(\log(1+e^x))^2$, and $\text{erfc}(x)$.

Table 1. Maximum relative approximation errors in percent

#of coefficients	3	4	5	6
$\log(1+e^x)$	0.283	0.039	0.006	0.0008
$[\log(1+e^x)]^2$	0.948	0.152	0.024	0.0039
$\text{erfc}(x)$	0.237	0.053	0.009	0.0017

4.1. Fast Computation of Mean and Variance Using Gauss-Hermite Quadrature

The baseline method requires computations of N logarithms, and $(\lfloor N/2 \rfloor + 1)$ exponents for computing μ_o and σ_o^2 where N is the number of abscissa. These $(\lfloor N/2 \rfloor + 1)$ exponents, and N logarithms can be replaced by only $(\lfloor N/2 \rfloor + 1)$ exponents by approximating the $\log(1+e^{\mu_x + \sqrt{2}\sigma_x x})$ using Equation 9. This approximation significantly reduces computational complexity. We call this algorithm as fast version of Gauss-Hermite quadrature (fast version of baseline) method for computing μ_o and σ_o^2 in this paper.

4.2. Fast Computation of Mean and Variance by Approximating the Functions

Gaussian-Quadrature method approximates the integral. However, in this section, we propose to approximate the functions for fast computation of mean and variance. In order to compute μ_o and σ_o^2 , we need to compute expected values of $[(X-\mu_x)\log(1+e^X)]$, $\log(1+e^X)$, and $(\log(1+e^X))^2$. Approximate values of these expected values can be computed as follows. We assume $\mu_x \leq 0$ for the sake of simplicity.

$$\begin{aligned} & E[(X - \mu_x) \log(1 + e^X)] \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sigma_x x \frac{\log(1 + e^{\mu_x + \sqrt{2}\sigma_x x})}{\sqrt{\pi}} e^{-x^2} dx \quad (12) \\ &\approx 0.5\sigma_x^2 \left[e^{-0.5\frac{\mu_x^2}{\sigma_x^2}} \left(\sum_{i=1}^R c_i t_0^i - \sum_{k=1}^K k a_k \sum_{i=1}^R c_i t_k^i \right) + \sum_{k=1}^K k a_k e^{0.5k^2\sigma_x^2 + k\mu_x} \text{erfc}\left(\frac{\mu_x + k\sigma_x^2}{\sqrt{2}\sigma_x}\right) \right] \end{aligned}$$

where $t_k^i = 1 / \left(1 + a \left(\frac{-\mu_x + k\sigma_x^2}{\sqrt{2}\sigma_x} \right) \right)^i$. $\text{erfc}(x)$ can be computed using Equation 11.

$$\begin{aligned}
 E[\log(1+e^x)] &= \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\log(1+e^{\mu_x+\sqrt{2}\sigma_x x})}{\sqrt{\pi}} e^{-x^2} dx \\
 &= \int_{\frac{\mu_x}{\sqrt{2}\sigma_x}}^{+\infty} \frac{\log(1+e^{\mu_x-\sqrt{2}\sigma_x x})}{\sqrt{\pi}} e^{-x^2} dx + \\
 &\quad \int_{\frac{-\mu_x}{\sqrt{2}\sigma_x}}^{+\infty} \frac{(\mu_x+\sqrt{2}\sigma_x x+\log(1+e^{-\mu_x-\sqrt{2}\sigma_x x}))}{\sqrt{\pi}} e^{-x^2} dx \quad (13) \\
 &\approx 0.5e^{-0.5\frac{\mu_x^2}{\sigma_x^2}} \left[\sigma_x \sqrt{\frac{2}{\pi}} + \mu_x \sum_{i=1}^R c_i t_0^i + \sum_{k=1}^K a_k \sum_{i=1}^R c_i t_k^i \right] \\
 &\quad + 0.5 \sum_{k=1}^K a_k e^{0.5k^2\sigma_x^2+k\mu_x} \operatorname{erfc}\left(\frac{\mu_x+k\sigma_x^2}{\sqrt{2}\sigma_x}\right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E[(\log(1+e^x))^2] &= \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{(\log(1+e^{\mu_x+\sqrt{2}\sigma_x x}))^2}{\sqrt{\pi}} e^{-x^2} dx \\
 &= \int_{\frac{\mu_x}{\sqrt{2}\sigma_x}}^{+\infty} \frac{(\log(1+e^{\mu_x-\sqrt{2}\sigma_x x}))^2}{\sqrt{\pi}} e^{-x^2} dx + \\
 &\quad \int_{\frac{-\mu_x}{\sqrt{2}\sigma_x}}^{+\infty} \frac{(\mu_x+\sqrt{2}\sigma_x x+\log(1+e^{-\mu_x-\sqrt{2}\sigma_x x}))^2}{\sqrt{\pi}} e^{-x^2} dx \quad (14) \\
 &\approx 0.5e^{-0.5\frac{\mu_x^2}{\sigma_x^2}} \left[\begin{aligned} &2\mu_x \sum_{k=1}^K a_k \sum_{i=1}^R c_i t_k^i - 2\sigma_x^2 \sum_{k=1}^K k a_k \sum_{i=1}^R c_i t_k^i + \\ &(\mu_x^2 + \sigma_x^2) \sum_{i=1}^R c_i t_0^i + \frac{\sqrt{2}\sigma_x}{\sqrt{\pi}} \left(\mu_x + 2 \sum_{k=1}^K a_k \right) + \\ &\sum_{k=2}^M b_k \sum_{i=1}^R c_i t_k^i \end{aligned} \right] \\
 &\quad + 0.5 \sum_{k=2}^M b_k e^{0.5k^2\sigma_x^2+k\mu_x} \operatorname{erfc}\left(\frac{\mu_x+k\sigma_x^2}{\sqrt{2}\sigma_x}\right)
 \end{aligned}$$

$e^{0.5k^2\sigma_x^2+k\mu_x} \operatorname{erfc}\left(\frac{\mu_x+k\sigma_x^2}{\sqrt{2}\sigma_x}\right)$ can be computed as

$$\begin{cases} e^{-0.5\frac{\mu_x^2}{\sigma_x^2}} \sum_{i=1}^R \frac{c_i}{(1+ay_k)^i} & \text{if } y_k \geq 0 \\ 2e^{0.5k^2\sigma_x^2+k\mu_x} - e^{-0.5\frac{\mu_x^2}{\sigma_x^2}} \sum_{i=1}^R \frac{c_i}{(1-ay_k)^i} & \text{else} \end{cases} \quad (15)$$

where $y_k = \left(\frac{\mu_x+k\sigma_x^2}{\sqrt{2}\sigma_x}\right)$. Computation of logarithm and exponent of a number using a computer takes a long time compared to addition, multiplication and division of numbers. Despite many additions, multiplications and divisions are used, only three exponents $\left(e^{\mu_x}, e^{0.5\sigma_x^2}, \text{ and } e^{-0.5\frac{\mu_x^2}{\sigma_x^2}}\right)$ are used for computing μ_0 and σ_0^2 in the method proposed in this section. Therefore, the method proposed in this section could demand less computation time compared to the Gauss-Hermite Quadrature method. We call the method proposed in this section as the second proposed method.

The method proposed in this section has an advantage and a disadvantage over the baseline or the fast version of the baseline method. The advantage is that, the percent relative error in σ_0^2 does not increase as σ_x^2 increases for the given number of coefficients used to compute σ_0^2 and μ_0 using the method proposed in this section unlike the baseline or the fast version of baseline method.

The disadvantage is that, there are subtractions in computing σ_0^2 and μ_0 using the method proposed unlike the baseline method or fast version of the baseline method. When we subtract one number from the other that are close to each other, there will be loss of significance [14]. When the value of σ_x^2 is small, there will be subtraction of one number from the other that are close to each other. Therefore, the relative error will increase substantially due to the loss of significance, when the value of σ_x^2 is small. As a result, for small values of σ_x^2 , we may need to use more coefficients to keep the relative percent error under a prescribed value if we use the method described in this section. However, a few abscissa will be enough for computing σ_0^2 and μ_0 for small values

of σ_x^2 using the baseline method or fast version of baseline method. Experimental results which discuss these will be given in the next section.

5. EXPERIMENTAL RESULTS

Accuracy for both proposed methods and the baseline method depends on the parameters σ_x^2 and μ_x . Therefore, we must decide on ranges of σ_x^2 and μ_x . We must also decide on the maximum acceptable errors for σ_o^2 and μ_o . In this paper, the speeds of the proposed methods and baseline method were compared for $0 < \sigma_x^2 \leq 1000$, $-100 \leq \mu_x \leq 0$, and the maximum relative error in σ_o^2 less than 1%.

Since we use numerical integration method to compute the parameters, it is not possible to compute the exact values of the parameters. Consequently, we must decide on the error. The percent relative error criterion is used in the experiments. $100 \left(\frac{\hat{\sigma}^2 - \sigma^2}{\sigma^2} \right)$ gives the percent error for variance where σ^2 is the true variance and $\hat{\sigma}^2$ is the computed variance. However, percent error criterion is not appropriate for the mean since the value of mean could be zero. $100 \left(\frac{\hat{\mu} - \mu}{\sigma} \right)$ could be a good criterion for the mean where μ is the true mean and $\hat{\mu}$ is the computed mean. Experimental results showed that when the error criterion for variance is satisfied, the error criterion for mean will also be satisfied. Therefore, we consider to

satisfy only the error criterion for variance. After setting these error criteria, we can compare the computational complexity of the proposed methods and the baseline method.

Since the number of additions, subtractions and multiplications depend on the values of μ_x , and σ_x^2 , it is not easy to compare computational complexity of the proposed methods and baseline method. Therefore, we executed the baseline algorithm and the proposed algorithms for estimating the parameters for 1000×1000 times on a computer with an intel i7 860 CPU without parallelizing the algorithm, and compared the execution time. To do this, the ranges of μ_x and σ_x^2 were divided into 1000 equally spaced values and for each value of μ_x the algorithm were run for these 1000 different σ_x^2 values.

We run an experiment to compare the execution time of baseline method and fast version of baseline method. Figure 1 shows the percent decrease in execution time for the fast version of baseline algorithm over the baseline algorithm for the number of abscissa from 3 to 190. We set the number of coefficients K as 5 for approximating $\log(1+e^X)$. There are 31.19% and 44.75% decreases in execution time for 3 and 190 coefficients, respectively. The average (over all coefficients) decrease in execution time is 43.98%.

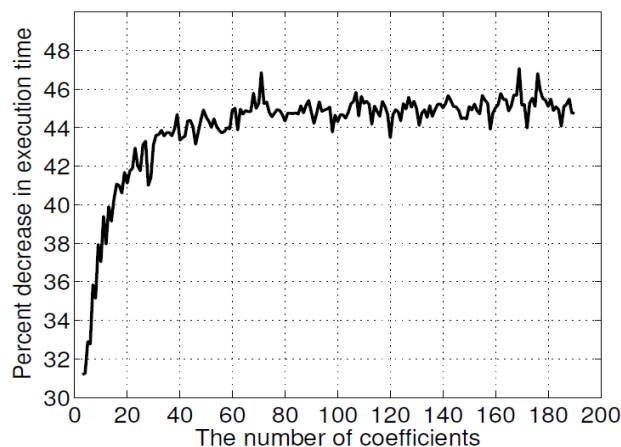


Figure 1. Number of coefficients versus percent decrease in execution time

We run an experiment to analyze the execution time compared to the number of coefficients. Figure 2 shows normalized execution time versus number of abscissa. The normalized execution time increases as the number of abscissa increase as expected since the number of exponents which demand most of execution time increases linearly as the number of abscissa increases.

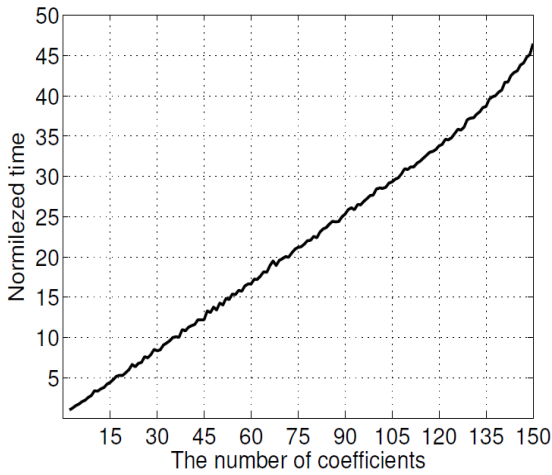


Figure 2. Number of coefficients versus normalized execution time for the fast version of baseline method

We run an experiment to find the maximum value of variance σ_x^2 that makes the maximum relative percent error in σ_0^2 less than one. The main effects on the error are the values of σ_x^2 , and μ_x for both baseline method and fast version of baseline method. We approximate $\log(1+e^X)$ for the fast version of baseline method. Since the approximation error for $\log(1+e^X)$ is very small (less than 0.00567% for $K=5$) the percent relative errors for both baseline and fast version of baseline method are almost same for the given σ_x^2 value, μ_x value, and number of abscissa. Figure 3 shows number of coefficients versus variance (σ_x^2) that makes the maximum relative percent error in σ_0^2 less than 1 when $-100 \leq \mu_x \leq 0$. Similarly, Figure 4 shows number of coefficients versus variance (σ_x^2) that makes the maximum relative percent error in σ_0^2 less than 1 when $-10 \leq \mu_x \leq 0$. From these

figures, we can conclude that both σ_x^2 and μ_x have significant effects on the number of abscissa that keeps the relative percent error under one. The ranges of μ_x are from -100 to 0 for Figure 3 and from -10 to 0 for Figure 4. We can observe from Figure. 3 and Figure 4 that less coefficients are needed to keep the maximum relative percent error in σ_0^2 under one when the range of μ_x is small. We can also conclude from Figure 3 and Figure 4 that the execution time increases as the variance (σ_x^2) increases since more coefficients are needed to keep the relative percent error in σ_0^2 less than 1 for large values of σ_x^2 .

Table 2 shows the same information for Figure 3 and Figure 4 in terms of number of abscissas from 2 to 11 in addition to the normalized time for the fast version of baseline method. The first column shows the number of abscissa, second column shows the maximum variance value that keeps the percent error in σ_0^2 under 1 for $-100 \leq \mu_x \leq 0$ for the given number of abscissa. Similarly, the third column shows the maximum variance value that keeps the percent error in σ_0^2 under one for $-10 \leq \mu_x \leq 0$ for the given number of abscissa. The last column shows the normalized execution time for the given number of abscissa.

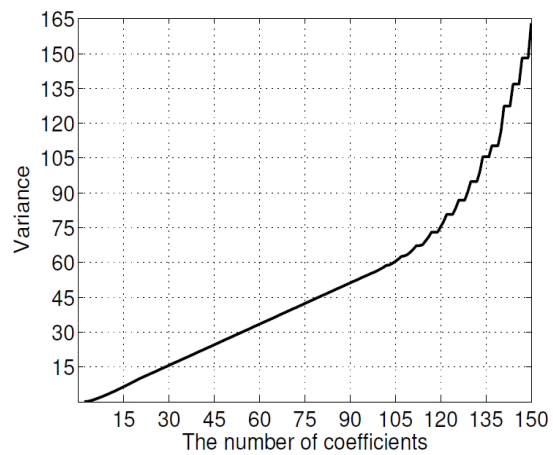


Figure 3. Variance σ_x^2 versus number of coefficients for $(-100 \leq \mu_x \leq 0)$, and relative error in σ_0^2 less than 1% for the fast version of baseline method.

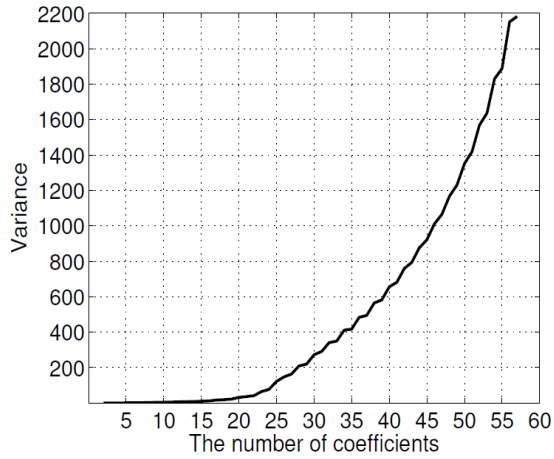


Figure 4. Variance σ_x^2 versus number of coefficients for $(-10 \leq \mu_x \leq 0)$, and relative error in σ_0^2 less than 1% for the fast version of baseline method

We used 3, 4, and 5 coefficients for approximations of $\log(1 + e^x)$, $(\log(1 + e^x))^2$, and $\text{erfc}(x)$, respectively for computation of σ_0^2 and μ_0 using the second proposed method. These

coefficients are given in Table III. Finally, we run an experiment to see the speed and accuracy of the second proposed method. We measured the normalized execution time as 1.873 for this method. The good thing about the second proposed method is that the normalized execution time does not increase (1.873 seconds) as the variance σ_x^2 increases unlike the baseline and the fast version of baseline methods. The experimental results showed that the percent error in σ_0^2 is less than 1 when $\sigma_x^2 > 0.325$ and $-100 \leq \mu_x \leq 0$. From these results we realize that the fastest method which keeps the percent error in σ_0^2 less than one is the second proposed method for computing σ_0^2 and μ_0 for $-100 \leq \mu_x \leq 0$ and $\sigma_x^2 > 0.325$. The fastest method is the fast version of baseline method for $\sigma_x^2 \leq 0.325$ as seen from Table II. The fast version of baseline method that uses 2, 3, 4, and 5 abscissa will be the fastest method for $\sigma_x^2 \leq 0.008$, $0.008 \leq \sigma_x^2 \leq 0.144$, $0.144 \leq \sigma_x^2 \leq 0.438$, and $0.438 \leq \sigma_x^2 \leq 0.830$, respectively for $-100 \leq \mu_x \leq 0$ as seen from Table II.

Table 2. Number of coefficients versus variances (σ_x^2) and normalized execution time for fast version of baseline method that keeps the relative percent error in σ_0^2 less than one

Functions	Index	Coefficients
$\log(1+e^x)$	1	0.9971742202972404545136
	2	-0.4437795339412708983673
	3	0.1417111754378272969746
$[\log(1+e^x)]^2$	2	0.9984854111176986179999
	3	-0.9510743713797964460355
	4	0.6370018861419275424396
	5	-0.204687600754972720551
$\text{erfc}(x)$	1	0.3179095096078142779206
	2	0.3202728919600088541841
	3	0.2377829824350161658231
	4	0.2941637083449997192020
	5	-0.1702177063239194154676
	a	0.56353

Table 3. Coefficient values for approximation $\log(1 + e^x)$, $[\log(1 + e^x)]^2$, and $\operatorname{erfc}(x)$ which are used for the experiments

# of coef-ficients	Variance (σ_x^2) ($-100 \leq \mu_x \leq 0$)	Variance (σ_x^2) ($-10 \leq \mu_x \leq 0$)	Normalized time
2	0.008	0.008	1.0
3	0.144	0.144	1.231
4	0.438	0.438	1.531
5	0.830	0.832	1.723
6	1.282	1.291	2.023
7	1.773	1.819	2.208
8	2.292	2.659	2.554
9	2.835	3.395	2.777
10	3.397	4.199	3.385
11	4.574	5.096	3.331

6. CONCLUSIONS

Two new fast methods were proposed to compute the mean and variance of the logarithm of a random variable which is obtained by adding two log-normally distributed random variables. It is shown that the first proposed method which is called the fast version of baseline method is the fastest method for $\sigma_x^2 \leq 0.325$ and $-100 \leq \mu_x \leq 0$, and the second proposed method is the fastest method for $\sigma_x^2 \geq 0.325$ and $-100 \leq \mu_x \leq 0$ which keeps the percent errors in σ_0^2 under one. In addition to this, the execution time for the second proposed method does not increase as the variance σ_x^2 increases unlike the baseline and the fast version of baseline method. The future work could be exploring fast algorithms for computing the covariance between the random variables which are logarithm of random variables obtained by adding two log-normally distributed random variables.

7. REFERENCES

1. Schwartz, S., Yeh, Y., 1982. On the Distribution Function and Moments of Power Sums with Lognormal Components. *Bell Syst. Tech. Journal*, 61, 1441–1462.
2. Li, X., Wu, Z., Chakravarthy, V.D., Wu, Z., 2011. A Low-complexity Approximation to Lognormal Sum Distributions via Transformed Log Skewnormal Distribution. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 60(8), 4040–4045.
3. Gales, M.J.F., Young, S.J., 1993. Cepstral Parameter Compensation for HMM Recognition in Noise. *Speech Communications*, 12, 231–240.
4. Gales, M.J.F., Young, S.J., 1995. A Fast and Flexible Implementation of Parallel Model Combination. In *Proceedings of ICASSP*, Detroit Michigan USA, 133–136.
5. Gales, M.J.F., Young, S.J., 1996. Robust Continuous Speech Recognition Using Parallel Model Compensation. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 4(5), 352–359.
6. Gales, M.J.F., Young, S.J., 1995. Robust Speech Recognition in Additive and Convolutional Noise Using Parallel Model Combination. *Computer Speech and Language*, 9, 289–307.
7. Fenton, L.F., 1960. The Sum of Lognormal Probability Distributions in Scatter Transmission Systems. *IRE Transactions on Communications Systems*, 8, 57–67.
8. Neelesh, B., Wu, B.J., Molisch, A.F., Zhang, J., 2007. Approximating a Sum of Random Variables with a Lognormal. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 6(7), 2690–2699.
9. Milevsky, M., Posner, S., 1998. Asian Options, the Sum of Lognormals and the Reciprocal Gamma Distribution. *Journal of Financial and Quantitative Analysis*, 33(3), 409–422.

10. Romeo, M., Da Costa, V., Bardou, F., 2003. Broad Distribution Effects in Sums of Lognormal Random Variables. *The European Physical Journal B*, 32(4), 513–525.
11. Gong, Y., 1995. Speech Recognition in Noisy Environments: a Survey. *Speech Communications*, 16, 261–291.
12. Abramowitz, M., Stegun, I.A., 1965. *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs and Mathematical Tables*. New York, USA: Dover, Publications.
13. Oppenheim, A.V., Schafer, R.W., 1989. *Discrete-Time Signal Processing*. Englewood Cliffs, New Jersey, USA: Prentice-Hall, Inc.
14. Kincaid, D., Cheney, W., 1996. *Numerical Analysis*. California, USA: Brooks/Cole Publishing Company.

2007 ve 2018 Yılları Türkiye Deprem Yönetmeliklerine Göre Zemin Parametreleri ve Deprem Verilerinin Karşılaştırılması; Siirt İli Vaka Çalışması

Mehmet Hayrullah AKYILDIZ*¹ ORCID 0000-0001-7239-3518

Ersin AYHAN¹ ORCID 0000-0002-2108-0199

¹Dicle Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır

Geliş tarihi: 23.06.2021

Kabul tarihi: 21.03.2022

Atıf şekli/ How to cite: AKYILDIZ, M.H., AYHAN, E., (2022). 2007 ve 2018 Yılları Türkiye Deprem Yönetmeliklerine Göre Zemin Parametreleri ve Deprem Verilerinin Karşılaştırılması; Siirt İli Vaka Çalışması. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37(1), 271-282.

Öz

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) 2018 yılında Resmi Gazetede yayımlanarak 2019 yılı ocak ayında uygulanmaya başlanmıştır. 2007 yönetmeliğine oranla içerdiği farklar nedeniyle tasarım ve analiz çıktılarında da farklar oluşmaktadır. Bu farklardan bazıları deprem ve zemin ile ilgili konu başlıkları içerisinde yer almaktadır.

Çalışmada 2007 ve 2018 deprem yönetmeliklerinde bulunan deprem ve zemin parametrelerinin elde edilmesine dair doğan farklar nedeniyle herhangi bir betonarme yapının karkas inşa seviyesinde oluşacak maliyet farklarının elde edilen metraj verilerinden ortaya çıkarılması amaçlanmıştır.

Çalışmada bu farklılıklar için bazı yaklaşımlara gidilmiştir. Siirt il merkezinde yer alan 5 mahallede bulunan parseller üzerinde yapılan zemin etüt çalışmalarının sonuçları, 2007 ve 2018 deprem yönetmelikleri esasınca ele alınan yönetmelik koşulları doğrultusunda elde edilmiş olup, bu veriler ışığında zemin özellikleri belirlenmiştir. Aynı zamanda ilgili parsellerin deprem verileri de 2007 ve 2018 yönetmelik esaslarına uygun şekilde elde edilmiştir.

Bilgisayar ortamında aynı kat sayısı ve tasarımda oluşturulan yapı modeline deprem ve zemin verileri işlenerek İdecad programında statik analizler yapılmıştır. Analiz sonucunda elde edilen kalıp, beton, donatı metraj miktarlarından güncel piyasa şartlarına göre bir maliyet kıyaslaması ile değerlendirme yapılmıştır. Bu konuda Çevre ve Şehircilik Bakanlığının 2018 yılı Birim Fiyat Poz Tariflerinden yararlanılmıştır. Yapılan çalışma sonunda 2018 yönetmeliğine uygun tasarım ile karkas yapı inşa maliyetininin 2007 yönetmeliğine oranla %1,60 civarında maliyet artışı göstereceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Türkiye Deprem Yönetmeliği, Siirt, İdecad, Zemin

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Mehmet Hayrullah AKYILDIZ, hayrullah.akyildiz@dicle.edu.tr

Comparison of Ground Parameters And Earthquake Data According To Turkish Earthquake Codes of 2007 and 2018; A Case Study, The City of Siirt

Abstract

Turkey Building Earthquake Regulation (TBDY) was published in the Official Gazette in 2018 and started to be implemented in January 2019. Due to the differences it contains compared to the 2007 regulation, differences in design and analysis outputs are also formed. Some of these differences are in the topics related to earthquake and soil.

In the study, it is aimed to reveal the cost differences that will occur at the carcass construction level of any reinforced concrete structure due to the differences in the acquisition of earthquake and soil parameters in the 2007 and 2018 earthquake codes from the obtained quantity data.

In this study, some approaches have been made for these differences. The results of the soil survey studies carried out on the parcels located in 5 neighborhoods in the city center of Siirt were obtained in line with the regulation conditions on the basis of the 2007 and 2018 earthquake regulations, and the soil properties were determined in the light of these data. At the same time, the earthquake data of the relevant parcels were obtained in accordance with the 2007 and 2018 regulations.

Earthquake and soil data were processed into the building model created with the same floor number and design in the computer environment, and static analyzes were made in the Idecad program. The mold, concrete and reinforcement quantities obtained as a result of the analysis were evaluated with a cost comparison according to the current market conditions. In this regard, the Unit Price Exposure Recipes of the Ministry of Environment and Urbanization for 2018 were used. The results show that with the design in accordance with the 2018 regulation, the cost of constructing the carcass structure will increase by 1.60% compared to the 2007 regulation.

Keywords: Turkey Earthquake Regulations, Siirt, Idecad, Ground

1. GİRİŞ

Bir deprem ülkesi olan Türkiye’de depreme dayanıklı yapı tasarımı hususu İnşaat Mühendislerinin başlıca çalışma konularından biridir. Türkiye’nin %92’lik coğrafik kısmının deprem bölgeleri sınırları içinde olduğu, nüfusunun ise %95’inin deprem tehlikesi altında olduğu bilinmektedir [1]. Geçmişten günümüze Türkiye büyük miktarda can ve mal kaybı ve yaralanmalara sebep olan depremler ile karşılaşmıştır [2]. Çalışmanın geçtiği Siirt İli de deprem riski oldukça büyük olan bir şehirdir [3]. İnşaat ömrünün sonuna gelmiş ve mevcut yönetmeliğe uygun olmayan birçok yapı bulunmaktadır [4]. Son yıkıcı depremlere bakıldığında 1999 yılı Kocaeli ve Düzce depremi, 2011 yılı Van-Erciş depremi ve son olarak da 2020

yılı Elazığ-Sivrice depremleri durumun ciddiyetini gözler önüne serecek kadar şiddetli olup çok sayıda can kaybına neden olmuştur. Son yıllarda özellikle Doğu Anadolu Fay (DAF) zonunda oluşan yoğun depremler de araştırmacıların ilgisini çekmektedir [5]. Bu konuda alınabilecek en iyi tedbir yapı ömrünü tamamlamış yapıların yenilenmesi, güçlendirilmesi gereken yapıların tekniğine uygun şekilde güçlendirilmesidir. Bina inşaatlarının tamamında, projelendirilme aşamasından inşa sürecinin tamamlanmasına kadar yönetmelik kriterlerinin tamamının doğruca anlaşılması bir şekilde uygulanması gerekmektedir. Türkiye coğrafi bakımdan fay hatlarının yoğun olduğu bir bölgede yer almaktadır. Bu bakımdan deprem yönetmelikleri deprem mühendisliği alanında yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen yeni bulguların işlenmesini zorunlu bir ihtiyaç

olarak ortaya koymakta ve güncelleme mecburiyetini doğurmaktadır. Bu nedenle depremin can ve mal kaybına sebebiyet vermesini engellemek üzere belli dönemlerde Deprem yönetmeliklerinde güncellemeler ve ilaveler yapılarak değişiklikler yapılmaktadır. Yapılan değişikliklerin yapı tasarımlarında bulunan karşılıkları ile bir önceki yönetmeliğin getirdiği uygulamalar arasında farklılıklar oluşmaktadır. Bu çalışma kapsamında en son yayımlanan iki yönetmelikte bulunan farklılıklardan yalnızca zemin parametreleri ve deprem verileri açısından bir değerlendirme yapılmıştır. Son olarak 2007 Deprem yönetmeliğinin yerine 2018 Deprem yönetmeliği uygulamaya koyulmuştur. “Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği” (TBDY) 18 Mart 2018 tarihinde ve “Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik” (DBYBHY) ise 6 Mart 2007 tarihinde yayımlanmıştır. 2018 yönetmeliği bir takım değişiklikler ve güncellemeler ile uygulanmaya başlanmıştır [6]. 2019’dan sonra yürürlüğe girmiş olan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) ile zemin parametrelerinde önemli değişiklikler yapılmış aynı zamanda zemin-yapı etkileşiminin daha gerçekçi bir şekilde modellenebilmesi sağlanmıştır [7]. Mevcut çalışmada yapılan değişiklikler kısmi açıdan ele alınmış olup, yapılan bu değişiklikler üzerinden bir kıyaslama yapılmıştır. 2007 yılı yönetmeliğinde yerel zemin sınıfları Z1, Z2, Z3, Z4 olarak tanımlanmışken zemin grupları da A, B, C, D olmak üzere 4 kısma ayrılmıştır ancak 2018 yönetmeliğinde ZA, ZB, ZC, ZD, ZE, ZF olarak tüm bilgiler bir arada olmak üzere tanımlanmıştır [8]. 2018 yılı deprem yönetmeliğinde yapılan değişiklikler yapı tasarımı ve analiz sonuçlarında 2007 deprem yönetmeliğine oranla bir takım farklılıklar göstermektedir. Çalışmada yeni ve eski deprem yönetmeliklerine göre en uygun ekonomik betonarme karkas taşıyıcı eleman kesitleri oluşturularak analiz yapılmıştır ve bu sonuçlar ile kalıp, beton, donatı metraji oranları üzerinden hem bedel hesabı yapılmış hem de yüzdelik maliyet artış oranları tespit edilmiştir. 2018 Deprem Yönetmeliğinin uygulamaya konulmasının en temel nedeni 2007 Deprem Yönetmeliğinin insan ve mal can güvenliği esasınca sahip olduğu etkisini yeni şartlar ışığında bir ihtiyaç olarak ortaya koymasıdır. Çalışma kapsamında da insan can ve

mal güvenliğini artırmak üzere yapılan değişiklikler arasında olan zemin ve deprem verilerinin elde edilmesi hususlarıdır. 2018 Deprem Yönetmeliğine yansıyan farklar uygulama koşullarında ekonomik açıdan da bir yansıma yapmaktadır. Güvenlik faktörünün yeni yönetmelikte bir ihtiyaç olarak artması ile ekonomik faktörün de ön plana çıkacağı bilindiğinden çalışmada en önemli faktörler olan ve her iki yönetmelikte de bulunan zemin ve deprem verileri üzerinden bir çalışma yapılmış ve bu çalışma sonucunda güvenlik faktörünün ekonomik faktör ile ilişkili olduğu ortaya çıkmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Muratoğlu ve Özkan (2003), geçmişteki depremlerde zemin sınıflarının yanlış belirlenmesine bağlı olarak can kaybı ve yapı hasarlarında artış olduğu kanaatine varmıştır. Çalışmalarında bu iddiayı desteklemek için yerel zemin sınıfları ile deprem bölgelerini değiştirerek yapıya ait etki eden deprem kuvvetlerini incelenmiştir. İnceleme sonucunda yapılan değişimlerin maliyeti etkilediği sonucuna varılmıştır[9].

Türkmen ve Tekeli (2005), 2 dairesi 4, 6, 8 farklı katlarda betonarme bir yapının depremsiz, 1, 2, 3, 4, 5’inci deprem bölgelerindeki Z1-Z4 arası tüm zeminlerini ayrı ayrı dikkate alarak statik analiz yapmıştır. Böylece deprem bölgeleri ve yerel zemin sınıflarının yapı maliyetine etkileri üzerinde bir değerlendirme yapmışlardır. Çalışmalarının sonucunda konut tip betonarme yapıların depreme dayanıklı olarak tasarlanıp inşa edilmesinin, yapının toplam maliyetinin %4-8 gibi bir yüzdeliğine isabet ettiği sonucuna varmışlardır[10].

Dorum ve arkadaşları (2006), 5 katlı birbirinden farklı 3 proje üzerinden bir çalışma yapmıştır. Buna göre 4 farklı zemin ve deprem sınıfı kullanılarak statik ve betonarme analizi yaparak beton, demir ve kalıp metrajlarını tespit etmiştir. Elde edilen hesaplama sonuçlarından kaba yapı maliyet değişimi incelenerek bir değerlendirme yapmışlardır. Yaptıkları çalışmaları değerlendirdiklerinde zemin sınıfı Z1-Z4 arasında

%22, 1. ve 4. Bölge arasında ise %14 civarı bir maliyet değişimi olduğu kanaatine varılmıştır [11].

Türkmen ve arkadaşları (2006), tipik bir projeden faydalanarak 1. veya 5.dereceden deprem bölgesinde farklı katlarda Z1-Z4 arası zeminlerde betonarme yapı statik analiz sonucunda elde ettikleri metraj değişimleri üzerinden maliyet hesaplaması yaparak maliyet değişimleri üzerinden bir değerlendirme yapmışlardır. Çalışma sonunda Z1 zemin özelliğine sahip çok katlı, düzensiz 1.dereceden deprem bölgesindeki karkas bir yapıda dahi maliyetin en fazla %20 civarı arttığı sonucuna varılmıştır [12].

Dikmen ve Özek (2011), farklı kolon açıklıkları olan bir grup tek katlı sanayi yapıları üzerinden karma taşıyıcı sistem modelleri üzerinden farklı zemin sınıflarını dikkate alarak yaptıkları analiz çalışmaları sonucunda farklı taşıyıcı sistem maliyetleri üzerinden kıyaslama yaparak bir değerlendirme yapmıştır. 4 zemin grubu üzerinden yaptıkları çalışma sonucunda Z1 zemin özelliğine sahip taşıyıcı sistem maliyetinin, Z2, Z3, Z4 zemin sınıflarına nazaran sırasıyla %14, %20, %49 daha az olduğu sonucuna ulaşılmıştır [13].

Keskin ve Bozdoğan (2018)'in Kırklareli yöresinde yapmış oldukları çalışmada 4 katlı bir yapıda 2007 ve 2018 yılı farklı zemin grupları kullanılarak yaptıkları çalışmalarında modelledikleri yapıda kuvvet ve yer değiştirmelerde ciddi bir artış olduğu sonucuna varılmıştır [14].

Elçi ve Göker (2018) çalışmalarında betonarme kolonların depreme karşı performanslarını 2007 ve 2018 deprem yönetmelikleri çerçevesinde ele almıştır. Çalışmaları sonucunda 2018 deprem yönetmeliği ile yapılan çalışmanın 2007 deprem yönetmeliğine oranla daha güvenli bölgede yer alan deformasyon limitlerini verdiği sonucuna varmıştır [15].

Dalyan ve Şahin (2019), 2007 ve 2018 deprem yönetmelikleri açısından deprem yükleri altında bulunan bir taşıyıcı sistemin performansını değerlendirmeye yönelik bir çalışma yapmışlardır. 5 katlı betonarme bir yapının 2 yönetmelik

bakımından doğrusal olmayan artımsal itme analizini yapmışlardır. Çalışmaları sonucunda 2018 deprem yönetmeliğine göre etkin yapı periyotları ve yer değiştirme talebinin daha fazla çıktığı elde edilmiştir [16].

Karaca ve arkadaşları (2020), çalışmalarında yapısal tasarım bağlamında 2007 ve 2018 deprem yönetmeliklerini Niğde özelinde karşılaştırmışlardır. Çalışmaları sonucunda yeni yönetmeliğe göre tasarlanacak bir yapı da beton miktarının daha da artacağı, ancak donatıda ise tam tersi azalma eğilimi olduğu anlaşılmıştır [17].

Daha önce yapılmış olan çalışmalar, deprem ve zemin parametrelerinin göz önüne alınması ve değerlendirilmesinde yapılacak değişimlerin, yapı toplam maliyetinde değişime sebep olacağını göstermektedir. Önceki çalışmalar değişen yönetmelik sonrası gerçekleştirilen bu çalışmanın ortaya koyacağı sonuçların önemini destekler niteliktedir.

Yapılan literatür çalışmaları sonucunda mevcut çalışmaya benzer çalışmalar olduğu tespit edilmiştir. Ancak TBDY 2018 'in uygulamaya geçilmesi ile beraber oluşan yeni şartlarda güncel benzer bir çalışma ihtiyacı doğmuştur. Böylece bu çalışma ile uygulamaya geçen yeni yönetmeliğin getirdiği yenilik ve güncellemelerden kaynaklı ortaya çıkan yeni bir analiz ihtiyacı ele alınarak incelenmiştir.

3. MATERYAL VE METOT

Her ülkede olduğu gibi Türkiye'de de güncellenen yönetmelikler ilave sorumluluk yükleyebildiğinden ilave maliyetler ortaya çıkarabilir. Çalışma kapsamında Siirt il merkezindeki farklı bölgelerin 2007 ve 2018 yılı yerel zemin sınıfı ve deprem bölgesi verileri kullanılmıştır. Idecad programının sınırlı demo versiyonu ile statik analiz yapılarak farklı sonuçlar elde edilebileceği gösterilmiştir.

Siirt il merkezindeki farklı mahallelere ait zemin ve deprem verileri Çizelge 1'de verilmiştir. Çizelge 2'de ise ilgili parsellerin zemin sınıflarının

2007 ve 2018 yönetmelikleri kapsamındaki karşılıkları verilmiştir. Çalışması yapılan tüm arazilerde eğim %5'in altındadır. Zemin parametrelerini belirlemek üzere her zeminde sondaj kuyuları açılmış olup sondaj sırasında alınan karot numuneleri bakanlıkça izne sahip özel yetkili bir laboratuvarda işleme alınmıştır. Zemin inceleme alanlarında yer altı su seviyesine rastlanmamıştır. İnceleme alanı ve çevresinde eski ve yeni afet izlerine rastlanmamıştır. 7269 sayılı yasa kapsamına girebilecek heyelan, kaya düşmesi, çığ vb bir doğal afet riski taşımadığı zemin etüt raporlarında ifade edilmiştir. Çalışma alanlarının zemin profillerinde üst metrelerde katı yağlı killerin hakimiyeti gözlemlenmektedir. Yer yer ulaşılabilir derinlikte kireçtaşı tabakaları kesilmiştir. Yapı temelleri büyük çoğunlukla şişme potansiyeline sahip kil birimlere oturtulmaktadır. Yapılan arazi ve laboratuvar deneyleri sonucu elde edilen verilere göre bölgede sıvılaşma

potansiyeline sahip zeminlerin bulunmadığı ayrıca sondaj çalışmalarında YASS'nin varlığına rastlanılmadığının rapor edilmesinden ötürü detaylı sıvılaşma analizine gerek olmadığı tespiti yapılmıştır. Gerek az çakıllı killerin gerekse killi seviyelerin su ile tepkimesi sonucu kimyasal bir erime özelliği olsa da temelin oturacağı zemin birimleri üzerinde su ile eriyebilen kayaç özelliğini göstermediği tespiti yapılmıştır.

Çizelge 1'de her ada parsel taşınmaz için 2007 deprem yönetmeliği kapsamında zemin sınıfı/grub'u, 2018 deprem yönetmeliği kapsamında ise zemin sınıfı ve deprem bölgesi ivme değerleri verilmiştir. Çizelgede verilen değerler idestatik analizi için deprem ve zemin bilgisi istenen bilgilerden oluşmaktadır. Analiz öncesi bu değerlerin tanımı yapılarak bir analiz yapılmıştır.

Çizelge 1. Çalışmada göz önüne alınan bölgelerin 2007 ve 2018 Deprem Yönetmeliklerine göre zemin sınıfları ve deprem bölgeleri

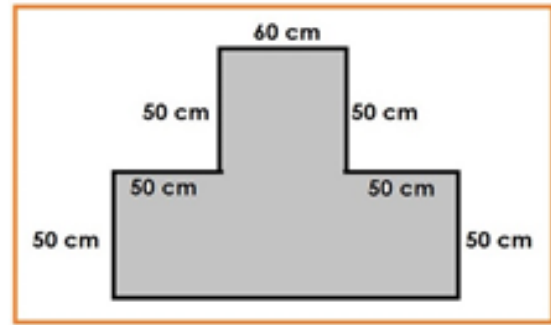
No	Mahalle adı Ada-parcel Yüzölçümü-çekme payları sonucu net inşaat alanı (m ²)	2007 Deprem yön.		2018 Deprem yön.		İmar izni kat sayısı
		Zemin sınıf/Grup	Deprem bölgesi	Zemin sınıfı	Deprem bölgesi parametreler	
1	Kooperatif Mahallesi 455 ada 64 parsel 350 m ² – 210 m ²	Z3 / C	1	ZD	S _s =0,569 S ₁ =0,149	7
2	Yenimahalle 408 ada 25 parsel 1351 m ² – 900 m ²	Z3 / C	1	ZD	S _s =0,570 S ₁ =0,149	7
3	Yenimahalle 399 ada 15 parsel 1429,75 m ² –1143 m ²	Z3 / C	1	ZD	S _s =0,570 S ₁ =0,149	8
4	Kooperatif Mahallesi 305 ada 24 parsel 733,26 m ² -416 m ²	Z3 / C	1	ZD	S _s =0,566 S ₁ =0,149	7
5	Bahçelievler Mahallesi 462 ada 3 parsel 334,96 m ² -146 m ²	Z3 / C	1	ZD	S _s =0,567 S ₁ =0,149	6

Çizelge 2. 2007 Yönetmeliğine göre Z3 zemin sınıfı ve C grubu ile 2018 yönetmeliğine göre ZD zemin sınıfına ait veri ve açıklama

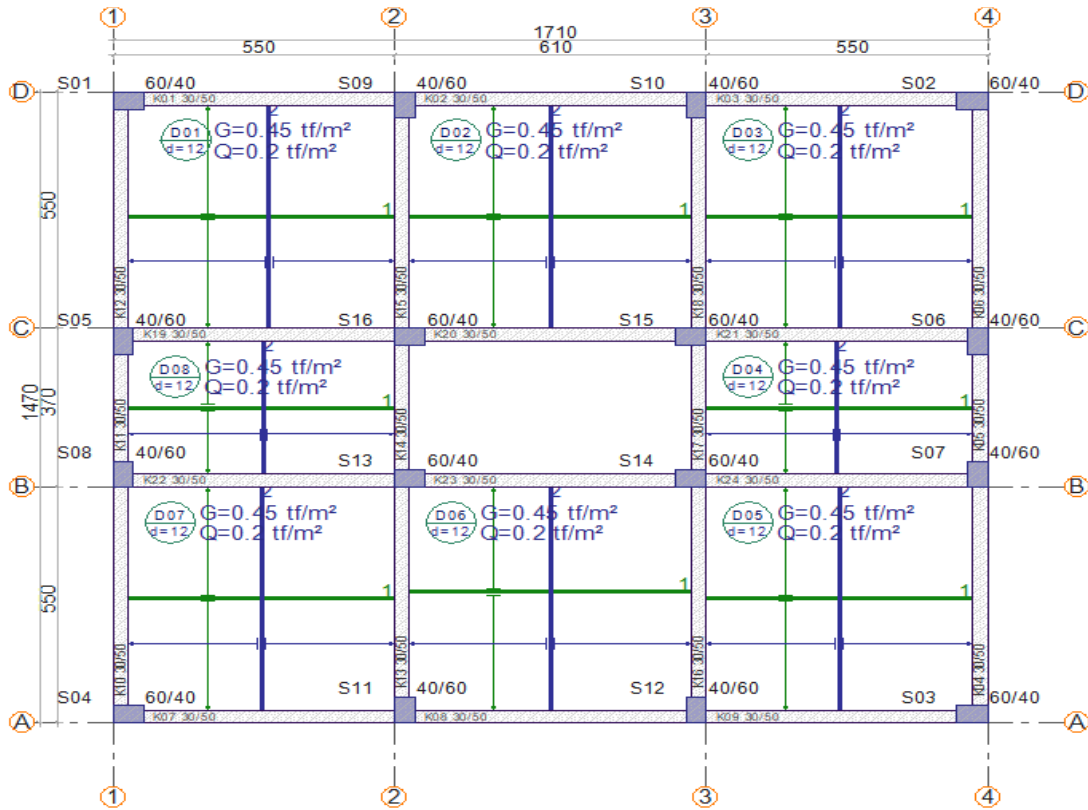
2007 TDY Z3 Sınıfı C Grubu zeminler	Yumuşak süreksizlik düzlemleri bulunan çok ayrılmış metamorfik kayaçlar ve çimentolu tortul kayaçlar... Orta-sıkı kum-çakıl... Katı kil ve siltli kil...
2018 TBDY ZD Zemin sınıfı	Orta sıkı- sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları

Çizelge 1’de 5 adet parselde ait zemin ve deprem bilgileri bulunmaktadır. Ayrıca mahalle, ada ve parsel numaraları belirtilen arsaların yüzölçümü ve imar kapsamında izin verilen inşaat taban alanı bilgileri yer almaktadır. Kat sayıları parselden parselde mevcut imarda değişkenlik gösterse de çalışma kapsamında daha sağlıklı bir kıyaslama yapmak bakımından taban alanı ve kat sayıları sabit tutulmuştur. Çizelge 2’de ise 2007 ve 2018 Deprem Yönetmeliklerine göre ilgili ada parsellere ait zemin verilerinin açıklamaları verilmiştir. Çalışma kapsamında düşey ve yatay yönlerde 50 cm lik tabanı dahil toplam 100 cm yüksekliğinde (50 cm+50 cm) sürekli temel sistemi üzerine kurulu bodrumsuz Z+4 katlı betonarme karkas sistem ile teşkil edilen bina inşaat alanına uygun şekilde birbirinden farklı projelendirilmiş olan model bir yapı tasarlanmıştır. Her parsel üzerine tasarlanmış olan ilgili yapı ile alakalı 2007 ve 2018 deprem yönetmeliklerine ait zemin ve deprem parametreleri ayrı ayrı uygulanarak analizler

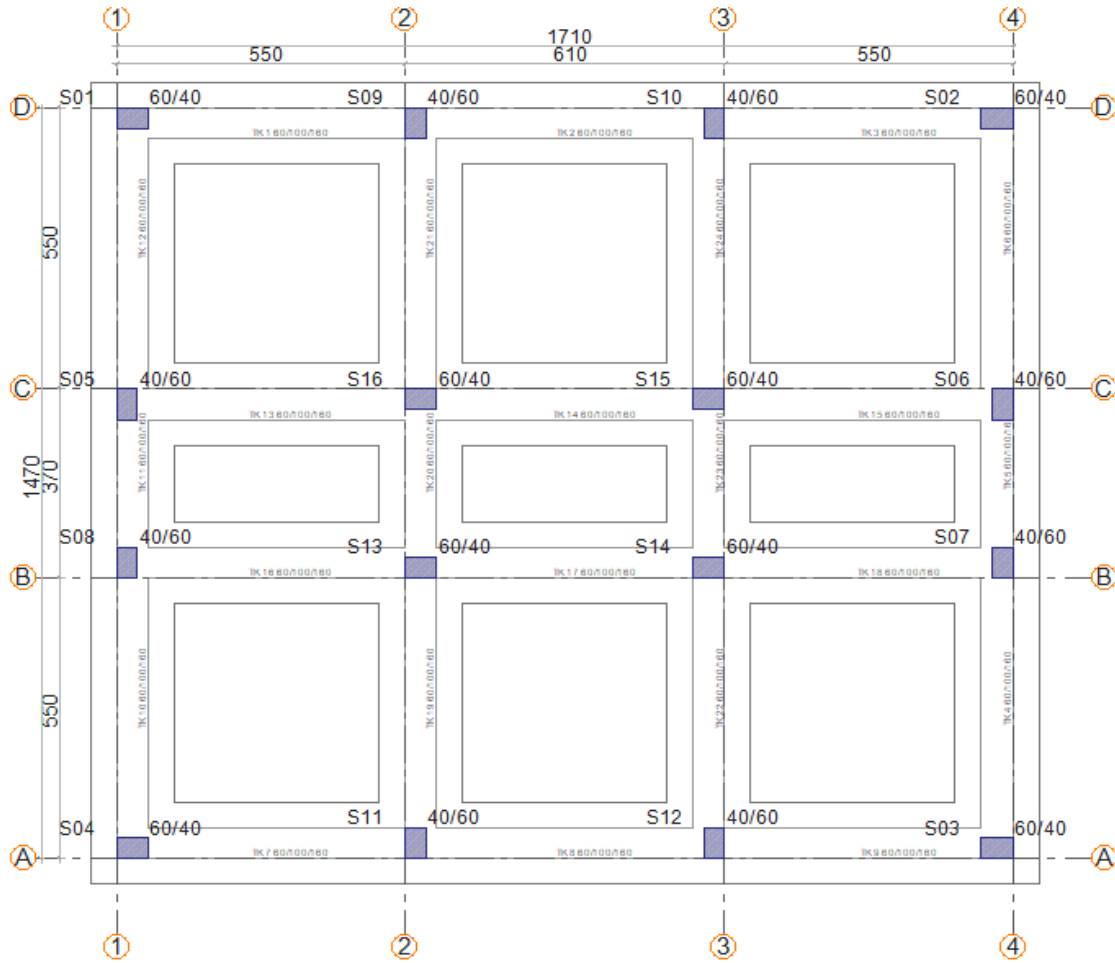
gerçekleştirilmiştir. Genel olarak kolonlar 40x60 cm, 60x40 cm ebatlarında, kirişlerin tamamı 30x50 cm ebatlarında, döşeme kalınlığı ise 12 cm olarak teşkil edilmiştir. Sürekli temel sistemi kullanılmış olup, temel kesiti Şekil 1’de verilmiştir. Analiz sonucunda metraj miktarlarının maliyetleri karşılığı üzerinden bir kıyaslama yapılmıştır.



Şekil 1. Sürekli Temel Kesit



Şekil 2. Tüm parsellere uygulanan Tip Proje Kalıp Planı



Şekil 3. Tüm parsellere uygulanan tip proje sürekli temel kalıp planı

4. BULGULAR

Çalışma kapsamında 2007 ve 2018 yönetmelikleri kapsamında yapılan zemin çalışmaları sonucu elde edilen parametreler Çizelge 3'te verilmiştir. Çizelge 4'te örnek teşkil etmesi bakımından Kooperatif Mah. 408 ada 25 nolu parsel taşınmaza ait deney verilerinin bir kısmı çizelgede verilmiştir. Çizelge 5'te ise statik analiz sonucu elde edilen metraj verileri verilmiştir. Ön tasarım aşamasında belirlenmiş olan yapı elemanlarına ait kesitler idecad programında 2007 ve 2018 yönetmeliklerine uygun şekilde ayrı ayrı tanımlanarak statik analiz başlatılmıştır. 2007 deprem yönetmeliğine göre yapılan analizde kesitler ile alakalı herhangi bir uyarı alınmamıştır

ancak 2018 deprem yönetmeliğine göre yapılan analizde ise yapı elemanlarında kesit yetersizlikleri ile alakalı çıkan uyarılar dikkate alınarak mümkün mertebede optimum düzeyde kesitlerde değişikliğe gidilmiştir. Nihai kesit güncellemeleri yapıldıktan sonra 2018 deprem yönetmeliğine göre statik analiz tekrar edilip metraj verileri elde edilmiş olup değerler Çizelge 5'te verilmiştir. Çizelge 6'da analiz sonrası çıkan kesit hatalarından sonra yapılan güncellemeler ile alakalı bilgiler verilmiştir. 2007 ile 2018 deprem yönetmeliklerine göre mevcut zeminlerde taşıma gücü hesaplarında meydana gelen farkların nedeni ilgili yönetmeliklerde yer alan taşıma gücü hesaplama yöntemlerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır.

Çizelge 3. 2007 ve 2018 deprem yönetmelikleri kapsamında parsellere ait zemin parametreleri (Nas-Mefa Mühendislik-Siirt)

Mahalle Ada-parsel	Kooperatif 455-64	Yenimahalle 408-25	Yenimahalle 399-15	Kooperatif 305-24	Bahçelievler 462-3	2007 TDY Verileri
Zemin yoğunluğu γ (tf/m ³)	1,87	1,91	1,85	1,92	1,90	
Yatak katsayıları (tf/m ³)	2320	2416	2416	2336	2416	
Zemin gerilmeleri (tf/m ²)	15,26	16,93	17,01	15,33	15,64	
Zemin grubu	C	C	C	C	C	
Zemin sınıfları	Z3	Z3	Z3	Z3	Z3	
Zemin yoğunluğu γ (tf/m ³)	1,87	1,91	1,84	1,91	1,90	2018 TBDY Verileri
Yatak katsayısı k_s (tf/m ³)	1998	2064	2234	1808	1748	
Tasarım taşıma gücü q_t (tf/m ²)	49,97	51,60	55,87	43,71	43,71	
Yerel zemin sınıfı	ZD	ZD	ZD	ZD	ZD	

Çizelge 4. Koperatif Mahallesi 408 ada 25 parsel taşınmaz için deney verilerinin bir bölümü (Nas-Mefa Mühendislik-Siirt)

Kooperatif Mahallesi 408 ada 25 parsel	2007 TDY verileri	2018 TBDY verileri
Arazide açılan sondaj kuyusu sayısı ve derinliği	5 adet numune ve 3 m-3,5 m derinliklerde	
Yapılan arazi deneyleri	Standart penetrasyon deneyi	
Yapılan laboratuvar deneyleri	<ul style="list-style-type: none"> - Su muhtevasi - Tabi birim hacim ağırlık tayini - Kuru birim hacim ağırlık tayini - Elek analizi - Atterberg limitleri - Üç eksenli basınç deneyi - Zemin sınıfı 	<ul style="list-style-type: none"> - Su muhtevasi - Tabi birim hacim ağırlık tayini - Hidrometri analizi - Kuru birim hacim ağırlık tayini - Elek analizi - Atterberg limitleri - Üç eksenli basınç deneyi - Zemin sınıfı
Deney numunelerinin ortalama su içeriği	%29,49	
Atterberg limitleri ortalama değerleri	Likit limit % 62,18 (Yüksek plastisiteli, şişen) Plastik limit % 30,04 Plastisite indisi % 32,14 (Yüksek plastisiteli siltli kil yarı kati kıvamda ve şişme derecesi > %30 olduğundan yüksektir.)	
Laboratuvar deneyleri sonucunda zemini oluşturan birimlerin (USCS) Birleşik zemin sınıflandırma sistemine göre	Açık – koyu kahve renkli, sert, kuru dayanımı yüksek ve aktif olmayan, (CH) yüksek plastisiteli, inorganik killer, yağlı kil.	

Çizelge 5. 2007 ve 2018 yönetmelikleri kapsamında analiz sonucu metraj verileri

Mahalle Ada-Parsel	2007 yönetmeliğine göre donatı metraj sonuçları (ton)	2007 yönetmeliğine göre beton metraj sonuçları (m ³)	2007 yönetmeliğine göre kalıp metraj sonuçları (m ²)	2018 yönetmeliğine göre donatı metraj sonuçları (ton)	2018 yönetmeliğine göre beton metraj sonuçları (m ³)	2018 yönetmeliğine göre kalıp metraj sonuçları (m ²)
Kooperatif 455-64	36,094	399,26	2316,68	36,135	430,18	2296,43
Yenimahalle 408-25	36,112	399,26	2316,68	36,135	430,18	2296,43
Yenimahalle 399-15	36,112	399,26	2316,68	36,137	430,18	2296,43
Kooperatif 305-24	36,094	399,26	2316,68	36,127	430,18	2296,43
Bahçelievler 462-3	36,112	399,26	2316,68	36,127	430,18	2296,43

2018 TBDY kapsamında zemin ve deprem parametreleri aynı tip proje ile 5 ayrı parsel üzerine uygulanarak analiz edilmiştir. Analizler sonucunda projede kesit yetersizliği, kesme güvenliğinin sağlanmaması, görelî kat ötelemesi yüksekliği gibi

nedenlerden ötürü değişiklikler yapılmıştır. Ortaya çıkan aykırı durumlar açıklamaları ile beraber Çizelge 6'da ifade edilmiştir. Analiz sonucu yapılması gereken değişiklikler çizelgedeki gibi gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 6. Tip projenin 2018 verilerine göre yapılan statik analiz çıktıları

Mahalle Ada-parcel	Tip projenin 2018 verileri ile statik analiz sonucu ortaya çıkan analiz uyarıları	Statik analiz sonucu 2018 yönetmeliği çerçevesinde yapılan değişiklikler
Kooperatif 455-64	Döşeme kalınlığı yetersiz uyarısı – Tüm katlarda S13-S14-S15-S16 kolonlarında kesme güvenliği sağlanmıyor uyarısı	Tüm döşemelerin kalınlığı 15 cm olarak değiştirildi – Zemin katta S13-S14-S15-S16 kolonları 55x55 cm ve diğer katlarda 50x50 cm olarak tasarlandı.
Yenimahalle 408-25	Döşeme kalınlığı yetersiz uyarısı – Tüm katlarda S13-S14-S15-S16 kolonlarında kesme güvenliği sağlanmıyor uyarısı	Tüm döşemelerin kalınlığı 15 cm olarak değiştirildi – Zemin katta S13-S14-S15-S16 kolonları 55x55 cm ve diğer katlarda 50x50 cm olarak tasarlandı.
Yenimahalle 399-15	Döşeme kalınlığı yetersiz uyarısı – Tüm katlarda S13-S14-S15-S16 kolonlarında kesme güvenliği sağlanmıyor uyarısı-1 ve 2. katta kat görelî ötelemesi yüksek, daha rijit olmalı uyarısı	Tüm döşemelerin kalınlığı 15 cm olarak değiştirildi – Zemin katta S13-S14-S15-S16 kolonları 55x55 cm ve diğer katlarda 50x50 cm olarak tasarlandı.
Kooperatif 305-24	Döşeme kalınlığı yetersiz uyarısı – Tüm katlarda S13-S14-S15-S16 kolonlarında kesme güvenliği sağlanmıyor uyarısı	Tüm döşemelerin kalınlığı 15 cm olarak değiştirildi – Zemin katta S13-S14-S15-S16 kolonları 55x55 cm ve diğer katlarda 50x50 cm olarak tasarlandı.
Bahçelievler 462-3	Döşeme kalınlığı yetersiz uyarısı – Tüm katlarda S13-S14-S15-S16 kolonlarında kesme güvenliği sağlanmıyor uyarısı	Tüm döşemelerin kalınlığı 15 cm olarak değiştirildi – Zemin katta S13-S14-S15-S16 kolonları 55x55 cm ve diğer katlarda 50x50 cm olarak tasarlandı.

Çizelge 7. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2007 ve 2018 birim fiyat poz tarifine göre toplam maliyetler

Kalıp Maliyeti TL	Beton Maliyeti TL	Donatı Maliyeti TL		
105.408,94 TL	74.222,43 TL	128.091,83 TL	Kooperatif 455-64	2007 analiz sonuçlarından elde edilen metraj verilerinin poz numaralarına karşılık bedelleri (KDV hariç)
105.408,94 TL	74.222,43 TL	128.155,71 TL	Yenimahalle 408-25	
105.408,94 TL	74.222,43 TL	128.155,71 TL	Yenimahalle 399-15	
105.408,94 TL	74.222,43 TL	128.091,83 TL	Kooperatif 305-24	
105.408,94 TL	74.222,43 TL	128.155,71 TL	Bahçelievler 462-3	
104.487,57 TL	79.970,46 TL	128.237,33 TL	Kooperatif 455-64	2018 analiz sonuçlarından elde edilen metraj verilerinin poz numaralarına karşılık bedelleri (KDV hariç)
104.487,57 TL	79.970,46 TL	128.237,33 TL	Yenimahalle 408-25	
104.487,57 TL	79.970,46 TL	128.244,43 TL	Yenimahalle 399-15	
104.487,57 TL	79.970,46 TL	128.208,94 TL	Kooperatif 305-24	
104.487,57 TL	79.970,46 TL	128.208,94 TL	Bahçelievler 462-3	

Elde edilen verilerin kıyaslanabilmesi için Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın birim fiyat poz tariflerinin güncel bedellerinden faydalanılmıştır. Donatı, beton ve kalıp bazında maliyet değerlendirmesi Çizelge 7'de verilmiştir.

Çizelge 7'de 2007 ve 2018 yönetmelikleri çerçevesinde her parsel için kalıp, beton, donatı metrajları ile Çevre ve Şehircilik Bakanlığının Y.23.014 nolu donatı, Y.16.050/15 nolu beton, Y.21.001/02 nolu kalıp pozlarına karşılık bedellerinin KDV (katma değer vergisi) hariç

hesaplanarak elde edilen sonuçları yer almaktadır. Betonarme karkas Z+4 katlı bir yapı, 5 ayrı parsel üzerine tatbik edilerek her parsel üzerinde 2007 ve 2018 yönetmeliği deprem ve zemin verileri esas alınarak statik analizler yapılmıştır. Elde edilen metraj verileri ile 2018 yılına göre güncel maliyetler hesaplanmıştır. Çizelge 8 'de 2007 ve 2018 yönetmeliği çerçevesinde her parsel için karşılık gelen toplam maliyetler verilmiş olup arada oluşan maliyet farkları yüzdelerden hesaplanarak verilmiştir.

Çizelge 8. 2007 ve 2018 Yönetmeliklerine Göre Elde Edilen Maliyetlerin Kıyaslanması

Mahalle Ada-Parsel	2007 yönetmeliğine göre toplam bedel TL	2018 yönetmeliğine göre toplam bedel TL	Yüzdelerli maliyet artışı %
Kooperatif 455-64	307.723,20 TL	312.695,36 TL	1,62
Yenimahalle 408-25	307.787,08 TL	312.695,36 TL	1,60
Yenimahalle 399-15	307.787,08 TL	312.702,46 TL	1,60
Kooperatif 305-24	307.723,20 TL	312.666,97 TL	1,61
Bahçelievler 462-3	307.787,08 TL	312.666,97 TL	1,59

Çizelge 8'de elde edilen yüzdelerli sonuçlar ayrı ayrı verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre 2018 yönetmeliğine göre %1,59-1,62 aralığında maliyet artışının ortaya çıktığı sonucu elde edilmiştir.

Ortaya çıkan bu farklılığın nedeni 2007 deprem yönetmeliğinin zemin ve deprem verilerinin elde edilmesine ilişkin 2018 deprem yönetmeliğinde yapılan değişikliklerden kaynaklanmaktadır.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

TDY 2007'den sonra günün şart ve koşullarının getirdiği ihtiyaç ve gelişen bilimsel birikim vasıtasıyla yapılan çalışmalar sonucunda Türkiye'de TBDY 2018 faaliyete girmiştir. Uygulamaya geçtiği tarih itibari ile güncel veri ve yönetmeliklerin kullanımı zorunlu hale gelmiştir. Mevcut çalışmada eski ve yeni yönetmelik uyarınca 5 farklı parsel üzerinde standart kat sayısı ve yüzölçümüne sahip karkas bir yapıda tasarımı yapıp, statik analiz edilerek 2 ayrı yönetmeliğe göre yapılan değerlendirme sonucu betonarme karkas yapıda oluşan kalıp, beton, donatı maliyetleri belirlenmiştir. Buna göre TBDY 2018'e göre tasarlanan, analizi yapılan bir yapıda TDY 2007'ye oranla bir maliyet artışı ortaya çıkardığı ve bu artışın da ortalama %1,60 civarında olduğu tespit edilmiştir. Çalışma karkas betonarme bir yapının analizi ve tasarımı ile sınırlı tutulmuştur. Ortaya çıkan maliyet artışı 2018 yönetmeliğinde insan can ve mal güvenliği üzerine daha sıkı tedbirler alındığı anlamına da gelmek ile beraber güvenlik faktörü, ön plana çıktıkça yapı maliyeti üzerine artış yönünde bir etkisi olacağı sonucu ortaya çıkmaktadır. Söz konusu parametrelerin uluslararası tanınırlığı olan farklı analiz programlarında da değerlendirilerek bir takım somut sonuçlara ulaşılması ve bu çalışma sonuçlarının teyit edilmesi önerilmektedir.

6. TEŞEKKÜR

Siirt yöresinde özel sektörde faaliyet gösteren Nas ve Mefa Mühendisliğe yerel zemin sınıfları ve ilgili zemin parametrelerinin elde edilmesi hususunda katkılarından ötürü teşekkür ederiz.

7. KAYNAKLAR

1. Göker, Ş., Karaşin, A., 2015. Depremde Hasar Gören Kırsal Yapılar için Bir Yapısal Hasar Değerlendirmesi. DÜMF Mühendislik Dergisi, 6(1), 31-38.
2. Ergünay, O., 2007. Türkiye'nin Afet Profili. TMMOB Afet Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 5-7.
3. Ayhan, E., Aktaş, G., Karaşin, A., 2021. Siirt İlindeki Bazı Binaların Riskli Bina Tespit Yönetmeliğine Göre Değerlendirilmesi, DÜMF Mühendislik Dergisi, 12(1), 89-98.
4. Ayhan, E., 2018. Siirt Yöresinde Kentsel Dönüşüm Kapsamında Mevcut Binaların Zemin ve Yapısal Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır, 152.
5. Aktaş, G., 2017. Karlıova Depremlerinde Kırsal Yapı Hasarlarının Değerlendirilmesi. DÜMF Mühendislik Dergisi, 8(4), 715-721.
6. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1-2.htm> Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Erişim tarihi: 12.12.2019.
7. Karaca, H., 2021. 2007 ve 2018 Deprem Yönetmelikleri Kullanılarak Farklı Zeminlere Göre ve Farklı Kentler için Elde Edilen Tasarım İvmelerinin Karşılaştırılması, Kapadokya Örneği. Afet ve Risk Dergisi, 4(1), 42-52.
8. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2007/03/20070306-3.htm> Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Erişim tarihi: 12.12.2019.
9. Muratoğlu, Ö., Özkan, Ö., 2005. Zemin Sınıfları ve Deprem Bölgelerinin Bina Yatay Yüklerine Etkisi, Deprem Sempozyumu, (23-25 Mart 2005), Kocaeli.
10. Türkmen, M., Tekeli, H., 2005. Deprem Bölgesi ve Yerel Zemin Sınıflarının Bina Maliyetine Etkileri. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 9(3).
11. Dorum, A., Özkan, Ö., Erdal, M., 2006. Farklı Deprem Bölgeleri ve Farklı Zemin Sınıflarının Kaba Yapı Maliyetine Etkisi. Selçuk-Teknik Dergisi, 5(1), 1-9.
12. Türkmen, M., Tekeli, H., Kuyucular, A., 2006. Betonarme Bina Maliyetlerinin Zemin Sınıfı-Kat Adedi ve Düzensizlik ile Değişimi. Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi, 21(1), 57-66.
13. Dikmen, S.Ü., Özek, S., 2011. Deprem Bölgelerinde Zemin Sınıfının Sanayi Yapılarının Maliyetine Etkisi. İmo Teknik Dergi, 22(108), 5543-5558.
14. Keskin, E., Bozdoğan, K.B., 2018. 2007 ve 2018 Deprem Yönetmeliklerinin Kırklareli İli

- Özelinde Değerlendirilmesi. Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 4(1), 74-90.
- 15.** Elci, H., Göker, K.A., 2018. Comparison of Earthquake Codes (TEC 2007 and TBEC 2018) in Terms of Seismic Performance of RC Columns. International Journal of Scientific and Technological Research, 4(6), 9-21.
- 16.** Dalyan, İ., Şahin, B., 2019. Mevcut Betonarme Bir Binanın 2007 ve 2018 Deprem Yönetmeliklerine Göre Deprem Yükleri Altındaki Taşıyıcı Sistem Performansının Değerlendirilmesi. Türk Deprem Araştırma Dergisi, 1(2), 134-147.
- 17.** Karaca, H., Oral, M., Erbil, M., 2020. Yapısal Tasarım Bağlamında 2007 VE 2018 Deprem Yönetmeliklerinin Karşılaştırılması, Niğde Örneği. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9(2), 898-903.

Fonksiyonel Derecelenmiş Malzeme ve Değişken Kesitli Silindirik Olmayan Helisel Çubukların Titreşimi

Yavuz Çetin CUMA*¹ ORCID 0000-0003-1530-8211
Faruk Fırat ÇALIM¹ ORCID 0000-0002-7493-3386

¹İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Adana

Geliş tarihi: 26.11.2021 Kabul tarihi: 21.03.2022

Atıf şekli/ How to cite: CUMA, Y.Ç., ÇALIM, F.F., (2022). Fonksiyonel Derecelenmiş Malzeme ve Değişken Kesitli Silindirik Olmayan Helisel Çubukların Titreşimi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37(1), 283-292.

Öz

Bu çalışmada fonksiyonel derecelenmiş malzemeli değişken kesite sahip silindirik olmayan helisel çubukların serbest titreşimi incelenmiştir. Malzeme ve kesit değişiminin çubuk eksenine boyunca olduğu varsayımı kullanılmıştır. Eksenel ve kayma deformasyonlarını içeren çubuğun serbest titreşimini idare eden diferansiyel denklemler Timoshenko kiriş teorisi kullanılarak elde edilmiştir. Ardından taşıma matrisi ve rijitlik matrisi yöntemleri bir arada kullanılarak diferansiyel denklemler sayısal olarak çözülmüştür. Malzeme değişim parametresi (β_{mat}), kesit değişim parametresi (β_{sec}) silindirin kenar ve orta kısımlarının yarıçap oranının R_2/R_1 hiperbol ve varil tipi geometriye sahip silindirik olmayan helisel çubukların serbest titreşimine etkisi araştırılmıştır. Literatürde bulunan örnek ve ANSYS paket programı kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Fonksiyonel derecelenmiş malzeme, Serbest titreşim, Silindirik olmayan helisel çubuk, Değişken kesit

Vibration Analysis of Non-Cylindrical Helical Rods with Functionally Graded Materials and Variable Cross-sectional Area

Abstract

In this study, free vibration of non-cylindrical helical rods of variable cross-section with functionally graded material was investigated. Material and cross-section variation are assumed to be along the rod axis. The differential equations governing the free vibration of the rod including axial and shear deformations are obtained by using the Timoshenko's beam theory. Then, the obtained differential equations are solved numerically by using the transfer matrix and stiffness matrix methods simultaneously. The effect of material variation parameter (β_{mat}), cross section variation parameter (β_{sec}), ratio of the edge and middle point radiuses of the cylinder (R_2/R_1) on the free vibration behaviour of hyperboloidal and barrel type non-cylindrical helical rods were investigated. The results obtained from

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Yavuz Çetin CUMA, cumayc@atu.edu.tr

the present study are compared with the example available in the literature and the ANSYS package program.

Keywords: Functionally graded material, Free vibration, Non-cylindrical helical rod, Variable cross-section

1. GİRİŞ

Helisel geometriye sahip çubuklar çeşitli mühendislik dallarında birçok farklı uygulama alanı bulmaktadır. Bunların tamamına yakını araç süspansiyonu, sübap yayları, spiral merdivenler ve silah yayları gibi dinamik yüklemeler altında çalışmaktadır. Dolayısıyla bu yapısal elemanların dinamik davranışının incelenmesi önem arz etmektedir. Dinamik davranışın incelenmesi hususunda en önemli bilgilerden birisi doğal titreşim frekanslarının belirlenmesidir. Bu frekansların elde edilmesi, tasarım aşamasında elemanın çalışması planlanan frekans aralığında doğal titreşim frekansı bulunmaması, dolayısıyla da rezonans hareketinden kaçınılması sağlanmalıdır.

Silindirik ve silindirik olmayan geometriye sahip, sabit ve değişken kesitli ve çeşitli malzeme özellikleri gösteren helisel çubukların dinamik ve statik analizleri birçok araştırmacının çalışma konusu olmuştur. Epstein [1] konik helisel çubukların uzama değerleri ve serbest titreşim frekanslarını hem teorik hem deneysel olarak incelemiştir. Massoud [2] uzaysal bir çubuğun hareket denklemlerini kayma ve eksenel deformasyonları da dahil ederek vektörel formda elde etmiştir. Mottershead [3] sonlu elemanlar yöntemi ile helisel yayların dinamik analizini gerçekleştirmiştir. Nagaya ve arkadaşları [4] rastgele şekle sahip yayların serbest titreşim problemini taşıma matrisi yöntemini kullanarak çözmüştür. Frekans denklemini hiperbol ve varil tipi helisel çubuklar için kullanılmak üzere genelleştirmiştir. Yıldırım ve İnce [5] silindirik olmayan helisel çubukların serbest titreşim analizini taşıma matrisi yöntemi ile çözmüştür. Birçok parametreyi kapsayan bu çalışmayı teorik ve deneysel birçok çalışmanın sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Yıldırım [6, 7] rijitlik matrisi metodu ile silindirik olmayan helisel çubukların serbest titreşim analizini eksenel ve kayma

deformasyonlarını dahil ederek çözmüş çeşitli parametrelerin serbest titreşim frekanslarına olan etkisini yorumlamıştır. Busool ve Eisenberger [8] dinamik rijitlik matrisi metoduyla silindirik olmayan helisel çubukların serbest titreşim analizini yapmıştır. Mod şekillerini elde ederek literatürdeki teorik ve deneysel çalışmalar ile karşılaştırmıştır. Çalım viskoelastik, anizotropik eğri eksenli helisel çubukların dinamik davranışı üzerine çalışmalar yapmıştır [9]. Temel ve Çalım [10] impulsif yüke maruz silindirik helisel çubukların zorlanmış titreşim analizini yapmışlardır. Sonuçları Laplace uzayında elde etmiş ve ters Laplace dönüşümüyle zaman uzayına çevirmişlerdir. Girgin [11] değişken kesitli silindirik olmayan helisel çubukların serbest titreşim analizini karışık sonlu elemanlar yöntemi kullanarak çözmüş ve sonuçları ANSYS ile kıyaslamıştır. Çalım [12,13] izotropik ve anizotropik yayların dinamik analizini parametrik çalışmalarla incelemiştir. Yu ve Hao [14-16] burulma etkisini dahil ederek silindirik olmayan helisel çubukların serbest titreşimini taşıma matrisi metoduyla incelemiştir. Kaçar ve Yıldırım [17] kompozit helisel çubukların burkulma ve serbest titreşim analizini çalışmışlardır. Eratlı ve arkadaşları [18] karışık sonlu elemanlar yöntemi kullanarak silindirik ve silindirik olmayan helisel yayların serbest titreşim analizini yapmışlardır. Literatürde sıklıkla kullanılan dairesel kesitin dışındaki kesitleri burulma etkilerini de ele alarak incelemiştir. Ermiş ve arkadaşları [19] farklı yüklemeler altındaki viskoelastik hiperbol helisel yayların zorlanmış titreşim analizini yapmışlardır. Ermiş ve Omurtag [20] konik helisi iki farklı geometrik tanımını kullanarak modellemiş ve bu modellerin daha iyi sonuçlar verdiği durumları parametrik çalışma ile incelemiştir. Arıbaş ve arkadaşları [21] kesin helis geometrisi ve çarpılmanın helisel çubukların statik ve dinamik davranışları üzerindeki etkilerini incelemiştir. Düzlemsel eğri eksenli çubuk kabulü ile uzaysal logaritmik spiral fonksiyonunun farkı

açıklanmıştır. Arıbaş ve Omurtag [22] kesin helis geometrisini sandviç kesitli helisel yayı modellemek için kullanmışlar. Karışık sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bu çubukların statik davranışı incelenmiştir. Çalım ve Cuma [23] hiperbol ve varil tipi helisel çubukların fonksiyonel derecelenmiş malzeme ve değişken kesite sahip olması durumunu incelemişlerdir. Taşıma matrisi yöntemi ile bu çubukların serbest titreşim analizi üzerine parametrik çalışma gerçekleştirmişlerdir. Cuma ve Çalım [24] farklı parametrelerin fonksiyonel derecelenmiş malzeme ve değişken kesite sahip silindirik helisel çubukların serbest titreşimine etkisini taşıma matrisi yöntemini kullanarak incelemişlerdir.

Literatür taramasından da görüldüğü gibi fonksiyonel derecelenmiş silindirik olmayan helisel çubukların serbest titreşimi üzerine çalışmalar sınırlı sayıdadır. Bu konuda örneklerin artırılarak farklı parametre ve sınır koşullarının incelenmesi literatüre önemli bir katkı sağlanacağı anlamına gelmektedir. Bundan dolayı bu çalışmada hiperbol ve varil tipi helisel çubukların serbest titreşimi incelenecek olup farklı malzeme ve kesit değişim fonksiyonları ve sınır şartlarının serbest titreşim frekanslarına etkisi araştırılacaktır.

2. SİLİNDİRİK OLMAYAN HELİSEL ÇUBUK GEOMETRİSİ

Silindirik ve silindirik olmayan helisel çubukların temel farkı silindir yarıçapının eksen boyunca değişkenlik göstermesidir. Hiperbol ve varil geometrideki helisel çubukların yatay yarıçapı çubuğun üzerindeki herhangi bir noktada aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$R(\phi) = R_1 + (R_2 - R_1) \left(1 - \frac{\phi}{\pi}\right)^2 \quad (1)$$

burada ϕ ve n yatay açı ve sarım sayısı, $R(\phi)$ ise bir noktadaki helis yarıçapı, R_1 ve R_2 ise orta nokta ve uçnoktalardaki helis yarıçapıdır. Birim helis uzunluğu Şekil 1c'de görüldüğü gibi elde edilebilir.

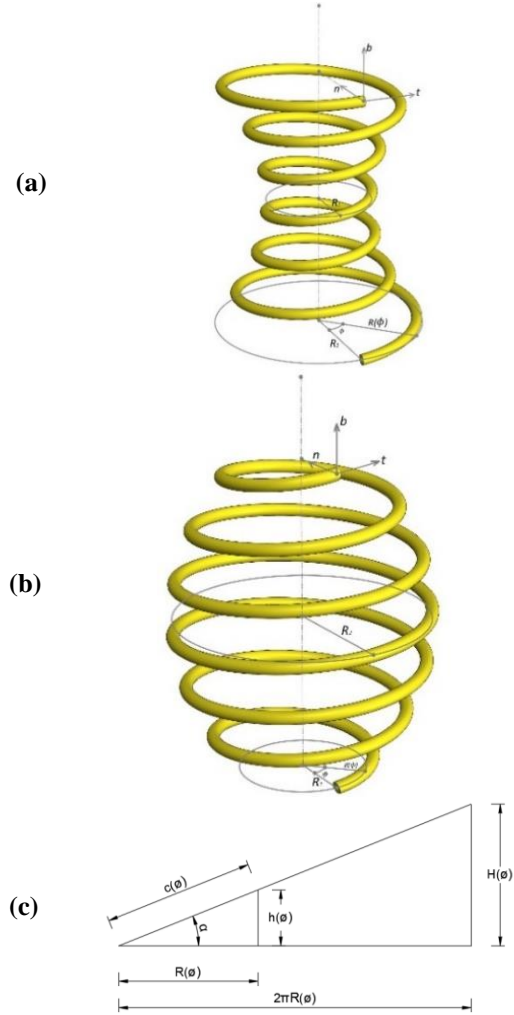
Sonlu bir helis parçasının uzunluğu (ds) helis açısına (ϕ) bağlı olarak $ds = c d\phi$ şeklinde

hesaplanabilir. Sonsuz küçüklükteki bir helisel çubuk elemanı aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$ds = \sqrt{R(\phi)^2 + h(\phi)^2} d\phi = c(\phi) d\phi, \quad h(\phi) = H(\phi)/2\pi \quad (2)$$

burada α , $H(\phi)$ ve $h(\phi)$ sırasıyla helis yükselme açısı, bir turdaki helis yüksekliği ve birim uzunluktaki helis yüksekliğidir (Şekil 1c). $c(\phi)$ ise birim helis uzunluğudur. Eğrilik $\chi(\phi)$ ve çarpıklık $\tau(\phi)$ değerleri aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\chi(\phi) = R(\phi)/c^2(\phi), \quad \tau(\phi) = h(\phi)/c^2(\phi) \quad (3)$$



Şekil 1. (a) Hiperbol tipi helis, (b) varil tipi helis, (c) silindirik olmayan helisin birim elemanı

3. SİLİNDİRİK OLMAYAN HELİSEL ÇUBUKLARIN DİNAMİK DAVRANIŞINI İDARE EDEN DİFERANSİYEL DENKLEMLER

Herhangi bir noktadaki yerdeğiştirme $U(s,t)$, dönme $\Omega(s,t)$, iç kuvvet $T(s,t)$ ve iç moment $M(s,t)$ vektörlerinin sembolik ifadeleridir. Sonsuz küçüklükteki deformasyonlar varsayıldığında uzaysal çubuğun durumu idare eden diferansiyel denklemler aşağıdaki gibidir.

$$\frac{dT}{ds} + p = \rho A \ddot{U} \quad \frac{dM}{ds} + t \times T + m = \rho I \ddot{\Omega} \quad (4)$$

$$\frac{dU}{ds} + t \times \Omega = A^{-1} T \quad \frac{d\Omega}{ds} = B^{-1} M \quad (5)$$

burada, ρ , A , I , p ve m sırasıyla yoğunluk, kesit alanı, eylemsizlik momenti, dış yükler ve dış momentlerdir. A ve B matrisleri çubuğun geometric ve malzeme özelliklerini barındırmaktadır ve aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$A = \begin{bmatrix} EA & 0 & 0 \\ 0 & GA/\alpha_n & 0 \\ 0 & 0 & GA/\alpha_b \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$B = \begin{bmatrix} GI_t & 0 & 0 \\ 0 & EI_n & 0 \\ 0 & 0 & EI_b \end{bmatrix}$$

E ve G elastic sabitler, A ve I (I_t , I_n , I_b) kesit alanı ve eylemsizlik momentidir. α_n ve α_b ise kayma düzeltme katsayılarıdır.

Hareketli koordinat sistemi teğet (t), normal (n) ve bi-normal (b) birim vektörlerle tanımlanır. Birim vektörler t , n , ve b arasındaki bağıntı Frenet-Serret formülasyonları ile kurulabilir.

$$\frac{dt}{ds} = \chi(\phi)n \quad \frac{dn}{ds} = -\chi(\phi)t + \tau(\phi)b \quad db/ds = -\tau(\phi)n \quad (7)$$

Serbest titreşim analizinde dış yükler sıfır olarak tanımlanmaktadır ($p=m=0$). Harmonik titreşim kabulü yapıldığında, U , Ω , T ve M aşağıdaki hali almaktadır.

$$U(s,t) = U(s) e^{i\omega t}, \quad \Omega(s,t) = \Omega(s) e^{i\omega t}, \quad (8)$$

$$T(s,t) = T(s) e^{i\omega t}, \quad M(s,t) = M(s) e^{i\omega t}$$

burada, ω açısal frekanstır.

Hareketli koordinat sisteminde (t , n , b) tanımlanmış fonksiyonel derecelenmiş değişken kesitli silindirik olmayan helisel çubuklara ait adi diferansiyel denklemler aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\frac{dU_t}{d\phi} = \frac{R(\phi)}{c(\phi)} U_n + c(\phi) \frac{T_t}{E(\phi)A(\phi)} \quad (9a)$$

$$\frac{dU_n}{d\phi} = -\frac{R(\phi)}{c(\phi)} U_t + \frac{h(\phi)}{c(\phi)} U_b + c(\phi) \Omega_n + c(\phi) \frac{\alpha_n T_n}{G(\phi)A(\phi)} \quad (9b)$$

$$\frac{dU_b}{d\phi} = -\frac{h(\phi)}{c(\phi)} U_n - c(\phi) \Omega_n + c(\phi) \frac{\alpha_b T_b}{G(\phi)A(\phi)} \quad (9c)$$

$$\frac{d\Omega_t}{d\phi} = \frac{R(\phi)}{c(\phi)} \Omega_n + c(\phi) \frac{M_t}{G(\phi)I_t(\phi)} \quad (9d)$$

$$\frac{d\Omega_n}{d\phi} = -\frac{R(\phi)}{c(\phi)} \Omega_t + \frac{h(\phi)}{c(\phi)} \Omega_b + c(\phi) \frac{M_n}{E(\phi)I_n(\phi)} \quad (9e)$$

$$\frac{d\Omega_b}{d\phi} = -\frac{h(\phi)}{c(\phi)} \Omega_n + c(\phi) \frac{M_b}{E(\phi)I_b(\phi)} \quad (9f)$$

$$\frac{dT_t}{d\phi} = \frac{R(\phi)}{c(\phi)} T_n - c(\phi) \rho(\phi) A(\phi) \omega^2 U_t \quad (9g)$$

$$\frac{dT_n}{d\phi} = -\frac{R(\phi)}{c(\phi)} T_t + \frac{h(\phi)}{c(\phi)} T_b - c(\phi) \rho(\phi) A(\phi) \omega^2 U_n \quad (9h)$$

$$\frac{dT_b}{d\phi} = -\frac{h(\phi)}{c(\phi)} T_n - c(\phi) \rho(\phi) A(\phi) \omega^2 U_b \quad (9i)$$

$$\frac{dM_t}{d\phi} = \frac{R(\phi)}{c(\phi)} M_n - c(\phi)\rho(\phi)I_t(\phi)\omega^2\Omega_t \quad (9j)$$

$$\frac{dM_n}{d\phi} = \frac{R(\phi)}{c(\phi)} M_t + \frac{h(\phi)}{c(\phi)} M_b + c(\phi) T_b - c(\phi)\rho(\phi)I_n(\phi)\omega^2\Omega_n \quad (9k)$$

$$\frac{dM_b}{d\phi} = \frac{h(\phi)}{c(\phi)} M_n - c(\phi) T_n - c(\phi)\rho(\phi)I_b(\phi)\omega^2\Omega_b \quad (9l)$$

Matris notasyonunda, Eşitlik 9a-l kapalı formda aşağıdaki gibidir.

$$\frac{dS(\phi)}{d\phi} = D(\phi, \omega) S(\phi) \quad (10)$$

D ve S sırasıyla diferansiyel geçiş matrisi ve durum vektörüdür. Durum vektörünün elemanları $S(\phi) = \{U_t, U_n, U_b, \Omega_t, \Omega_n, \Omega_b, T_t, T_n, T_b, M_t, M_n, M_b\}^T$ Eşitlik 10 kullanılarak elde edilebilir.

$$S(\phi) = F(\phi, \omega)S(0) \quad (11)$$

Burada, F dinamik taşıma matrisi olarak adlandırılıp D diferansiyel geçiş matrisinin Taylor serisi açılımı ile elde edilebilmektedir [5,25].

$$F = e^{\phi D} = I + \phi D + \frac{\phi^2}{2!} D^2 + \frac{\phi^3}{3!} D^3 + \dots \quad (12)$$

Diferansiyel denklemlerin sayısal çözümünde taşıma matrisi ve rijitlik matrisi yöntemleri bir arada kullanılmaktadır. Eleman rijitlik matrisleri taşıma matrisi yöntemi kullanılarak elde edilmiş ve sistem rijitlik matrisi standart kodlama tekniği ile oluşturulmuştur. Sistem rijitlik matrisinin determinantını sıfır yapan ω değerleri elde edilmiştir.

4. SAYISAL ÖRNEKLER

Bu çalışmada Mathematica yazılımı kullanılarak silindirik olmayan helisel çubukların fonksiyonel

derecelenmiş değişken kesit durumlarını da dahil ederek serbest titreşim problemini çözen bir algoritma geliştirilmiştir. Bu çalışmada literatürde bulunan değişken kesitli silindirik olmayan helisel çubukların serbest titreşimi analizi ile karşılaştırma yapılmış ardından fonksiyonel derecelenmiş malzeme de dahil edilerek parametrik bir çalışma yürütülmüştür. Parametrik çalışmada malzeme değişim parametresinin (β_{mat}), kesit değişim parametresinin (β_{sec}), ve helisel çubuğun uç ve orta noktalarındaki yarıçap oranlarının (R_2/R_1) çubuğun serbest titreşimi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. İkinci örnekte elde edilen sonuçlar ANSYS paket programında BEAM188 elemanları kullanılarak elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. İki örnekte elde edilen sonuçlar tablolar kullanılarak sunulmuştur.

4.1. Değişken Kesitli Silindirik Olmayan Helisel Çubukların Serbest Titreşimi

Karşılaştırma örneği olarak değişken kesite sahip silindirik olmayan helisel çubukların serbest titreşim analizi yapılmış ve literatürde Girgin'in [11] yürütmüş olduğu çalışma ile karşılaştırılmıştır. Kesit değişimi eksen boyunca olup orta ve uç kısımlardaki kesit çapları arasındaki oran aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$d_1 = d_2 \beta_{sec} \quad (16)$$

burada d_1 ve d_2 sırasıyla $R(\phi)=R_1$ ve $R(\phi)=R_2$ durumundaki kesit çaplarını ifade etmektedir. Kullanılan malzeme ve kesit özellikleri sıralanmıştır: $E=210$ GPa, $\rho=7850$ kg/m³, $\nu=0,3$, $\alpha=4,8^\circ$, $n=6,5$, $\alpha_n=\alpha_b=1,1$. Sonuçların karşılaştırılması için ANSYS programı kullanılarak problem 2000 elemanla çözülmüştür. Geliştirilmiş olan algorithmada ise 200 eleman kullanılarak çok daha küçük sistem matrisleri elde edilmiştir.

Çizelge 1. Değişken kesitli hiperbol helisel çubuğun ilk altı doğal titreşim frekansı (Hz) ($R_1=13$ mm, $R_2/R_1=2.4$, $d_2=2.6$ mm)

β_{sec}	Mod	Girgin [11]	ANSYS	Bu çalışma
0,25	1	91,010	89,830	90,020
	2	109,67	108,10	108,24
	3	117,04	115,52	115,69
	4	121,71	120,16	120,51
	5	130,26	128,61	129,27
	6	143,00	140,84	140,82
0,5	1	85,560	84,380	84,480
	2	108,39	106,94	107,14
	3	110,12	108,57	108,51
	4	132,02	130,24	130,78
	5	135,71	133,79	133,94
	6	149,31	147,14	147,46
0,75	1	80,810	79,680	79,690
	2	101,86	100,56	100,97
	3	107,80	106,23	105,87
	4	132,57	130,78	131,27
	5	153,07	150,92	151,04
	6	162,41	160,27	160,94

Çizelge 1 ve 2'deki verilerden anlaşılacağı üzere bu çalışmada elde edilen sonuçların önceki çalışma ve ANSYS sonuçları ile uyum içerisinde. Kesit değişim parametresinin artışı doğal titreşim frekanslarında düşüşe sebep olmaktadır.

Çizelge 2. Değişken kesitli varil helisel çubuğun ilk altı doğal titreşim frekansı (Hz) ($R_1=25$ mm, $R_2/R_1=0,2$, $d_2=2$ mm)

β_{sec}	Mod	Girgin [11]	ANSYS	Bu çalışma
0,25	1	36,52	36,60	36,43
	2	39,53	39,57	39,18
	3	47,96	48,09	47,86
	4	50,28	50,31	50,13
	5	53,22	53,41	53,13
	6	55,66	55,83	55,53
0,5	1	54,13	54,23	54,00
	2	55,71	55,80	55,58
	3	71,57	71,66	71,41
	4	71,63	71,70	71,48
	5	86,77	87,16	86,66
	6	89,54	89,95	89,43
0,75	1	64,82	64,86	64,68
	2	69,24	69,53	69,15
	3	87,19	87,30	87,07
	4	87,22	87,32	87,11
	5	116,9	117,4	116,8
	6	118,9	119,6	118,8

Sonuçlar önceki çalışma ve ANSYS ile oldukça uyum içerisinde. Kesit değişim parametresi arttıkça frekans değerlerinin de yükseldiği görülmektedir.

4.3. Fonksiyonel Derecelenmiş Malzemeli Değişken Kesite Sahip Silindirik Olmayan Helisel Çubukların Serbest Titreşimi

Mathematica programı kullanılarak geliştirilen algoritmaya malzeme değişim parametresi entegre edilmiştir. Bu algoritma kullanılarak iki ucu ankastre varil ve hiperbol tipi helisel çubukların serbest titreşim analizi yapılmıştır. Malzeme ve kesit değişimini idare eden fonksiyon aşağıdaki gibidir.

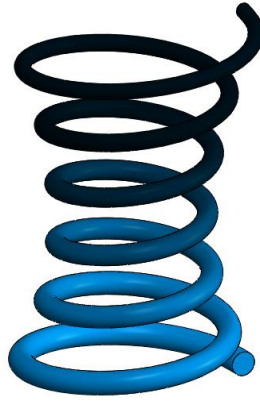
$$P(\phi) = P_0 e^{-\beta \left(\frac{\phi}{2n\pi} \right)} \quad (17)$$

Orta noktadaki kesit çapı d_1 uç noktadaki kesit çapı d_2 ve kesit değişim parametresi β_{sec} (0,25, 0,5, 0,75, 1) kullanılarak ifade edilmiştir. Elastisite modülü $E(\phi)$ ve kütleli yoğunluk $\rho(\phi)$ malzeme değişim parametresi β_{mat} (0,5, 1, 1,5, 2) ile ifade edilmiştir. Kullanılan ortak malzeme ve geometik özellikler şöyledir. $E=210$ GPa, $\rho=7850$ kg/m³, $\alpha=4,8^\circ$, $n=6,5$ sarım, $\nu=0,3$, $\alpha_n=\alpha_b=1,1$.

4.3.1. Hiperbol Tipi Helisel Çubuk

Şekil 2’de değişken kesit ve malzeme özelliklerine sahip hiperbol helisel çubuk gösterilmiştir. Hiperbol örneğinde farklı olarak kullanılan parametreler şöyledir: $d_2=2$ mm, $R_1=25$ mm. Farklı parametreler kullanılarak elde edilen temel frekanslar Çizelge 3’de verilmiştir.

Çizelge 3’den görüleceği gibi bu çalışmada elde edilen sonuçlar ile ANSYS programından elde edilen sonuçlar oldukça uyum içerisindedir. Temel frekanslar silindirik helis geometrisinden uzaklaştıkça düşmektedir. Bunun nedeni helis rijitliğindeki azalmadır.



Şekil 2. Fonksiyonel derecelenmiş malzemeli değişken kesitli hiperbol helis

Çizelge 3’den görüleceği gibi bu çalışmada elde edilen sonuçlar ile ANSYS programından elde edilen sonuçlar oldukça uyum içerisindedir. Temel

frekanslar silindirik helis geometrisinden uzaklaştıkça düşmektedir. Bunun nedeni helis rijitliğindeki azalmadır.

Çizelge 3. Fonksiyonel derecelenmiş malzeme ve değişken kesite sahip hiperbol helisel çubuğun temel frekansları (Hz)

R_2/R_1		1,2		1,6		2		2,4	
β_{mat}	β_{sec}	ANSYS	Bu çalışma	ANSYS	Bu çalışma	ANSYS	Bu çalışma	ANSYS	Bu çalışma
0	0,	9,32	9,33	6,78	6,80	5,09	5,09	3,94	3,95
	0,25	8,33	8,34	6,10	6,11	4,60	4,62	3,57	3,60
	0,50	7,61	7,61	5,67	5,68	4,32	4,34	3,37	3,41
	0,75	7,05	7,03	5,37	5,36	4,15	4,17	3,27	3,29
0,25	0,	9,33	9,34	6,79	6,81	5,10	5,11	3,95	3,96
	0,25	8,41	8,40	6,17	6,19	4,66	4,68	3,62	3,64
	0,50	7,73	7,72	5,78	5,79	4,41	4,44	3,45	3,49
	0,75	7,18	7,16	5,50	5,51	4,26	4,27	3,36	3,37
0,5	0,	9,36	9,37	6,81	6,83	5,12	5,14	3,96	3,98
	0,25	8,49	8,50	6,25	6,27	4,73	4,76	3,67	3,71
	0,50	7,85	7,85	5,89	5,90	4,51	4,54	3,53	3,57
	0,75	7,32	7,31	5,63	5,63	4,37	4,39	3,45	3,47
0,75	0,	9,40	9,42	6,85	6,88	5,15	5,17	3,99	4,01
	0,25	8,59	8,59	6,34	6,37	4,81	4,84	3,74	3,77
	0,50	7,99	7,97	6,02	6,03	4,62	4,65	3,62	3,66
	0,75	7,47	7,45	5,77	5,78	4,49	4,50	3,55	3,57

Frekans değerleri incelendiğinde en güçlü değişimin yarıçap oranlarında meydana geldiği görülmektedir. Yarıçap oranı arttıkça silindirik helis geometrisinden uzaklaşmakta ve frekans değerleri düşüş göstermektedir.

Frekans değerleri sabit kesitli çubuğun en yüksek frekans değerlerine sahip olduğunu göstermektedir. Kesit değişim parametresi yükseldikçe kesit çapının azalması dolayısıyla frekanslar düşmektedir. Malzeme değişim parametresindeki artış frekansları artırsa da frekanslar üzerindeki etkisinin diğer parametrelere nispeten daha az olduğu görülmektedir. Ayrıca malzeme değişim parametresinin kesit değişim parametresinin etkisini azalttığı da açıktır. Bu çalışmada incelenen değerler kapsamında yarıçap oranını en büyük etkiye sahiptir.

4.3.2. Varil Tipi Helisel Çubuk

Varil tipi helisel çubuğun farklı malzeme ve kesit özelliklerinde temel frekansları araştırılmıştır. Bu örnekte kullanılan kesit değerleri şöyledir: $d_2=2$ mm, $R_1=25$ mm. Farklı kesit değişim parametresi, malzeme değişim parametresi ve yarıçap oranları altında temel frekanslar geliştirilen

algoritma ve ANSYS programı kullanılarak belirlenmiştir. Şekil 3’de kesit ve malzeme değişimi gösterilmiştir.



Şekil 3. Fonksiyonel derecelenmiş malzeme ve değişken kesitli varil tipi helisel çubuk

Çizelge 4’de görüldüğü gibi kesit değişim parametresinin ve yarıçap oranının artışı frekans değerlerini düşürmektedir. Bu iki parametrenin kullanılan değerleri için benzer etkiye sahip olduğu frekans değerlerinden anlaşılmaktadır. Malzeme değişim parametresinin frekanslar üzerindeki etkisi ise kullanılan diğer parametrelere göre oldukça düşük kalmaktadır. Ayrıca malzeme değişim parametresindeki artış frekans değerlerini de artırmaktadır.

Çizelge 4. Fonksiyonel derecelenmiş malzeme ve değişken kesitli varil tipi helisel çubuğun temel frekansları (Hz)

R_2/R_1		0,2		0,4		0,6		0,8	
β_{mat}	β_{sec}	ANSYS	Bu çalışma	ANSYS	Bu çalışma	ANSYS	Bu çalışma	ANSYS	Bu çalışma
0	0	72,00	71,87	65,70	65,54	59,74	59,65	52,19	52,14
	0,25	63,87	63,74	58,34	58,19	53,08	52,95	46,32	46,23
	0,50	57,22	57,09	52,40	52,25	47,69	47,56	41,53	41,43
	0,75	51,67	51,53	47,47	47,32	43,02	42,88	37,48	37,37
0,25	0	72,03	71,91	65,73	65,57	59,78	59,68	52,22	52,14
	0,25	64,13	64,00	58,61	58,46	53,35	53,22	46,56	46,47
	0,50	57,63	57,50	52,84	52,68	48,10	47,95	41,90	41,79
	0,75	52,17	52,03	47,99	47,83	43,44	43,29	37,92	37,82
0,5	0	72,13	72,00	65,84	65,68	59,89	59,78	52,31	52,23
	0,25	64,44	64,30	58,95	58,79	53,69	53,56	46,85	46,76
	0,50	58,08	57,95	53,32	53,16	48,54	48,40	42,31	42,21
	0,75	52,71	52,57	48,55	48,38	43,88	43,74	38,40	38,29
0,75	0	72,31	72,16	66,03	65,86	60,08	59,95	52,47	52,39
	0,25	64,81	64,66	59,35	59,19	54,08	53,94	47,19	47,09
	0,50	58,59	58,44	53,85	53,68	49,01	48,86	42,76	42,65
	0,75	53,28	53,14	49,13	48,97	44,34	44,20	38,90	38,79

Malzeme değişim parametresinin artışı diğer parametrelerin frekanslar üzerindeki etkilerinde gözle görülür bir etkiye sahip değildir. Kesit değişim ve yarıçap oranı parametreleri malzeme değişim parametresine göre daha büyük etkiye sahiptir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada fonksiyonel derecelenmiş malzeme ve değişken kesite sahip silindirik olmayan helisel çubukların serbest titreşim frekansları parametrik bir çalışma ile araştırılmıştır. Malzeme ve kesit değişiminin üretim kaynaklı olabilmesinin haricinde korozyon ve bozulmaya uğramış malzeme ve kesitlerin bu yöntem kullanılarak modellenmesi mümkün görünmektedir.

Kayma ve aksenal uzama etkilerinin de göz önünde bulundurulduğu diferansiyel denklem takımları taşıma ve rijitlik matrisi yöntemleri bir arada kullanılarak çözülmüştür. Sistem dinamik rijitlik matrisi elde edilerek determinantını sıfır yapan frekans değerleri elde edilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

- Dinamik rijitlik matrisi taşıma matrisi yöntemi kullanılarak elde edilmiş ve lineer diferansiyel denklem takımının çözümünde etkili bir şekilde kullanılmıştır.
- Beklendiği gibi malzeme, kesit ve yarıçap oranı değişiminin doğal titreşim frekansları üzerinde oldukça önemli değişimler gösterdiği anlaşılmıştır.
- Malzeme değişim parametresi arttıkça doğal titreşim frekansları da artış göstermektedir.
- Kesit değişim ve yarıçap oranlarının artışı frekans değerlerinde düşüşe sebep olmaktadır.
- Malzeme değişim oranının frekanslar üzerindeki etkisi diğer iki parametreye göre daha az olduğu görülmüştür.

- Hiperbol tipi helisel çubuklarda geometri silindirik helisten uzaklaştıkça frekanslar azalmaktadır, ancak varil tipi helisel çubuklarda bu durumun tersi görülmektedir.

6. TEŞEKKÜR

Bu makalenin bir bölümü 22. Mekanik Kongresinde sözlü olarak sunulmuştur.

7. KAYNAKLAR

1. Epstein, I., 1947. The Motion of a Conical Coil Spring. *J. Appl. Phys.*, 18(4), 368–374, doi: 10.1063/1.1697660.
2. Massoud, M. P., 1965. Vectorial Derivation of the Equations for Small Vibrations of Twisted Curved Beams. *J. Appl. Mech.*, 32(2), 439–440, doi: 10.1115/1.3625823.
3. Mottershead, J.E., 1980. Finite Elements for Dynamical Analysis of Helical Rods. *Int. J. Mech. Sci.*, 22(5) 267–283, doi: 10.1016/0020-7403(80)90028-4.
4. Nagaya, K., Takeda, S., Nakata, Y., 1986. Free Vibration of Coil Springs of Arbitrary Shape. *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 23(6), 1081–1099, doi: 10.1002/nme.1620230607.
5. Yildirim, V., İnce, N., 1997. Natural Frequencies of Helical Springs of Arbitrary Shape. *J. Sound Vib.*, 204(2) 311–329, doi: 10.1006/jsvi.1997.0940.
6. Yildirim, V., 1998. A Parametric Study on the Free Vibration of Non-Cylindrical Helical Springs. *J. Appl. Mech. Trans. ASME*, 65(1), 157–163, doi: 10.1115/1.2789019.
7. Yildirim, V., 2002. Expressions for Predicting Fundamental Natural Frequencies of Non-Cylindrical Helical Springs. *J. Sound Vib.*, 252(3), 479–491, doi: 10.1006/jsvi.2001.4005.
8. Busool, W., Eisenberger, M., 2002. Free Vibration of Helicoidal Beams of Arbitrary Shape and Variable Cross Section. *J. Vib. Acoust. Trans. ASME*, 124(3), 397–409, doi: 10.1115/1.1468870.
9. Çalim, F.F., 2003. Viskoelastik, Anizotropik Eğri Eksenli Uzaysal Çubuk Sistemlerin Dinamik Analizi. ÇÜ Fen Bilimleri Enstitüsü,

- Doktora Tezi, Adana, 160.
10. Temel, B., Calim, F.F., 2003. Forced Vibration of Cylindrical Helical Rods Subjected to Impulsive Loads. *J. Appl. Mech.*, 70(2), 281–291, doi: 10.1115/1.1554413.
 11. Girgin, K., 2006. Free Vibration Analysis of Non-cylindrical Helices with Variable Cross-section by Using Mixed FEM. *J. Sound Vib.*, 297(3–5), 931–945, doi: 10.1016/j.jsv.2006.05.001.
 12. Calim, F.F., 2009. Dynamic Analysis of Composite Coil Springs of Arbitrary Shape. *Compos. Part B Eng.*, 40(8), 741–757, doi: 10.1016/j.compositesb.2009.04.017.
 13. Calim, F.F., 2009. Forced Vibration of Helical Rods of Arbitrary Shape. *Mech. Res. Commun.*, 36(8), 882–891, doi: 10.1016/j.mechrescom.2009.07.007.
 14. Yu, A.M., Hao, Y., 2012. Improved Riccati Transfer Matrix Method for Free Vibration of Non-cylindrical Helical Springs Including Warping. *Shock Vib.*, 19(6), 1167–1180, doi: 10.1155/2012/713874.
 15. Yu, A.M., Hao, Y., 2013. Warping Effect in Free Vibration Analysis of Unidirectional Composite Non-cylindrical Helical Springs. *Meccanica*, 48(10), 2453–2465, doi: 10.1007/s11012-013-9760-5.
 16. Yu, A.M., Hao, Y., 2013. Effect of Warping on Natural Frequencies of Symmetrical Cross-ply Laminated Composite Non-cylindrical Helical Springs. *Int. J. Mech. Sci.*, 74, 65–72, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2013.04.010.
 17. Kacar, I., Yildirim, V., 2016. Free Vibration/buckling Analyses of Non-cylindrical Initially Compressed Helical Composite Springs. *Mech. Based Des. Struct. Mach.*, 44(4), 340–353, doi: 10.1080/15397734.2015.1066687.
 18. Eratli, N., Yilmaz, M., Darilmaz, K., Omurtag, M.H., 2016. Dynamic Analysis of Helicoidal Bars with Non-circular Cross-sections via Mixed FEM. *Struct. Eng. Mech.*, 57(2), 221–238, doi: 10.12989/sem.2016.57.2.221.
 19. Ermis, M., Eratli, N., Argeso, H., Kutlu, A., Omurtag, M.H., 2016. Parametric Analysis of Viscoelastic Hyperboloidal Helical Rod. *Adv. Struct. Eng.*, 19(9), 1420–1434, doi: 10.1177/1369433216643584.
 20. Ermis, M., Omurtag, M.H., 2017. Static and Dynamic Analysis of Conical Helices Based on Exact Geometry via Mixed FEM. *Int. J. Mech. Sci.*, 131–132, 296–304, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2017.07.010.
 21. Aribas, U.N., Ermis, M., Eratli, N., Omurtag, M.H., 2019. The Static and Dynamic Analyses of Warping Included Composite Exact Conical Helix by Mixed FEM. *Compos. Part B Eng.*, 160, 285–297, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.10.018.
 22. Aribas, U.N., Omurtag, M.H., 2019. The Static Response of Sandwich Exact Conical Helices via MFEM. *J. Struct. Eng. Appl. Mech.*, 2(4), 153–163, doi: 10.31462/jseam.2019.04153163.
 23. Calim, F.F., Cuma, Y.C., 2020. Vibration Analysis of Nonuniform Hyperboloidal and Barrel Helices Made of Functionally Graded Material. *Mech. Based Des. Struct. Mach.*, 1–15, doi: 10.1080/15397734.2020.1822181.
 24. Cuma, Y.C., Calim, F.F., 2021. Free Vibration Analysis of Functionally Graded Cylindrical Helices with Variable Cross-section. *J. Sound Vib.*, 494, 115856, doi: 10.1016/j.jsv.2020.115856.
 25. İnan, M., 1964. Elastomekanikte Başlangıç Değerleri Metodu ve Taşıma Matrisi. İTÜ.

Türkiye'nin Güneş Enerjisi Potansiyeli ve İskenderun için Örnek Üretim Projeksiyonu

Levent Cenk KUMRUOĞLU¹ ORCID 0000-0001-6420-3761
Salih Berkan ATEŞ*² ORCID 0000-0002-8601-8927

¹İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik Temel Bilimleri Bölümü, Hatay

²İskenderun Teknik Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Hatay

Geliş tarihi: 22.03.2021

Kabul tarihi: 21.03.2022

Atıf şekli/ How to cite: KUMRUOĞLU, L.C., ATEŞ, S.B., (2022). Türkiye'nin Güneş Enerjisi Potansiyeli ve İskenderun için Örnek Üretim Projeksiyonu. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37(1), 293-305.

Öz

Kişi başına düşen enerji tüketiminin artmasıyla beraber, arz-talep dengesinin sağlıklı bir şekilde devam ettirebilmesi için enerji santrallerine olan yatırımlar devam etmektedir. Oluşan temiz enerji bilinci, çevreci ve uzun ömürlü Güneş Enerji Santrallerine (GES) olan yatırımları gün geçtikçe artırmaktadır. Yaşanan Covid-19 pandemisi süresince, enerji tüketimlerinin çoğu yenilenebilir santrallerinden karşılanmış ve GES'den üretilen elektrik, büyük paya sahip olmuştur. Yapılan bu çalışmada, özellikle Türkçe kaynaklar içerisinde GES'in hammadde kaynağı olan güneş ışınimleri ve ülkemizin güneş potansiyeline dair yapılan araştırmalar incelenmiştir. Güneş potansiyelinin, üretim potansiyeline dönüştürülmesinde oluşan kayıplar ve üretim potansiyelin artırılmasına yönelik konular araştırılmıştır. Ayrıca İskenderun Teknik Üniversitesi Kampüsü içinde bulunan bina çatısına 60 kWp GES tasarlanarak, PVGIS, PVsyst, SMA Web Desing yazılımları ile tahmini elektrik üretimleri hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Güneş potansiyeli, Çatı GES elektrik üretimi, Simülasyon yazılımları

Turkey's Solar Energy Potential and Sample Production Projection for Iskenderun

Abstract

With the increase in energy consumption per capita, investments in power plants continue in order to maintain the supply-demand balance in a healthy way. With the awareness of clean energy, investments in Solar Power Plants (SPP) are increasing day by day due to its environmentally friendly, longevity. During the Covid-19 pandemic, renewable power plants supplied most of the energy consumption, and electricity generated from SPP had a large share. In this study, especially in Turkish sources, the researches on solar radiations, which are the raw material source of SPP, and the solar potential of our country were examined. The losses in transforming solar potential into production potential and increasing production potential has been investigated. Besides, 60 kWp SPP was designed on the building roof within Iskenderun Technical University Campus and average electricity generations calculated by PVGIS, PVsyst, SMA Web Desing software were calculated.

Keywords: Solar potential, Rooftop SPP electricity generation, Simulation software

*Sorumlu (Corresponding author) yazar: S. Berkan ATEŞ, salihates.ee20@iste.edu.tr

1. GİRİŞ

Kovid-19 pandemisi sonucu ülkelerin aldığı önlemler neticesinde insanlar ticari-sosyal faaliyetlerine büyük oranda ara vermiş ve uzaktan çalışma kolaylığı sayesinde işlerin yürütülmesine ev-ofislerde (ya da e-ofis/elektronik ofis) devam etmiştir. Bu etkinin sonucu olarak mesken elektrik tüketiminde artış, ticarethane elektrik tüketiminde azalış gerçekleşmiştir. Enerjideki üretim ve tüketim verilerini açık kaynak olarak sunan “EPIAŞ ŞEFFAFLIK PLATFORMU”ndan takip etmek mümkündür. Bu platform ile Kovid-19 dönemindeki Aydınlatma, Mesken, Sanayi, Tarımsal Sulama, Ticarethane tüketimleri incelendiğinde “Mesken ve Sanayi” elektrik tüketiminde toplamda yaklaşık %4 oranında artış, “Ticarethane” elektrik tüketiminde %4,1 oranda bir azalış görülmektedir. Bu verilerle beraber toplam enerji talebine bakıldığında; enerji talebinde azalma meydana gelmiştir. Kovid-19 dönemi boyunca arzı oluşturan kaynaklar açısından değerlendirildiğinde; doğalgaz, kömür santrallerinde azaldığı, hidroelektrik santrallerinde rezervlerinden dolayı üretimde aktif rol almadığı, rüzgâr santrallerinde meteorolojik fenomenler etkisiyle üretimde düşüş olduğu, güneş santrallerinde etkilenme olmadığı ve hatta bir önceki yıla göre üretimdeki payının arttığı görülmektedir [1]. Diğer taraftan ABD, Çin, Almanya ve Avrupa Birliği Ülke'lerine bakıldığında Kovid-19 dönemindeki kısıtlamalarda elektrik üretiminde yenilenebilir enerjinin payı artmıştır. Almanya, İspanya, İtalya rüzgâr ve özellikle güneş enerjisinden faydalanarak yeni rekorlar kırmıştır. Sonuçta, rüzgârın mevsimsel etkilerinden dolayı güneş enerjisinden az elektrik ürettiğini söylemek hatalı bir yaklaşımdır olmayacaktır [2-5].

2. MATERYAL VE METOD

2.1. Güneş Potansiyelinin Araştırılması

Güneşlenme potansiyelinin araştırılmasında uydu tabanlı modeller kullanılmaktadır. Ülkemizdeki

güneşlenme potansiyelinin araştırıldığı çalışmaların çoğunda Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası (GEPA) haritası referans alınmıştır. GEPA haritası oluşturulurken 1985-2006 arasındaki veriler kullanılmış olup, günümüzde veriler yenilenmediği için güncelliğini yitirmiştir. Kılıç ve arkadaşları, Dicle Üniversitesi DÜPTAM (Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi) binası çatısına kurulan meteorolojik standartlara uygun güneş ölçüm istasyonundan elde edilen veriler kullanılarak maksimum global ışınım değeri 7,63 kWh/m²-gün ölçümlerken GEPA'da bu değer 6,57 kWh/m²-gün olarak belirtmiştir [6]. Emrahoğlu ve arkadaşları, Adana ili için 1978-1982 yılı verileri ile 2017 yılına ait meteoroloji istasyonu verilerini karşılaştırmıştır. 1978-1982 yıllarında günlük ortalama 15,74 MJ/ m²-gün iken 2017 yılında 17,75 MJ/ m²-gün olarak hesaplamıştır [7]. Bu durum, güneş potansiyeli haritalarının statik haritalar yerine dinamik ve online olarak meteorolojik verilerle (sıcaklık, rüzgâr, nem, bulutluluk vb parametreler) güncellenebilir altyapıya sahip olması gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Ülkemiz güneşlenme süresi ve toplam güneş ışınımı açısından güneş sektöründe lider olan ülkeler içinden Almanya'dan daha iyi durumdadır. Sinop ili güneş ışınımı bakımından alt seviyelerde (1400-1500 kWh/m²) olmasına rağmen, Almanya'nın güneş potansiyeli bakımından en yüksek bölgesi Bavyera Eyaletinden daha yüksektir [8]. Ülkemizdeki güneş enerjisi potansiyelinin Avrupa Birliği ülkeleriyle karşılaştırıldığında: Potansiyelin en yüksek olduğu bölge Güneydoğu Anadolu Bölgesi ve ardından Akdeniz Bölgesinin olduğu görülmektedir [9]. Taşova yaptığı çalışmada: SPSS17 istatistik programı ile ülkemizdeki yedi ayrı bölge için ortalama ışınım şiddeti, en fazla ışınım şiddeti, en az ışınım şiddeti, ortalama güneşlenme süresi, en fazla güneşlenme süresi, en az güneşlenme sürelerini incelemiştir. Ayrıca mevsimsel ortalama güneş enerjisi ve mevsimsel ortalama güneşlenme süresini hesaplamıştır [10].

Coğrafi bölgeler içindeki illere bakıldığında: Karadeniz Bölgesinde Karabük [11], Akdeniz Bölgesinde Antalya, Burdur [12], Güneydoğu Anadolu Bölgesinde Şanlıurfa, Adıyaman illeri [13] buldukları bölge içinde en yüksek güneşlenme potansiyeline sahiptir.

Güneş potansiyelinin değerlendirilmesinde farklı öneriler bulunmaktadır. Sak ve arkadaşları yaptığı çalışmada, Niğde ili için gerekli olacak elektrik tüketimlerini, tarımsal ve orman vasfını yitirmiş (marjinal arazi) arazinin % 3,4'üne 1670 MW kurulu güce sahip GES kurularak karşılanabileceğini hesaplamıştır [14]. Diğer bir çalışmada Kırbaş ve arkadaşları Burdur Gölü çevresi için 1220 MW kurulu güce sahip GES ile 2013000 GWh elektrik üretebilmesini ve her yıl

ülke ekonomisine yaklaşık 1,5 milyar TL katkı sağlayacağını hesaplamıştır [15].

2.2. Güneş Potansiyelinin Işınım İlişkisi

Güneş potansiyelinin doğru tahmini için global güneş ışınımının gerçeğe yakın tahmin edilebilir olması gerekmektedir. Bu açıdan değerlendirildiğinde veri bilimindeki yapay sinir ağları, makine öğrenimi, algoritmalar ve çeşitli denklemler önem kazanmaktadır. Veri biliminde aktif kullanılan method ve yöntemler güneş ışınım tahminleri içinde kullanılmaktadır. Gerçek zamanlı uyu tabanlı modeller verinin kalitesini artmasını, bu durum tahminin yüksek doğrulukta yapılmasını sağlamaktadır. Bunun sağladığı fayda ile saatlik ve 15 güne kadar üretim tahminleri günümüzde yapılabilmektedir.

Çizelge 1. Güneş ışınımıyla ilgili literatür taraması [16-28]

Güneş Işınımı Tahmini ile İlgili Yapılan Çalışmalar				
Çalışma Grubu	Çalışmanın Yapıldığı İl/Bölge	Veri Kaynağı	Kullanılan Yöntem/Algoritma/Denklem	Elde Edilen Sonuçlar
Kılıç ve ark. (2016)	Gaziantep, Şanlıurfa, Diyarbakır, Batman, Mardin	Her il için farklı yıl aralıklarına ait meteorolojik veri	Üstel ağırlıklı hareketli ortalama ve üstel ağırlıklı hareketli ortalama bazlı gaussian dağılımı	Her iki istatistik modeli ile kısa ve uzun vadeli tahminlerde kabul edilebilir sonuçlar elde etmiştir.
Şahan ve ark. (2016)	Akdeniz Bölgesi / 6 il 8 ilçe	1993-2010 yıllarına ait meteorolojik veri	Yapay Sinir Ağları (YSA) - Levenberg Marquand geri yayılım eğitim algoritması	YSA modeliyle hesaplanan değerler ile meteorolojik veriler uyumludur.
Arsıanoğlu (2016)	Kocaeli	1973-2006 yıllarına ait meteorolojik veri	30 farklı regresyon modeli	En iyi modellerin Lewis modeli (Model 23), Jin ve arkadaşları (Model-18) ve Bahel ve arkadaşları (Model 8) tarafından geliştirilen modellerin olduğu tespit etmiştir.
Kallioğlu ve ark. (2017)	Adıyaman	1985-2015 yıllarına ait meteorolojik veri	Geliştirilmiş bölgeye özgün beş farklı model	Adıyaman ili toplam güneş ışınımı tahmini için tüm modeller başarılı olmakla birlikte polinom modelin tercih edilmesi önermiştir.
Koşunalp (2018)	Elizabeth City State Üniversitesi Kampüsü	2015 yılına ait gerçek bir güneş panelinden elde edilen veriler	Geliştirilmiş-EWMA(Exponential Weighted Moving-Average) algoritması	Önerilen algoritma yüksek doğrulukta tahmin etmiştir.
Gök ve ark. (2019)	Kahramanmaraş / Elbistan	2018 yılına ait güneş enerji santraline ait aylık üretim değerleri	Yapay Sinir Ağları (YSA) - Levenberg-Marquardt (LM) algoritması	Gerçekçi elektrik üretimine ulaşmada başarılı olmuştur.
Kara (2019)	Çorum	1983-2018 yıllarına ait POWER (Prediction Of Worldwide Energy Resource) veri seti	Uzun Kısa Süreli Bellek (Long Short-Term Memory - LSTM) ağı	Önerilen model ile dört farklı algoritma (Rastgele ağaçlar, K-En yakın komşu, Gradyan güçlendirme ve Karar ağaçları) modelleri karşılaştırıldığında önerilen modelin daha iyi sonuçlar ortaya koymuştur.
Arsılan ve ark. (2019)	Mersin	Nisan 2017 – Mart 2018 tarihleri arasındaki gerçek ölçüm verisi (Kipp&Zonen marka CMP-11 model piranometre)	Yapay Sinir Ağları (YSA)	Model 37 (Zhang ve Huang) en iyi performansı göstermiştir
Külçü (2019)	Çankırı	Meteorolojik veri	Bünlülük katsayısı ve saat açılı logaritmik fonksiyon yaklaşımı	Önerilen modelin literatürde yer alan 8 farklı modelden daha başarılı tahmin etmiştir.
Karakaya ve ark. (2019)	Şanlıurfa	1985-2006 yıllarına ait meteorolojik veri	Beş farklı model ve dokuz farklı istatistik yöntemi	Şanlıurfa ili toplam güneş ışınımı tahmini için polinom modelin tercih etmiştir.
Gabralı ve ark. (2020)	İstanbul	2016 yılına ait meteorolojik veri	Yapay Sinir Ağları (YSA)	Yapay Sinir Ağları modellerinin Çoklu Lineer Regresyon modellerinden daha başarılı olduğunu göstermektedir.
Eğlik ve ark. (2021)	Afyonkarahisar	01 Ocak 2013 ve 16 Aralık 2013 tarihleri arasındaki gerçek ölçüm bilgisi (Kipp&Zonen marka CMP-6 model piranometre)	Ayrıştırma-birleştirme öğrenme yaklaşımı	17 Aralık 2013 ve 31 Aralık 2013 tarihleri arasında bulunan 15 günün saatlik olarak tahmini makul bir hata oranı ile tahmin etmiştir.

Güneş ışınımıyla ilgili literatürde yapılan çalışmalara ait özet Çizelge 1'de görülmektedir.

2.3. Güneş Potansiyelinin Üretime Dönüşmesi

2.1 ve 2.2 bölümlerinde güneş potansiyelinin araştırılması ve bu potansiyelin ışınımıyla olan ilişkisini konu alan makaleler incelenmiştir. Bu bölümde ise potansiyelin üretime dönüştürme elamanları, verimlilik ve uygulamadaki GES'lerin üretim örnekleri incelenecektir. Şebekeye bağlı Güneş Enerjisi Santrallerinin (GES) temel elemanları: Güneş panelleri, evirici, ac-dc kablolar, 0,4 kV/31,5kV transformator ve koruma elemanları olarak sıralanabilir. Güneş ışınımının elektrik enerjisine dönüştürülmesine kadar: Güneş paneli kayıpları, sıcaklığa bağlı kayıplar, kablo kayıpları, evirici verim kayıpları vb. kayıplar oluşmaktadır. Sarı ve arkadaşları, 1748 kWh/m² toplam güneş ışınımına sahip bir yerde 310 Wp 72 hücreli ve 16,14 verimlilik oranına sahip 3224 adet güneş panellerinden oluşan GES'de yaklaşık 10834 MWh enerji kapasitesine sahip olacağını, güneş panellerinin verimlilikleri ile enerji dönüşümü sonrası 1749 MWh enerji üretebileceğini PVsyst yazılımı ile hesaplamıştır. Diğer kayıplarda gözönüne alındığında şebekeye ancak 1553 MWh güç verilebilmektedir.

Güneş Paneli: 1883 yılında üretilen, güneş panellerinin atası olan selenyum güneş hücresinin verimliliği için yaklaşık %1 değerindeydi. 1950 yılına kadar güneş hücresi için malzeme değişikliği denemeleri, patetentleme süreçleri devam etmiştir. 1955 yılında Hoffman Electronics-Semiconductor Division şirketi %2 verimli, watt başına \$1785 ticari güneş panellerini piyasaya sürmüştür. 1960 yılına gelindiğinde Hoffman Electronics %14 verimli güneş panellerini duyurmuştur. 1969-1999 yılları güneş hücrelerinin yarıiletken malzemelerinde farklı teknoloji ve hammadde denemeleri, yol haritalarının oluşturulması, ABD-Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarının faaliyete geçmesi, uydu ve uzay programlarında aktif kullanımı, enerji krizlerine karşı çözüm önerisi olarak sunulması, tüketici elektroniğinde kullanımı, akademi çalışmaları ve ticari kullanım için GES kuruluşları vb. gelişmeler gerçekleşmiştir [29]. Günümüze gelindiğinde

güneş hücresi verimliliği yarışı devam etmektedir. Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı tarafından üretilen güneş hücresinde verimlilik %47,1 değerine ulaşmıştır. Fakat ticari olarak kullanımda Sunpower şirketine ait 400 W Maxison 3 modeli %22,6 verimlilikle ticari kullanım için en üst sıradaki panellerden birisi olarak yerini almaktadır [30-31].

Çizelge 2. Güneş paneli üretici firmaları [31-40]

Üretici	Model	Güç (Wp)	Hücre Tipi	Verim
SunPower	Maxison 3	400 W	N Tipi IBC	22,6 %
LG	Neon R	380 W	N Tipi IBC	22,0 %
REC	Alpha	380 W	N Tipi Hetero bağlantı H/C	21,7 %
FuturaSun	FU M Zebra	360 W	N Tipi IBC Half-cut	21,3 %
Trina Solar	Vertex S	400 W	P Tipi Mono Half-cut	20,8 %
Jinko Solar	Tiger Pro 6R13	390 W	N Tipi Mono Half-cut	20,7 %
Q cells	Q.Peak DUO G9	360 W	P Tipi Mono Half-cut	20,6 %
Winaico	WST-375MG	375 W	P Tipi Mono Half-cut	20,6 %
Longi Solar	Hi-Mo 4	375 W	P Tipi Mono Half-cut	20,6 %
Solaria	Power XT	370 W	P Tipi Mono Half-cut	20,5 %

2014 yılında ilk lisanssız GES yatırımlarının yapılmasıyla beraber, ülkemiz güneş potansiyelini kullanarak elektrik enerjisi üretimine 1,4 GWh ile katkı sağlamıştır. Oluşan temiz enerji bilinci ve temiz enerjiden elde edilen üretimlerin devlet alım garantili olması durumu, yatırımcıları bu alana çekmiştir. Bu durumla beraber yerli, yerli-yabancı ortaklı güneş paneli fabrikalarının açılması sağlanmıştır.

Çizelge 3. Yerli güneş paneli üretici firmaları [41-54]

Üretici	Model	Güç (Wp)	Hücre Tipi	Verim
Alfa Solar	A3S72M	385 W	Monokristal	19,61%
Ankara Solar	AS-M72 370-400W	400 W	Monokristal PERC	20,60%
CW Enerji	CWT405-144PM	405 W	Monokristal PERC Half-cut	20,28%
Elin Enerji	ELNSM72M-HC-HV	445 W	Monokristal PERC Half-cut	20,47%
Gazioglu Solar	GSE 400 MP	400 W	Monokristal	20,14%
Gest Enerji	G-M335	335 W	Monokristal	20,30%
GTC	MONO PERC+ BIFI GG1H-72	425 W	Çift Yüzlü Mono PERC	23,70%
2H Enerji	Winasol Solar Module-M2	400 W	Monokristal	20,13 %
HT Solar	HT60-18X-465W	600 W	Monokristal PERC Half-cut	21,40%
Mirsolar	Jaguar Serisi	440 W	Monokristal Tri-Cut Cell	20,58 %
Ödül Enerji	OSMp72	400 W	Monokristal PERC	20,07%
Parla Solar	A-MO370	370W	Monokristal PERC	20,17%
Schmid-Pekintaş	SPE 390 / 395	395 W	Monokristal PERC	19,85%
Solartürk	Anatolia Mono 72	405 W	Monokristal	20,25 %

Stantec tarafından hazırlanan raporda Eylül 2020 tarihi itibarıyla 16 adet panel üretici firma bulunmaktadır. Firma ortaklık yapılarına bakıldığında: Schmid-Pekintaş; Türk-Yabancı ortaklık ve HT Solar; yabancı ortaklı yatırım olması dışında geri kalan 14 firma Türk ortaklı yapıya sahiptir. Ürün bilgilerine web sitelerinden ulaşılan yerli üreticiler Çizelge 3'de yer verilmiştir.

2020 yılı için 375-395 W panellerin aktif bir şekilde GES kurulumlarında kullanıldığı düşünüldüğünde 2021 yılı için 400-445W güç aralığında yaklaşık %20 verimli güneş panellerin yaygın bir şekilde kullanılacağı öngörülmektedir. Ankara Solar, Gazioğlu Solar, 2H Enerji, Ödül Enerji, Solartürk firmalarının ürettiği 400 W güneş paneli ile SunPower firmasının ürettiği 400 W güneş paneli arasında yaklaşık %2 verim farkı görülmektedir. Aradaki verim kaybı, güneş potansiyelinden elde edemediğimiz bir kayıp olarak değerlendirildiğinde: 10000 MWh'lik güneş enerjisi potansiyelinin yaklaşık 200 MWh'lık kısmı elektrik enerjisine kazandırılmayacağını göstermektedir.

DC Kayıplar: Güneş panellerinde üretilen güçler Standart Test Koşullarında (STC) elde edilmektedir. STC koşulları, hücre veya panele dikey 1000 W / m² ışınım değerinde, 25°C güneş hücre sıcaklığı ve AM 1,5 güneş spektrumunda şartlarını oluşturmaktadır. Diğer yarıiletken malzemelerde de olduğu gibi güneş hücrelerinde sıcaklık artmasıyla beraber verimde düşüş yaşanmaktadır. Buradaki hücre verimindeki azalma güç çevriminde yaklaşık %7 kayıba sebep olmaktadır. Ayrıca güneş hücreleri güneşle ilk buluştuğunda üreticiden üreticiye fark etmekle beraber yaklaşık %1,5-4 arasında verim kaybı yaşanmaktadır. Eviriciye kadar giden kablolarda %2'ye kadar gerilim düşümüne müsade edilmektedir. SAM ve PVsyst yazılımları incelendiğinde; çevresel koşullar, güneş paneli-dizi uyumsuzluğu, konnektör geçirgenlik direnç kayıpları vb. diğer kayıplarda dikkate alındığında %14-15,6 arasında üretim kaybı yaşanmaktadır [56].

Evirici: GES'lerde Doğru Akım (DC) elektrik enerjisinin Alternatif Akım (AC) elektrik enerjisine dönüştürülmesinde kullanılan cihazlara evirici denilmektedir. Şebekeden bağımsız, şebekeye bağlı ve hibrit modelleri mevcuttur. Güneş potansiyelinin üretime dönüştürülmesinde kayıpların yaşandığı faktörlerden birisidir. DC gücün AC güce çevrilmesi esnasında yaklaşık %2,6 verim kaybı yaşanmaktadır. PV-SOL

yazılımı kullanılarak yapılan çalışmada: transformatör, AC kablo, DC kablo, azimuth, eğim, evirici gücü kayıpları, koruyucu ekipman geçiş dirençleri vb. diğer kayıplar dikkate alındığında bu kayıp %6,2'ye kadar çıkmaktadır.

Potansiyeldeki Verimliliğinin Artırılması: Güneş panellerinin daha verimli çalışması için güneş hücresi sıcaklığının optimum koşullarda tutulmasına yönelik çalışmalar literatürde yer almaktadır. Dikdörtgen mini kanallardan oluşan ve soğutucu akışkan olarak suyun kullanıldığı sistemde Erkan ve arkadaşları, 57 °C'ye kadar ısınan güneş paneli hücresi yüzey sıcaklığını, mini-kanal soğutma yöntemi kullanılarak 25 °C'ye kadar soğutmuştur [57]. Erol, su soğutmalı güneş paneli sisteminin, soğutmasız güneş panelinden %5,9 daha iyi olduğunu göstermiştir [58].

Diğer bir verimlik artırma yöntemi olarak optimal açıda sabitlenmiş kontrüksiyon yada çift-tek eksenli güneş takip sistemleri önerilmektedir. Bu yöntemlerin esas amacı güneş ışınımını daha fazla toplayıp daha fazla elektrik enerjisi üretmektir. Tolyan ve arkadaşları, Kırklareli Üniversitesi Pınarhisar Meslek Yüksek okulunda yaptığı çalışmada uyarlamalı sinirsel bulanık çıkarım uygulaması ile güneş takip sistemi (GTS) çalışmıştır. GTS, zenit ve azimut açılarını kontrol eden iki motora sahip çift eksenli olarak tasarlanmıştır. 120 W monokristal panelin kullanıldığı çalışmada, düşük ışınımında sabit sisteme göre çift eksen takip sistemi daha fazla enerji üretmiştir. 16 Eylül 2015'de yapılan ölçümde GTS'nin günlük enerji üretiminde sabit sisteme göre %47,76 daha fazla enerji ürettiği ölçülmüştür [59]. Muğla Üniversitesi Merkez kampüsünde toplam 7,9 kWp gücünde monokristal güneş panellerden oluşan sistem, PVsyst yazılımı kullanılarak çift eksen takip sistemi GES ve sabit açılı sistem GES tasarlanmıştır. Her iki GES karşılaştırıldığında çift eksen takip sistemin %30,79 daha verimli olduğunu hesaplayan Eke ve arkadaşları, hesaplanan ve ölçülen değerler arasındaki farkın %5'ten daha küçük olduğu sonucuna ulaşmıştır [60].

Simülasyon Yazılımı ve Enerji Üretim Tahmini: Yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisi

santralleri, üretim tahmini ve gerçekleşen üretim arasındaki sapmalar kabul edilebilir seviyededir. Santrallerin modellenmesinde kullanılan yazılımlarda kayıplara (evirici, kablo kayıpları vb.) yönelik düzenlemeler doğru yapıldığı takdirde güvenilir üretim değerleri hesaplanabilmektedir.

Dicle Üniversitesi Kampüsünde 250 kWp kurulu gücünde GES için PVGIS, Sunny Web Desing yazılımında simülasyonu yapan Haydaroglu ve arkadaşları, simülasyon değerlerini gerçek üretim değerleriyle karşılaştırmıştır. Bir yıllık gerçek üretim değerleri, Sunny Web Desing yazılımında +%3,9, PVGIS yazılımında -%4,85 üretim farklılığı hesaplamıştır. Yazar, üretim verilerine daha yakın olan Sunny Web Desing yazılımını önermiştir [61].

Bayrakçı ve arkadaşları yaptığı çalışmada, Aydın ili Çine ilçesinde 1 MW kurulu güce sahip GES için PVSol yazılımı ile tahmini değerler hesaplamıştır. Tahmini değerler ile üretim değerleri karşılaştırıldığında eylül ayı için 180000 kWh tahmine karşılık 192438 kWh, ekim ayı için 160000 kWh tahmine değere karşılık 167308 kWh üretim, şubat ayı için yaklaşık 120000 kWh tahmine karşılık 137453 kWh, mart ayı için yaklaşık 160000 kWh karşılık 184630 kWh üretim gerçekleşmiştir [62].

Atlım ve arkadaşları, Aydın ilinde bulunan 40 kW kurulu güce sahip Albatur Enerji GES ve 40 kW kurulu güce sahip Dülger GES verimlerini gerçek üretim değerleri ve PVsyst yazılımında tasarlanan verilerle karşılaştırmıştır. Rüzgar, sıcaklık, gölgeleme faktörleri yazılımda işlenmediği için gerçek değerler ve simülasyon değerleri arasında negatif/pozitif farklar bulunmuştur [63].

Psomopoulos ve arkadaşları, yaptığı çalışmada PVGIS, PVWatts ve RETScreen yazılımlarını üç farklı santral tipi için karşılaştırmıştır. Yunanistan başkenti Atina'da 9,6 kWp gücündeki Çatı Üzeri GES, Asopos'da 105,6 kWp Arazi GES ve Soroviç'de 98,4 kWp Çift Eksen Güneş Takipli GES santallarına ait gerçek üretim verileri ile simülasyon verileri karşılaştırmıştır. Veriler karşılaştırıldığında yıllık bazda sapma oranları

sırasıyla -%2,0 [PVGIS], -%9,2 [PVWatts], -%13,8 [RETScreen] hesaplanmıştır. İkinci santral için sapma oranları sırasıyla +%3,0, -%8,0, -%2,0 ve üçüncü santral için sapma oranları -%4,0, -%6,5, -%12,6 çıkmıştır. Bu sapma oranları değerlendirildiğinde PVGIS yazılımı, gerçek üretim değerlerine en yakın sonuçları vermektedir [64].

Kınalı, Karaman ilinde 1000 kW, Konya 500 kW ve 250 kW kurulu güçlere sahip GES'lerin PVGIS, PVSOL, PVSyst yazılımlarındaki simülasyon değerleri ile gerçek üretim değerlerini karşılaştırmıştır. Sırasıyla tesislerin yıllık gerçek üretim ile simülasyon değerleri arasında oluşan performans parametrelerindeki sapma oranlarını +%0,1, +%0,3 ve +%0,2 bulmuştur [65].

Yalçın, Antalya, Karaman ve Aksaray illerinde bulunan GES'lerin üç farklı iklim bölgesindeki çevresel koşulların, enerji üretimine etkisini incelemiştir. PVGIS yazılımıyla hesaplanan üretim değerleri, gerçek üretim değerleri ile karşılaştırıldığında Antalya ilinde bulunan GES için aylık bazda üretim sapması olurken, yıllık bazda %99 doğruluk oranıyla tahmin yapmıştır [66].

Isparta ilinde kurulan 1 MW kurulu güce sahip GES için gerçek üretim değerleri ile Helioscope, PVGIS, Polysun ve PVSol veri tabanlarından elde edilen üretim değerleri karşılaştırılmıştır. Gerçek üretim değerleri ile simülasyon değerleri arasındaki sapmalar sırasıyla; +%1,2, +%1,3, -%3,6 ve -%7,5 hesaplanmıştır [67].

Yapılan literatür araştırmasında: PVGIS, Sunny Web Desing, PVSol, PVsyst, PVWatts, RETScreen, SAM, HOMER gibi yazılımlar yaygın bir şekilde kullanıldığı görülmektedir. Ücretsiz ve web tabanlı olmasından dolayı PVGIS yazılımı (SARAH veri tabanı) ile deneme sürümü PVsyst V7.16 (Meteonorm 7.3 veri tabanı) kullanarak tahmini enerji üretim değerleri hesaplanmıştır. PVGIS ve PVsyst veri tabanı güncel ve kabul edilebilir hata payına sahip olmasından dolayı bu çalışmanın öncelikli veri seti olarak kabul edilmiştir.

3. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE SAHA UYGULAMASI

3.1. İskenderun Teknik Üniversitesi İçin Çatı GES Üretim Potansiyeli

Örnek Tasarım ve Üretim Verileri: İskenderun Teknik Üniversitesi (İSTE) 36,576008, 36,150566 koordinatlarında bulunan bina üzerine $\alpha=30^\circ$ eğimli güneş panellerinden oluşan 60 kWp kurulu güneş panelleri, Sunpower marka %22,6 verime sahip Monoperc 400 W tercih edilmiştir. Ayrıca DC elektriği AC elektriğe çevirecek olan evirici %98,3 verime sahip SMA 60 kW seçilmiştir. Yerleşimin yapılacağı binanın azimut açısı $\beta=23^\circ$ ve panellerin binaya paralel yerleşiminden dolayı; güneş panelleri açısı, bina açısıyla aynı seçilmiştir. Bina çatısına yerleştirilmiş örnek yerleşim Şekil 1’de ve Çatı Üzeri GES’ne ait özet Çizelge 4 görülmektedir.

Çizelge 4. Çatı GES sistem özeti

Çatı GES Teknik Özellikler Tablosu			
Hücre Tipi	MONO PERC	İnvertör Tipi	Trafosuz / On-Grid
Panel Markası	Sunpower Maxeon 3	İnvertör Markası	SMA
Panel Gücü	400W	İnvertör Gücü	60000W
Panel Verimliliği	22.6%	İnvertör Verimliliği	98.3%
Güç Sıcaklık Katsayısı	-0.29% / °C	MPTT Çalışma Aralığı	685 V - 800 V
Panel Eğim Açısı	30°	MPPT Sayısı	1 DC Box Girişi
Panel Azimutlu Açısı	23°	İnvertör Yerleşim Yeri	Elektrik Odası
Panel Adedi	150 adet	İnvertör Adedi	1 adet

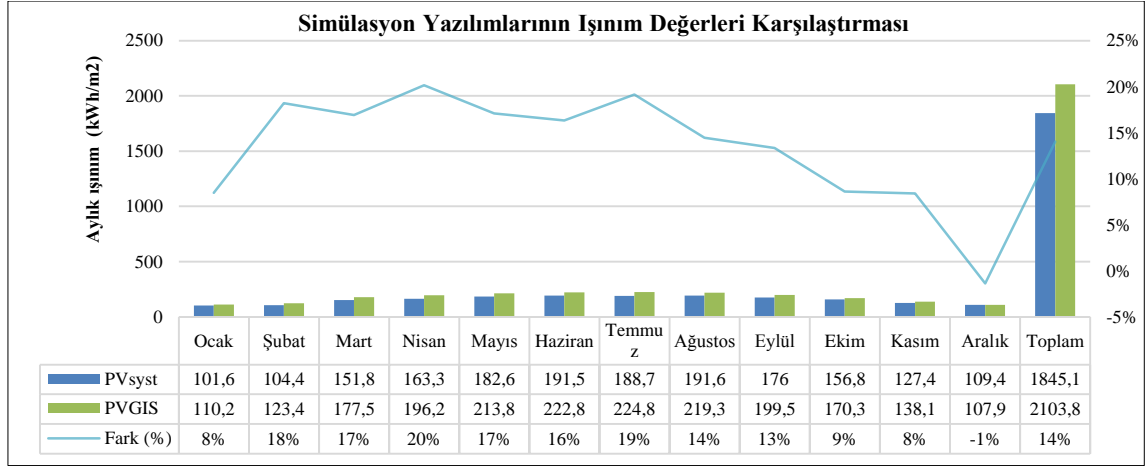


Şekil 1. 60 kWp Çatı GES Yerleşimi

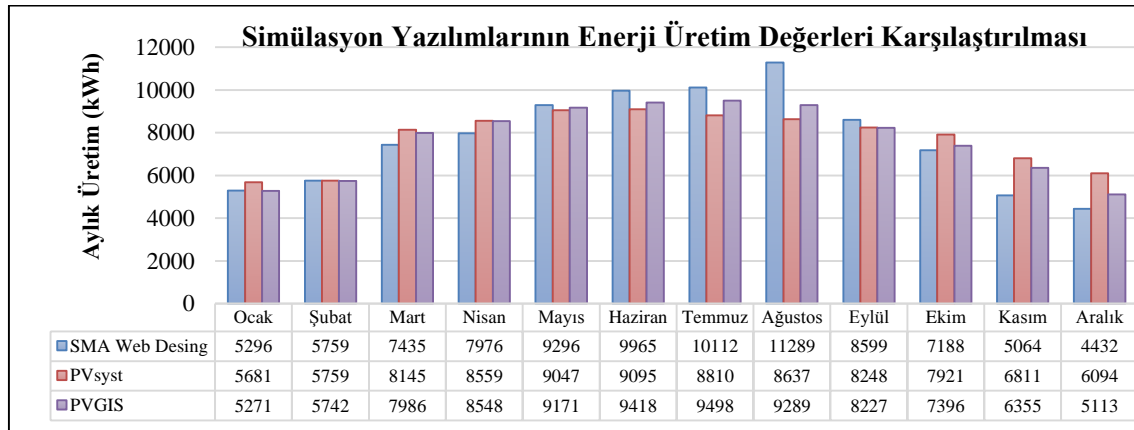
Şekil 2’deki PVGIS ve PVsyst yazılımları aylık bazda ışınım değerleri incelendiğinde: PVGIS veri tabanı Aralık ayı hariç diğer tüm aylarda daha yüksek ışınım olacağını tahmin etmiştir. 12 aylık toplam ışınım değerinde ise +%14 daha fazla ışınım öngörmektedir. SMA Web Desing yazılımı, ışınım değerlerini vermediği için Şekil-2 de yer verilmemiştir.

Şekil 3 ve Şekil 4’deki aylık tahmini veriler incelendiğinde SMA Web Desing yazılımı, yıllık 92411 kWh elektrik üretimine karşılık, PVGIS yazılımı yıllık 92012 kWh üretim hesaplamıştır. Hesaplanan yıllık üretim değerleri %0,43 fark ile birbirine yakın değerlerde bulunmuştur. Fakat ay bazlı grafikler incelendiğinde modeller arası farklar, önemli derecede ayrılmaktadır. Ağustos ayında SMA Web Desing daha fazla üretim öngörürken, aradaki fark %18 hesaplanmıştır. Benzer bir şekilde Kasım ayında PVGIS yazılımında %25 daha fazla üretim öngörülmüştür. Buradaki hata: SMA Web Desing yazılımı hava durumu verilerini, seçilen konuma 89 km uzakta olan Adana meteorolojik verilerinden alması sebep olmaktadır. Elektrik üretimindeki doğru tahminlemede güneş ışınım değerleri ve meteorolojik veriler (ortam sıcaklığı, nem, bulutluluk, rüzgar hızı vb.) önemli bir yere sahiptir. Bu yüzden SMA Web Desing yazılımı ile üretim verisi oluşturulurken, seçilen konumun meteorolojik veri istasyonuna yakınlığı dikkate alınmalıdır.

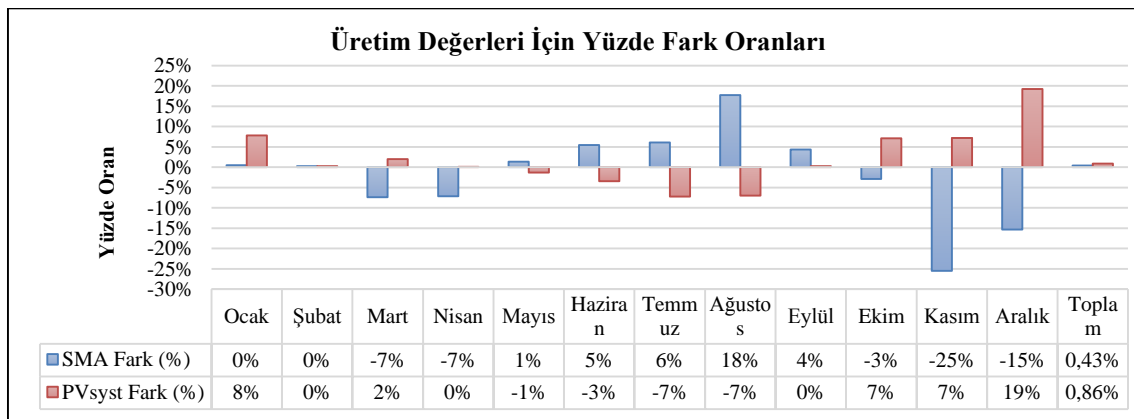
PVGIS ve PVsyst yazılımlarına ait veriler kıyaslandığında, yıllık üretim tahminleri sırasıyla 92012 kWh ve 92807 kWh olarak hesaplanmıştır. PVsyst yazılımı, yıllık üretimde +%0,84 farkla PVGIS’den fazla üretim yapacağını öngörmüştür. Fakat ay bazında karşılaştırıldığında: Nisan-Ağustos arası aylarda PVGIS’den daha az enerji üretileceği, buna karşılık Ocak, Ekim, Kasım, Aralık aylarında ise pozitif ayrılarak daha çok enerji üretileceği hesaplanmıştır.



Şekil 2. PVGIS ve PVsyst aylık tahmini ışınım değerleri



Şekil 3. SMA web desing, PVsyst ve PVGIS aylık tahmini enerji üretim değerleri



Şekil 4. PVGIS üretim değerleri referans alındığında: SMA web desing ve PVsyst aylık tahmini enerji üretim farkı

Yaklaşık Maliyet Hesabı: Tasarlanan Çatı Üzeri GES için maliyet hesabı yapıldığında toplam 50950\$ bedel çıkmaktadır. Bu maliyete ait kalemler Çizelge 5’de özetlenmiştir. Yatırım bedelinin geri dönüş süresi ayrıca hesaplanmıştır. Hesaplama verileri; özsermaye ile yapıldığı (fon-kredi-hibe kullanılmadığı durum), proje ömrünün 20 yıl, panellerde yıllık %0,5 verimin düşümü, yıllık enflasyon oranı %14,6, TCMB iskonto oranı %15,75, şebeke enerji birim fiyatı (OG Ticarethane) 0,113 \$/kWh kullanılmıştır.

Çizelge 5. Çatı üzeri GES maliyet tablosu

	İçerik	Bedeller
Güneş Paneli	150 adet 400W	30.000,00 \$
İnvertör	1 Adet 60 kW	7.200,00 \$
Konstrüksiyon ve Kurulum Maliyeti	1 set	4.750,00 \$
Pano, Kablo, Sayaç vb. diğer aksesuar malzemeler	1 set	5.500,00 \$
Mühendislik ve Resmi Harç Bedeli	1 set	3.500,00 \$
	Toplam:	50.950,00 \$

Hesaplama sonucunda yatırımın 4,9 yılda geri döndüğü ve yılda ortalama 10000\$ gelir elde edileceği hesaplanmıştır. Çevreci bir yaklaşıma örnek olan bu tesis ile yılda yaklaşık 38-ton karbon emisyonunun önüne geçilebilecektir. Üçgöl ve arkadaşları, SMA Web Desing yazılımını kullanarak Süleyman Demirel Üniversitesi bina çatıları için GES’in elektriksel hesaplamalarını, fayda maliyet analizi ve karbon salınımlarını incelediği çalışmada, özsermaye ile yatırımın 14 yılda geri döneceğini hesaplamıştır [8]. Aradan geçen yaklaşık 7 yıl içinde, güneş paneli fiyatlarındaki düşüş, yatırımların daha hızlı dönmesini sağlamıştır.

Kurulması planlanan tesisin, Seviyelendirilmiş Elektrik Maliyeti (LCOE) 0,079\$/kWh hesaplanmıştır. Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IRENA) LCOE tablosuna bakıldığında, ülkemiz 2019 yılı için 0,0776\$/kWh görülmektedir. Bu durum, yapılan hesaplamaların tutarlılığını göstermektedir [68].

4. SONUÇLAR

Güneş potansiyelinin belirlenmesi için yapılan çalışmalarda; ülkeler arası karşılaştırma, illerin potansiyellerine dair araştırmalar, uydu tabanlı modelleme, meteorolojiden alınan verilerden; makine öğrenimi yöntemleri ve istatistik hesaplama yöntemleri kullanılarak tahminleme ve doğrulama çalışmaları yer almaktadır. Güneş ışınımının doğru tahminlenmesi, güneş potansiyelinin oluşturulması açısından önem arz etmektedir. Işınım miktarının belirlenmesinde; Astronomik Faktörler (güneş deklinasyonu, güneş saati, güneş-yeryüzü mesafesi vb.), Coğrafik Faktörler (enlem, boylam, yükselti vb.), Fiziksel Koşullar (hava moleküllerinin serpinti yoğunluğu, su buharı, kirlilik, O₂, N₂, CO₂, O vb. atmosfer elementlerinin yoğunlukları) ve Meteorolojik Koşullar (güneş ışınımı, güneşlenme süresi, sıcaklık, yağış, bağıl nem, bulutluluk, buharlaşma, toprak sıcaklığı, çevreden gelen yansımalar vb.) dikkate alınarak modellemeler yapılmaktadır [69]. Bu koşulları oluşturan verilerin oluşturduğu hazır veri setleri (SARAH ve Meteororm 7.3) kullanılarak elektrik enerjisi üretim projeksiyonu oluşturulmuştur.

“Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretim Yönetmeliği” kapsamında Öztüketim modeli düşünülerek, İskenderun Teknik Üniversitesi Mimarlık Fakültesi çatısına için 60 kWp/60 kW Çatı GES tasarımı yapılmıştır. Piyasada aktif olarak kullanılan üç farklı simülasyon yazılımı kullanılarak Çatı Üzeri GES için üretim projeksiyonları hesaplanarak üretim değerleri karşılaştırılmıştır. Tasarımda kullanılan ürünler, güncel fiyatlarıyla beraber piyasada rahatlıkla bulunabilecek şekilde seçilmiştir. Hesaplanan sonuçlara göre, yatırımın 4,9 yılda geri döndüğü ve yıllık 38-ton karbon salınımının önüne geçileceği sonucuna ulaşılmıştır. Hesap sonuçları, uluslararası enerji ajans kaynakları ile karşılaştırılarak yapılan çalışmanın tutarlılığı ispatlanmıştır. Tasarımın, İskenderun ilçesi ve yakın coğrafyada yatırım yapmayı düşünenler için örnek teşkil edecektir.

5. KAYNAKLAR

1. Bulut, M., 2020. Analysis of the Covid-19 Impact on Electricity Consumption and Production. Sakarya University Journal of Computer and Information Sciences, 3(3), 283-295.
2. IEA 2021, Covid-19 impact on electricity, <https://www.iea.org/reports/covid-19-impact-on-electricity>, Erişim Tarihi: 07.03.2021.
3. IEA, VRE Share in Electricity Demand in Germany January-December 2020, <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/vre-share-in-electricity-demand-in-germany-january-december-2020> (Erişim Tarihi: 07.03.2021).
4. IEA, VRE Share in Electricity Demand in Spain January-December 2020, <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/vre-share-in-electricity-demand-in-spain-january-december-2020>, Erişim Tarihi: 07.03.2021.
5. IEA, VRE Share in Electricity Demand in Italy January-December 2020, <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/vre-share-in-electricity-demand-in-italy-january-december-2020>, Erişim Tarihi: 07.03.2021.
6. Kılıç, H., Gümüş, B., Yılmaz, M., 2016. Diyarbakır İli için Güneş Enerjisi Verilerinin Meteorolojik Standartlarda Ölçülmesi ve Analizi. EMO Bilimsel Dergi, 5(10), 15-19.
7. Emrahoğlu, N., Yeğingil, İ., 2019. Çukurova Üniversitesi'nde Ölçülen Güneş Işınım Verileri Analizi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 34(2), 87-96.
8. Alcan, Y., Demir, M., Duman, S., 2018. Sinop İlinin Güneş Enerjisinden Elektrik Üretim Potansiyelinin Ülkemiz ve Almanya İle Karşılaştırarak İncelenmesi. El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi, 5(1), 35-44.
9. Dinçer, F., 2011. Türkiye'de Güneş Enerjisinden Elektrik Üretimi Potansiyeli-Ekonomik Analizi ve AB Ülkeleri ile Karşılaştırmalı Değerlendirme. Kahramanmaraş Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences, 14(1).
10. Taşova, M., 2018. Türkiye'nin Güneş Enerjisi Parametre Değerleri ve Güneş Enerjisinden Faydalanma Olanakları. İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi, 7(3), 10-17.
11. Oral, M., 2020. Türkiye'nin Güneş Enerjisi Potansiyeli ve Pv Uygulamalarının Yerel Ölçekte Değerlendirilmesi: Karabük İli Örneği. International Journal of Geography and Geography Education, (42), 482-503.
12. Çiftçi, A., Altundağ, E., 2017. Burdur Bölgesi Güneş Enerjisi Potansiyelinin Elektrik Üretiminde Kullanılabilirliği. Mesleki Bilimler Dergisi (MBD), 6(2), 111-120.
13. Behçet, R., Oral, H., Gül, H., 2013. Adıyaman İlinin Güneş Enerjisi Potansiyeli ve Kullanımı. Batman Üniversitesi, Yaşam Bilimleri Dergisi, 3(2), 52-67.
14. Sak, T., Gönen, Ç., Kara, E., 2019. Niğde İlinde Güneş Enerjisi Santrallerinin Yaygınlaştırılması ve Sera Gazı Emisyonlarının Azaltılmasının Potansiyeli. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 31(2), 327-335.
15. Kırbaş, İ., Çifci, A., 2019. Feasibility Study of a Solar Power Plant Installation: A Case Study of Lake Burdur, Turkey. El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 6 (3), 830-835.
16. Kılıç, H., Gümüş, B., Yılmaz, M., 2016. Güneydoğu Anadolu Bölgesi için Global Güneş Işımasının ve Güneşlenme Süresinin İstatiksel Metodlar ile Tahmin Edilmesi ve Karşılaştırılması. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 7(1), 73-83.
17. Şahan, M., Okur, Y., 2016. Akdeniz Bölgesine Ait Meteorolojik Veriler Kullanılarak Yapay Sinir Ağları Yardımıyla Güneş Enerjisinin Tahmini. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fen Dergisi, 11(1), 61-71.
18. Arslanoğlu, N., 2016. Kocaeli İçin Mevcut Global Güneş Işınımı Tahmin Modellerinin Uygulanabilirliğinin Değerlendirilmesi. Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering, 21(1), 217-226.
19. Kallioğlu, M.A., Ercan, U., Karakaya, H., Durmuş, A., 2017. Adıyaman İlinde Yatay Düzleme Gelen Global Güneş Işınım Değerlerinin Ampirik Modeller ile Geliştirilmesi. Fırat Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, 29(1), 151-159.

20. Koşunalp, S., 2018. Güneş Enerjisi Kullanan Sistemler için Yeni Bir Enerji Tahmin Algoritması. Uludağ University, Journal of the Faculty of Engineering, 23(1), 369-378.
21. Gök, A.O., Yıldız, C., Şekkeli, M., 2019. Yapay Sinir Ağları Kullanarak Kısa Dönem Güneş Enerjisi Santrali Üretim Tahmini: Kahramanmaraş Örnek Çalışması. Uluslararası Doğu Anadolu Fen Mühendislik ve Tasarım Dergisi, 1(2), 186-195.
22. Kara, A., 2019. Uzun-Kısa Süreli Bellek Ağı Kullanarak Global Güneş Işınımı Zaman Serileri Tahmini. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 7(4), 882-892.
23. Arslan, G., Bayhan, B., Yaman, K., 2019. Mersin/Türkiye için Ölçülen Global Güneş Işınımının Yapay Sinir Ağları ile Tahmin Edilmesi ve Yaygın Işınım Modelleri ile Karşılaştırılması. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 7(1), 80-96.
24. Külcü, R., 2019. Global Güneş Radyasyonunun Ampirik Modellenmesinde Kullanılabilecek Yeni Bir Modelin Geliştirilmesi ve Çankırı İlinde Uygulanması. SDÜ Yekarum e-Dergi, 4(2), 1-8.
25. Karakaya, H., Avcı, A., Ercan, U., Kallioğlu, M., 2019. Şanlıurfa İlinde Yatay Yüzeye Gelen Anlık Global Güneş Işınımının Modellenmesi. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 10 (1), 147-155.
26. Gabralı, D., Aslan, Z., 2020. Güneş Enerjisi Potansiyelinin Çoklu Lineer Regresyon ve Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi. AURUM Mühendislik Sistemleri ve Mimarlık Dergisi, 4(1), 23-36.
27. Eşlik, A., Akarşlan, E., Hocaoğlu, F., 2021. Güneş Işınımı Tahmininde Ayrıştırma-Birleştirme Öğrenme Yaklaşımı. Journal of the Institute of Science and Technology, 11(1), 132-144.
28. Sarı, V., Özyiğit, F., 2020. Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Yerleşkesinde Güneş Enerjisi Santralinin Ekonomik Analizi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Fen ve Mühendislik Dergisi, 22 (65), 517-526.
29. Wikipedia, Timeline Of Solar Cells, https://en.wikipedia.org/wiki/Timeline_of_solar_cells, Erişim Tarihi: 07.03.2021.
30. NREL, Best Research-Cell Efficiency Chart, <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>, Erişim Tarihi: 07.03.2021.
31. Sunpower, Solar Panels, <https://sunpower.maxeon.com/int/solar-panel-products/sunpower-maxeon-solar-panels>, Erişim Tarihi: 07.03.2021.
32. LG, Solar Panels, <https://www.lg.com/global/business/neon-r>, Erişim Tarihi: 07.03.2021.
33. REC, Solar Panels, <https://www.recgroup.com/en/alpha>, Erişim Tarihi: 07.03.2021.
34. Futurasun, Solar Panels, <https://www.futurasun.com/wpcontent/uploads/2020/03/2020>, Erişim Tarihi: 07.03.2021.
35. Trinasolar, Solar Panels, <https://www.trinasolar.com/englb/product/VERTEX-DE09>, Erişim Tarihi: 07.03.2021.
36. Jinko Solar, Solar Panels, <https://www.jinkosolar.com/en/site/tigerpro>, Erişim Tarihi: 07.03.2021.
37. Q-cells, Solar Panels, https://www.q-cells.eu/products/solar_panels/qpeak-duo-ml-g9.html, Erişim Tarihi: 07.03.2021.
38. Winaico, Solar Panels, <https://www.winaico.com.au/products/wst-mg>, Erişim Tarihi: 07.03.2021.
39. Longisolar, Solar Panels, https://en.longisolar.com/home/products/Hi_MO4.html, Erişim Tarihi: 07.03.2021.
40. Solaria, Solar Panels, <https://www.solaria.com/powerxt-overview>, Erişim Tarihi: 07.03.2021.
41. Alfa Solar Enerji, Monokristal Paneller, <https://www.alfasolarenerji.com/a3s72m/>, Erişim Tarihi: 07.03.2021.
42. Ankara Solar, Mono Perc Solar Panel <http://www.ankarasolar.com.tr/urun-detay/as-m72-370-400w-mono-perc-solar-panel/>, Erişim Tarihi: 07.03.2021.
43. CW Enerji, Half-cut Solar Panel, <https://cw-enerji.com/urun/cwt-144pm-390-405-wp-half-cut-big-cell/>, Erişim Tarihi: 07.03.2021.
44. Elin Enerji, Monokristal Paneller, <http://elinenerji.com.tr/tr/urunler/hizmetler/foto-voltaik-moduller/elinsemi/monokristalin-paneller/elns72m-hc>, Erişim Tarihi: 07.03.2021.

45. Gazioğlu Solar, Güneş Panelleri, <http://www.gazioglusolar.com.tr/urunlerimiz>, Erişim Tarihi: 07.03.2021.
46. GEST Enerji, Güneş Panelleri, <http://www.gestenergy.com/ustmenu.asp?id=70&euid=2&sid=70>, Erişim Tarihi: 07.03.2021.
47. GTC, Cam-Cam Güneş Panelleri, <http://gtctrade.com/tr/urunler/>, Erişim Tarihi: 07.03.2021.
48. Daxler Enerji, Güneş Panelleri, <https://www.2henerji.com/#urunler>, Erişim Tarihi: 07.03.2021.
49. HT Solar, Güneş Panelleri <https://htsolar.com.tr/tr/service/gunespanelleri/mono-prec/>, Erişim Tarihi: 07.03.2021.
50. Mirsolar, Güneş Panelleri, <https://www.mirsolar.net/>, Erişim Tarihi: 07.03.2021.
51. Ödül Solar, Monokristal Güneş Paneli, <https://odulsolar.com/product/72-hucre-monokristal-gunes-paneli-385w-400w/>, Erişim Tarihi: 07.03.2021.
52. Parla Solar, Güneş Paneli, <http://www.parlasolar.com/gunes-paneli-uretimi/>, Erişim Tarihi: 07.03.2021.
53. Schmid-Pekintas, Monokristal Güneş Paneli, <https://www.schmid-pekintas.com/fotovolttaik-gunes-paneli.html>, Erişim Tarihi: 07.03.2021.
54. Solartürk Enerji, Mono Panel Serisi, <https://www.solarturk.com.tr/mono-panel-serisi.html> Erişim Tarihi: 07.03.2021.
55. Stantec., 2020. Türkiye'deki PV Panel Üretimi Pazar Araştırması Raporu. Erişim Tarihi: 07.03.2021.
56. Malvoni, M., Leggieri, A., Maggiotto, G., Congedo, P. M., De Giorgi, M. G., 2017. Long Term Performance, Losses and Efficiency Analysis of a 960 kWp Photovoltaic System in the Mediterranean Climate. *Energy Conversion and Management*, 145, 169-181.
57. Erkan, O., Özkan, M., Arslan, O., 2018. Mini Kanal İle Fotovoltaik Hücre Soğutma. *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, 2(2), 34-38.
58. Erol, H., 2021. Su Soğutmalı Fotovoltaik Sistemin Performans Analizi. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 4 (2), 142-148.
59. Toyulan, H., Hüner, E., 2017. Uyarlamalı Sinirsel Bulanık Çıkarım (ANFIS) Tabanlı Güneş Takip Sistemi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 17(2), 546-554.
60. Eke, R., Senturk, A., 2012. Performance Comparison of a Double-Axis Sun Tracking Versus Fixed PV System. *Solar Energy*, 86(9), 2665-2672.
61. Haydaroglu, C., Gümüş, B., 2017. Examination of Web-Based PVGIS and SUNNY Design Web Photovoltaic System Simulation Programs and Assessment of Reliability of the Results. *Journal of Engineering and Technology*, 1(1), 32-38.
62. Bayrakçı, H.C., Gezer, T., 2019. Bir Güneş Enerjisi Santralının Maliyet Analizi: Aydın İli Örneği. *Teknik Bilimler Dergisi*, 9(2), 46-54.
63. Atlım, F., Esen, B., Demirtaş, M., 2019. Balıkesir İlinde Farklı İki GES Tesisinin Panel Yerleşimi Açısından Verimliliklerinin Karşılaştırılması. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(2), 679-696.
64. Psofopoulos, C.S., Ioannidis, G.Ch., Kaminaris, S.D., Mardikis, K.D., Katsikas, N.G., 2015. A Comparative Evaluation of Photovoltaic Electricity Production Assessment Software (PVGIS, PVWatts and RETScreen). *Environmental Processes*, 2(S1), 175-189.
65. Kınalı, M.Y., 2019. Güneş Enerjisi Simülasyon Programlarının Gerçek Verilerle Doğruluk Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Konya.
66. Yalçın, Ö., 2019. Kazımkarabekir, Korkuteli ve Aksaray Bölgelerindeki Güneş Enerji Santrallerinin İklim Koşullarına Göre Performans Değerlendirmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İleri Teknolojiler Ana Bilim Dalı, Karaman.
67. Ceylan, O., Taşdelen, K., 2018. Isparta İli için Fotovoltaik Programlarının Simülasyon Sonuçlarının Doğruluğunun İncelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18(3), 895-903.
68. IRENA, Solar Cost, <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Costs/Solar-Costs>, Erişim Tarihi: 07.03.2021.

69. Besharat, F., Dehghan, A. A., Faghih, A. R., 2013. Empirical models for estimating global solar radiation: A review and case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 798-821.

Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi Yazım Kuralları

Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi mühendislik bilimlerindeki güncel bilimsel ve teknik gelişmeleri araştırmacılara ve mühendislere ulaştırmayı hedeflemektedir. Tüm mühendislik alanları ile ilgili teorik/deneysel ve uygulamaya yönelik çalışmalar Dergi'nin ilgi alanındadır. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi daha önce başka hiçbir yerde yayımlanmamış, özgün ve güncel bilimsel araştırma ve uygulamaları içeren makale ve kısa bildirimleri ile Dergi'de daha önce yayımlanmış makalelerle ilgili tartışmaları kabul etmektedir. Çeviri ve derleme makaleler kabul edilmemektedir. Makaleler Türkçe veya İngilizce olabilir. Dergi'ye gönderilen yazılar yayınlansın veya yayınlansın iade edilmez. Makaleleri yayınlama yetkisi dergi yayın kuruluna aittir.

Makalenin tamamı bilgisayar ortamında hazırlanmalı baskıya hazır biçimde iki adet (birisinde yazar adları ve adresleri olmamak üzere) **Dergi web sayfasında verilen örnek şablona uygun hazırlanmış olarak elektronik ortamda veya e-posta ekinde gönderilmelidir.**

Makale, A4 (210x297 mm) boyutlu kağıda, Windows uyumlu Word ortamında, Times New Roman font kullanılarak, birer aralıkla yazılmalı, ana başlıklar 12 Punto (koyu), yazar adları 12 Punto (koyu), alt başlıklar ve metin 10 punto olmalıdır.

Çizimler ve çizelgelerle birlikte, makaleler 15 sayfadan, kısa bildirimler 4 sayfadan daha uzun olmamalıdır. **Makale Türkçe ise: Türkçe Başlık, İngilizce Başlık, Öz, Anahtar Kelimeler, Abstract** (İngilizce öz), **Keywords, Metin, Semboller** (gerekliyse), **Teşekkür** (gerekliyse) ve **Kaynaklar**,

Makale İngilizce ise: İngilizce Başlık, Türkçe Başlık, Abstract, Keywords, Öz (Türkçe öz), **Anahtar Kelimeler, Text, Notations** (gerekliyse), **Acknowledgments** (gerekliyse) ve **References** sırası içinde düzenlenmelidir.

Başlık kısa ve açık olmalı, içeriği yansıtılabilmelidir. **Öz** (ve **Abstract**) çalışmanın amacını, kapsamını, yöntemini ve ulaşılan sonuçları kısaca tanımlamalı ve 150 kelimeyi aşmamalıdır. En az üç, en fazla beş tane anahtar kelime verilmelidir. Başlık, Öz ve İngilizce başlıklı Abstract birinci sayfaya sığdırılmalı ve ana metin ikinci sayfadan başlatılmalıdır. **Metin** yalnız bir dil ve anlatımla yazılmalı, makale Türkçe ise Türkçe, makale İngilizce ise İngilizce yazım kurallarına uygun olmalıdır.

Bölüm ve alt bölüm başlıkları numaralanmalıdır. Denklemler numaralanmalı ve bu numaralar satır sonunda parantez içinde gösterilmelidir. Yazılarda yalnızca SI birimleri kullanılmalıdır. Semboller uluslararası kullanıma uygun seçilmeli; her bir sembol ilk kullanıldığı yerde tanımlanmalıdır. Teşekkür olabildiğince kısa olmalı, çalışmaya katkısı ve desteği bulunan kişi ve kuruluşlar belirtilmelidir. Çizelgeler, çizimler ve fotoğraflar metin içine yerleştirilmeli, her birine numara ve başlık verilmeli ve başlıklar çizim ve fotoğrafların altına, çizelgelerin üstüne yazılmalıdır.

Kaynaklar metinde köşeli parantez içinde numaralanmalı ve kaynaklar listesinde metin içinde veriliş sırasına uygun biçimde belirtilmelidir. Etik kuralları gereğince, alıntılar tırnak içinde verilmeli ve bir referans numarası ile kaynak belirtilmelidir. Kaynaklarda şu bilgiler verilmelidir:

Makale ise: Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi., yıl. makalenin tam başlığı. derginin adı, cilt, sayı, başlama ve bitiş sayfaları.

Kitap ise: Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi., yıl. kitabın tam adı. cilt numarası, varsa editörü, yayımlandığı yer, son sayfa no.

Bildiri ise: Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi., yıl. bildirim tam başlığı. konferansın adı, yapıldığı yer.

Elektronik ortamdan alınmış ise: Bildiri sadece CD/DVD'de yayınlanış ise: Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi., diğer yazarlar, yıl, bildirim adı. konferansın adı (CD/DVD), yapıldığı yer, yıl. "Konferansın adından hemen sonra parantez içerisinde CD/DVD olduğu belirtilecektir."

Tez ise: Yazarın soyadı, adının baş harfi., yıl. tezin adı. derecesi, sunulduğu kurum, son sayfa no.

Rapor ise: Yazarın soyadı, adının baş harfi., diğer yazarlar, yıl. raporun adı. türü, numarası, kuruluşun adı, yayımlandığı yer.

Web Sitesi ise: Yazar(lar) belli ise; yazarın soyadı, adının baş harfi., diğer yazarlar, varsa yayımlandığı yıl. yazının başlığı, web adresi (<http://www.xxxxx.xxx.xxx>), Erişim Tarihi: gün.ay.yıl.

Kurum/Kuruluşlara ait ise; Kurum adı, varsa yayımlandığı yıl. yazının başlığı, web adresi (<http://www.xxxxx.xxx.xxx>), Erişim Tarihi: gün.ay.yıl.

Elektronik kitap/rapor ise: Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi veya kitap/raporu yayımlayan kurum veya kuruluşun adı, varsa yayımlandığı yıl, konunun tam adı, Erişim Tarihi: gün.ay.yıl.