

e- ISSN:2458-7575

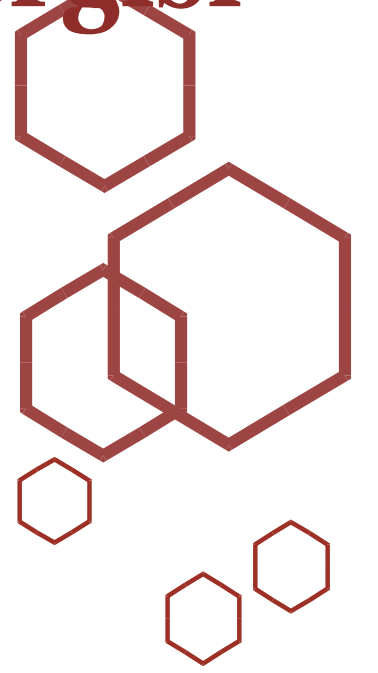
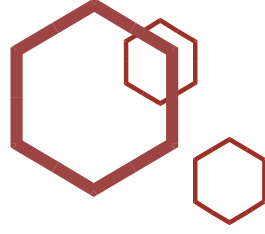


Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Fen Bilimleri Dergisi

Bilecik Şeyh Edebali University

Journal of Science



edergi@bilecik.edu.tr

Sahibi / Publisher

Prof. Dr. İbrahim TAŞ (Rektör / Rector)

Editör / Editor

Prof. Dr. Oğuz ARSLAN (Enstitü Müdürü / Institute Director)

Yardımcı Editörler/ Associate Editors

Dr. Öğr. Üyesi Merve ŞENTÜRK ACAR

Dr. Öğr. Üyesi Sema LEBLEBİCİ

Yazı İşleri Müdürü / Editorial Office Director

Mustafa BEKTAŞ

Redaksiyon / Proofreading

Araş. Gör. İlhan ASLAN

Alan Editörleri / Field Editors

Prof. Dr. Özkan KÜÇÜK

Prof. Dr. Çağlayan AÇIKGÖZ

Prof. Dr. Oğuz ARSLAN

Prof. Dr. Sıddıka ÖZKALDI KARAKUŞ

Doç. Dr. Tolga YÜKSEL

Doç. Dr. Nazile URAL

Doç. Dr. Uğur YÜZGEÇ

Doç. Dr. Arslan ÜNAL

Doç. Dr. Süheyla YEREL KANDEMİR

Dr. Öğr. Üyesi. Oğuzhan DEMİR

Dr. Öğr. Üyesi. Dr. Hülya SİLAH

Dr. Öğr. Üyesi. Sema LEBLEBİCİ

Dr. Öğr. Üyesi. Gürhan ERTAŞGIN

Dr. Öğr. Üyesi. Onur EROĞLU



Sahibi / Publisher

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi adına Rektör Prof. Dr. İbrahim TAŞ
Prof. Dr. İbrahim TAŞ (Rector) on behalf of Bilecik Şeyh Edebali University

EDİTÖR / EDITOR-IN-CHIEF

Prof. Dr. / Prof. Dr. Oğuz ARSLAN

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 11210 Bilecik, Türkiye
Bilecik Şeyh Edebali University, Graduate School of Sciences, 11210 Bilecik, Turkey

Telefon/Phone: +90228 2141130 **Faks /Fax:** +90228 2141132

E-posta/E-mail: oguz.arslan@bilecik.edu.tr

Yazı İşleri Müdürü / Editorial Office Director

Mustafa BEKTAŞ

İletişim Bilgileri / Contact Informations

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü , 11210 Bilecik, Türkiye

Bilecik Şeyh Edebali University, Graduate School of Sciences, 11210 Bilecik, Turkey

Hakemli bir dergi olan Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi yılda iki kez yayımlanır ve yayımlanan tüm eserlerin yayın hakkı Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi'ne aittir.

A refereed journal "Bilecik Şeyh Edebali University Journal of Science" is published twice a year and Bilecik Şeyh Edebali University holds the copyright of all published material that appear in this journal.

İletişim Bilgileri/Contact Information: Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü 11210 Bilecik/Türkiye / Bilecik Şeyh Edebali University, Graduate School of Science, 11210 Bilecik, Turkey e-posta/e-mail: <http://fbe.bilecik.edu.tr/>

Cilt 6, Sayı 1, 2019
Volume 6, Number 1, 2019

e-ISSN 2458-7575

Hakem Listesi / Reviewer Board

- Prof. Dr. Ahmet Necati YELGİN, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Karabük Üniversitesi, Türkiye
Prof. Dr. Cihan KARAKUZU, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Türkiye
Prof. Dr. Habibe Canan CABBAR, Kimya Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Türkiye
Prof. Dr. Hüseyin ANKARA, Maden Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Türkiye
Prof. Dr. Mustafa Arif ÖZGÜR, Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Türkiye
Prof. Dr. Mustafa Serdar GENÇ, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Erciyes Üniversitesi, Türkiye
Prof. Dr. Yusuf ATALAY, Fizik Bölümü, Fen-Edebiyat Fakültesi, Sakarya Üniversitesi, Türkiye
Doç. Dr. Abdullah AKBULUT, Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Türkiye
Doç. Dr. Abdullah YILDIZ, Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Uşak Üniversitesi, Türkiye
Doç. Dr. Ahmet Fevzi SAVAŞ, Elektrik ve Enerji Bölümü, Meslek Yüksekokulu, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Türkiye
Doç. Dr. Doğan AYDIN, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Türkiye
Doç. Dr. Doktor Hamit ALYAR, Fizik Bölümü, Fen Fakültesi, Çankırı Karatekin Üniversitesi, Türkiye
Doç. Dr. Hüseyin TOPAL, Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Türkiye
Doç. Dr. Levent UĞUR, Makine Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Amasya Üniversitesi, Türkiye
Doç. Dr. Mustafa Oguzhan ÇAGLAYAN, Biyomühendislik Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Türkiye
Doç. Dr. Önder ALTUNTAŞ, Uçak Gövde-Motor Bakım Bölümü, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Türkiye
Doç. Dr. Pakize ERDOĞMUŞ, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Doç. Dr. Serhat YILMAZ, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, Türkiye
Doç. Dr. Süheyla YEREL KANDEMİR, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Türkiye
Doç. Dr. Turgay Tugay BİLGİN, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bursa Teknik Üniversitesi, Türkiye
Dr. Öğr. Üyesi Süleyman KILIÇ, Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Türkiye
Dr. Öğr. Üyesi Abutullah TUĞCU, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Tavşanlı Meslek Yüksekokulu, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Türkiye
Dr. Öğr. Üyesi Alper Kürşat UYSAL, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Türkiye
Dr. Öğr. Üyesi Barış ALTIOKKA, Elektrik ve Enerji Bölümü, Meslek Yüksekokulu, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Türkiye
Dr. Öğr. Üyesi Bengi ŞANLI, Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Mersin Üniversitesi, Türkiye
Dr. Öğr. Üyesi Ceyda Nur ÖZTÜRK, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Türkiye
Dr. Öğr. Üyesi Cihan ŞAHİN, Elektronik Ve Otomasyon Bölümü, Meslek Yüksekokulu, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Türkiye
Dr. Öğr. Üyesi Devrim AKGÜN, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Bilgisayar ve Bilişim Bilimleri Fakültesi, Sakarya Üniversitesi, Türkiye
Dr. Öğr. Üyesi Emrah DOKUR, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Türkiye
Dr. Öğr. Üyesi Emre DANDIL, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Türkiye
Dr. Öğr. Üyesi Fuat KAYA, Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye
Dr. Öğr. Üyesi Gamzenur ÖZSİN, Kimya Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Türkiye
Dr. Öğr. Üyesi Hacer BİLİR ÖZHAN, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bursa Teknik Üniversitesi, Türkiye
Dr. Öğr. Üyesi Halit ÖZTEKİN, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Yozgat Bozok Üniversitesi, Türkiye
Dr. Öğr. Üyesi Kadir DOĞANŞAHİN, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Artvin Çoruh Üniversitesi, Türkiye
Dr. Öğr. Üyesi Kıvanç TAŞKIN, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Türkiye
Dr. Öğr. Üyesi Meryem GÖKTAŞ, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Meslek Yüksekokulu, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Türkiye
Dr. Öğr. Üyesi Mevlüt KARACOR, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Hasan Ferdi Turgutlu Teknoloji Fakültesi, Manisa Celâl Bayar Üniversitesi, Türkiye
Dr. Öğr. Üyesi Murat İSKEFİYELİ, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Bilgisayar ve Bilişim Bilimleri Fakültesi, Sakarya Üniversitesi, Türkiye
Dr. Öğr. Üyesi Murat ÖZSOY, Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Sakarya Üniversitesi, Türkiye
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa NİL, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Manisa Celâl Bayar Üniversitesi, Türkiye
Dr. Öğr. Üyesi Nesibe YALÇIN, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bartın Üniversitesi, Türkiye
Dr. Öğr. Üyesi Nihan KAZAK ÇERÇEVİK, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Bilecik Mühendislik Fakültesi, Şeyh Edebali Üniversitesi, Türkiye
Dr. Öğr. Üyesi Nur KUBAN TORUN, İşletme Bölümü, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Türkiye
Dr. Öğr. Üyesi Serap KAZAN, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Bilgisayar ve Bilişim Bilimleri Fakültesi, Sakarya Üniversitesi, Türkiye
Dr. Öğr. Üyesi Sunay BEYHAN, Maden Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Türkiye
Dr. Öğr. Üyesi Süleyman UZUN, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Türkiye
Dr. Öğr. Üyesi Şenol AVCI, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Türkiye
Araş. Gör. Dr. Bora ŞENER, Makine Mühendisliği Bölümü, Makine Fakültesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Türkiye
Araş. Gör. Hacımurat DEMİR, Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Aksaray Üniversitesi, Türkiye
Araş. Gör. Alper YARGIÇ, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Türkiye
Araş. Gör. Hüsamettin UYSAL, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Türkiye

İÇİNDEKİLER

Araştırma Makaleleri / Research Articles

Malzeme Modellerinin Sac Metal Sonlu Elemanlar Analizi Tahmin Performansına Etkisinin Değerlendirilmesi <i>Özlem KÖLEOĞLU GÜRSOY, Emre ESENER</i>	1-11
A Novel Stress-Level-Specific Feature Ensemble for Drivers' Stress Level Recognition <i>İdil IŞIKLI ESENER</i>	12-23
Bath Temperature Effect on c-axis Preferred Orientations and Band Gap of Semiconductor ZnO Thin Films <i>Sinan TEMEL</i>	24-28
Multi-Criteria Decision-Making Modeling of <i>b</i>-type ORC-Binary Geothermal Power Plant: EATWOS Analysis <i>Aslı ERGENEKON ARSLAN, Merve ŞENTÜRK ACAR, Oğuz ARSLAN</i>	29-48
Enerji Tüketiminde Optimizasyon İçin Temel Hareket Analizi Kullanılarak Yeni Bir Pompa Dişlisinin Geliştirilmesi <i>Burak ÖZTÜRK, Özkan KÜÇÜK</i>	49-57
IEC62305-2'ye Göre Yıldırım Risk Analizi: Hakkâri Üniversitesi Örneği <i>Ali ERDUMAN, Fikret YILDIZ</i>	58-65
Güneş Panellerinde Cuk Dönüştürücü Tabanlı Değişken Şartlar Altında D&G, BM ve YSA Algoritmalarının Karşılaştırmalı Performans Analizi <i>Okan GÜNGÖR</i>	66-76
Silindir Etrafındaki Kararsız Akışın Farklı Türbülans Modelleri ile Sayısal Olarak İncelenmesi <i>İlyas KARASU</i>	77-84
Performance Analysis of Combined Cycle Power Plant Using Multi-Effect Distillation (MED) Desalination Process <i>Oğuzhan ERBAŞ</i>	85-90
Investigation of Lauric Acid Conversion with the STA Incorporated Heterogeneous Catalysts in the Liquid Phase Reaction <i>Veli ŞİMŞEK, Kırali MÜRTEZAOĞLU</i>	91-103
Bilecik İli Hayvansal Atıklarının Biyogaz Potansiyelinin İncelenmesi <i>Süheyla YEREL KANDEMİR, Emin AÇIKKALP</i>	104-108

Derleme Makaleleri / Review Articles

Ahşap ve Ahşap Yapıların Dünü, Bugünü ve Yarını <i>Özlem ÇALIŞKAN, Erdem MERİÇ, Murat YÜNCÜLER</i>	109-118
--	---------

Araştırma Makalesi - Research Article

Malzeme Modellerinin Sac Metal Sonlu Elemanlar Analizi Tahmin Performansına Etkisinin Değerlendirilmesi

Evaluation of Material Model Effect on Sheet Metal Forming Finite Element Analysis Prediction Performance

Özlem KÖLEOĞLU GÜRSOY¹, Emre ESENER^{2*}

Geliş / Received: 05/04/2019

Reviz / Revised: 29/04/2019

Kabul / Accepted: 02/05/2019

Öz- Sac metaller ağırlık/dayanım oranlarından ötürü başta otomotiv olmak üzere pek çok sektörde tercih edilmektedirler. İnce malzemelerle çalışıldığından ve karmaşık ürün formları hedeflendiğinden sac metal şekillendirme prosesleri genelde karmaşık prosesler olarak karşımıza çıkmaktadırlar. Çoğunlukla seri üretim ürünü olarak tercih edilmelerinden dolayı sac metal kalıp takımları oldukça pahalıdır. Bu nedenle kalıp takımlarının tasarım aşamasında telafi edilme zorunluluğu ortaya çıkmıştır. Günümüzde bu amaçla en sık kullanılan yöntem sonlu elemanlar analizidir. Sonlu elemanlar analizlerinin ise tahmin hassasiyetlerinin yüksek olması gerekmektedir. Hassasiyete etki eden en baskın parametre ise malzemelerin plastik davranışının tanımlandığı malzeme modelleridir. Bu çalışmada sonlu elemanlar malzeme modellerinin tahmin performansına etkisi incelenmiş olup bu amaçla derin çekme, kare kutu çekme ve V-kalıpta eğme prosesleri 4 farklı malzeme (DP600, DP980, DC05, AA5754) için incelenmiştir. Çalışmada izotropik malzeme-izotropik pekleşme kabullü yapan (Power Law), anizotropik malzeme-izotropik pekleşme kabullü (Hill-48, Barlat-89) ve anizotropik malzeme - kinematik pekleşme kabullü (Yoshida - Uemori) dört farklı malzeme modeli kullanılmıştır. Gerçekleştirilen simülasyon sonrasında sonuçlar deneysel verilerle kıyaslanarak sonlu elemanlar tahmin performansları ortaya konulmuştur. En hassas tahminlerin tüm modellerde kinematik pekleşme kabullü malzeme modeli ile elde edildiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler- Sac Metal Şekillendirme, Sonlu Elamanlar Analizi, Plastisite Modelleme, Mekanik Özellik

Abstract- Sheet metals have a wide usage area due to their weight to strength ratios especially in automotive industry. Sheet metal forming processes can be described as complex manufacturing processes for working with thin materials by complex product forms, and die tools are expensive since sheet metal forming processes are in use at mass production. Therefore, sheet metal die tools must be compensate in design stages. Today, finite element analysis (FEA) are in use widely for this purpose. However, prediction performance of FEAs must be accurate. Material models which defines the plastic behavior of the materials effects the accuracy significantly. In this study, the effect of material models on finite element analysis prediction performance was investigated for this purpose deep drawing, square cup drawing, and V-die bending processes were studied using 4 different materials (DP600, DP980, DC05, AA5854). In the study, material models are used as isotropic material-isotropic hardening assumption (Power Law), anisotropic material-isotropic hardening assumption (Hill-48, Barlat-89), and anisotropic material-kinematic hardening assumption (Yoshida-Uemori). Each process was simulated using 4 different material models, than simulation results were compared with experimental studies. The most accurate results were obtained with kinematic hardening material model for all processes.

Keywords- Sheet Metal Forming, Finite Element Analysis, Plasticity Modelling, Mechanical Proper

¹İletişim: okoleoglu@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0001-8638-1817>)

Makine Mühendisliği Bölümü, Bilecik Şeyh Edebali Üniv, Gülümbe Kampüsü, Merkez, Bilecik

^{2*}Sorumlu yazar iletişim: emre.esener@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-5854-4834>)

Makine Mühendisliği Bölümü, Bilecik Şeyh Edebali Üniv, Gülümbe Kampüsü, Merkez, Bilecik

I. GİRİŞ

Plastik şekil verme yöntemi bir malzemeyi akma gerilmesinin üzerinde bir yükte şekil değişimine zorlayarak kalıcı bir form elde edilmesini amaçlamaktadır. Bu kapsamda dövme gibi kütle şekillendirme yöntemlerinin yanında sac metal ŞEKİLLENDİRME gibi düzlem gerilme problemleri de plastik şekil verme başlığı altında yer almaktadır. Sac metaller ağırlık/dayanım oranı avantajlarından dolayı özellikle otomotiv ve havacılık sektörlerinde sıklıkla tercih edilmektedir [1]. Sac metal şekillendirme yöntemleri ince malzemelerle çalışıldığından ve ürün geometrilerinin karmaşık olmasından dolayı içerisinde birçok değişkenin yer aldığı karmaşık problemler olarak karşımıza çıkmaktadır. Bir malzemenin hata olmaksızın şekil değiştirebilme kabiliyetine şekillendirilebilirlik denilmektedir. Şekillendirilebilirlik kavramı proses ve malzeme özellikleriyle doğrudan ilişkilidir. Proses parametrelerinden parça tutucu kuvvet, sürtünme koşulu, pres hızı ve kalıp geometrileri bir malzemenin şekillendirilebilirliğine en çok etki eden parametreler olarak öne çıkmaktadır [2-5].

Sac metal şekillendirme yöntemlerinde karşılaşılan hatalar genellikle yırtılma, kırışma, kulaklanma ve şekil bozukluğu olarak ortaya çıkmaktadır [6-8]. Bu hatalardan yırtılma hatası genellikle parça tutucu kuvvet ve kalıp hızından, kırışma ve kulaklanma hataları ise parça tutucu kuvvetten kaynaklanmaktadır [9-11]. Şekil bozukluğu hatası ise genellikle malzemenin mekanik özellikleri ile ilişkilidir [12]. Sac metal kalıp yüzeyleri geliştirilirken malzemede meydana gelebilecek bu hataların tasarım aşamasında elimine edilmesi gerekmektedir. Aksi takdirde bu değişimler deneme-yanılma gibi pahalı ve zaman kaybına neden olan yöntemlerle gerçekleştirilmektedir. Günümüzde bilgisayar teknolojisinin gelişimine paralel olarak proses tasarım aşamalarında genellikle bilgisayar destekli mühendislik araçları kullanılmaktadır. Bu kapsamda sonlu elemanlar analizleri mühendislik problemlerinin çözümünde en çok kullanılan yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Sac metal sonlu elemanlar analizleri hem büyük deformasyonlarla uğraşıldığından hem de temas problemleri barındırdığından non-lineer problemlerdir [13]. Bu problemlerde tahmin hassasiyetinin yüksek olması proseste karar verme mekanizmalarındaki deneme-yanılma süresini doğrudan etkilemektedir. Bu kapsamda sonlu elemanlar analizleri açısından tahmin hassasiyetine yönelik çeşitli çalışmalar literatürde yer almaktadır [14-17]. Bu araştırmalar genellikle eleman boyutu üzerine yoğunlaşmaktadır [18]. Son zamanlarda yapılan çalışmalar ise malzemenin plastik davranışının modellenme etkisinin eleman boyutundan daha fazla olduğunu göstermektedir [19, 20].

Bu çalışmanın amacı sac metal şekillendirme proseslerinde malzemelerin plastik davranışını modelleyen plastisite modellerinin sonlu elemanlar tahmini üzerine etkisinin araştırılması olup bu amaçla hem şekil bozukluğu hem de yırtılma açısından farklı plastisite modelleri sonlu elemanlar tahmin performansı açısından incelenmiştir.

II. MALZEMENİN PLASTİK DAVRANIŞININ MODELLENMESİ

Bir malzeme şekil değişimi sırasında önce elastik sonra plastik deplasmana uğramaktadır. Bir malzemenin elastik davranışı lineer olduğundan bu davranışı matematiksel olarak modellemek oldukça kolay bir işlemdir. Elastik bölgede gerilme ve gerinim değerleri arasındaki ilişki Denklem (1)'deki şekilde yazılabilir.

$$\sigma = E.\varepsilon \quad (1)$$

Burada E, elastisite modülünü temsil etmektedir. Malzemelerin plastik davranışı non-lineerlik barındırdığından ve akma gerilmesinin gelişimi pekleşme ile temsil edildiğinden plastik davranışı modellemek elastik davranışta olduğu gibi kolay olmamaktadır. Plastik gerinimler, tüm yükleme geçmişine ve gerilme durumuna nasıl ulaşıldığına bağlıdır. Bir malzemenin genel gerilme durumunda plastik davranışlarını modelleyebilmek için, akmanın olduğu andaki gerilme bileşenleri arasındaki ilişkiyi açıklayan bir akma kuralına ve şekillendirme prosesi suresince başlangıç akma gerilmesinin gelişimini tanımlayan pekleşme kuralına ihtiyaç vardır [21]. Plastisite modelleri bu pekleşme kurallarını izotropik ve kinematik olmak üzere temelde iki farklı şekilde tanımlamaktadır. İzotropik pekleşme durumunda akma yüzeyinin asal gerilme uzayında yer değiştirmeden orantısal olarak büyüdüğü, kinematik pekleşme durumunda ise akma yüzeyinin boyut değiştirmedeği yalnızca asal gerilme uzayında öteleme gerilmesi miktarında konum değiştirdiği kabul edilmektedir.

Bu çalışma kapsamında plastik davranışı modelleyen plastisite modelleri izotropik malzeme-izotropik pekleşme, anizotropik malzeme-izotropik pekleşme ve anizotropik malzeme-kinematik pekleşme kabulü yapan modeller olarak üç ana grupta incelenmiştir. Bu modellerden izotropik malzeme-izotropik pekleşme kuralı kabulü yapan plastisite modelleri (Power Law) genellikle basit modeller olup günümüzde Holloman [22] ifadesi ile temsil edilebilmektedirler. Holloman ifadesinde gerilme ve plastik gerinim arasındaki ilişki Denklem (2)'deki şekilde yazılabilir.

$$\sigma = K \cdot \varepsilon_p^n \quad (2)$$

Burada K, mukavemet katsayısını ve n, pekleşme üstelini temsil etmektedir. Bu modellerden farklı olarak malzeme davranışını anizotropik olarak kabul eden, izotropik pekleşme temelli ve en sık kullanılan malzeme modelleri Barlat-89 [23] ve Hill-48 [24] modelleridir. Bu modellerden Barlat-89 modeli 1989 yılında Barlat ve Lian tarafından sunulmuştur [23]. Bu model akma yüzeyi malzemenin anizotropik parametrelerine bağlı olarak elde etmektedir. Düzlem gerilme problemleri için Barlat-89 modeli şu şekilde yazılabilir.

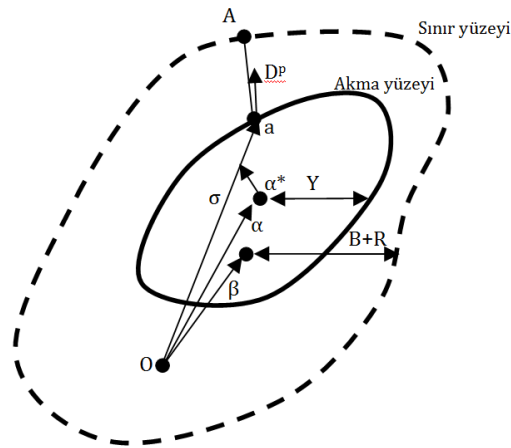
$$2\sigma_y^m = a|K_1 + K_2|^m + a|K_1 - K_2|^m + c|K_2|^m \quad (3)$$

Burada σ_y akma gerilmesi olup K_1 ve K_2 farklı yönlerdeki akma gerilmelerine, a ve c ise anizotropi katsayılarına bağlı parametrelerdir. Yine bu denklemde yer alan m üsteli ise malzemenin kristal kafes yapısı ile ilişkili olup yüzey merkezli kübik malzemeler için 8, hacim merkezli kübik malzemeler için ise 6 olarak kullanılması tavsiye edilmektedir [23]. Barlat dışında malzemeyi anizotropik olarak kabul eden ve günümüzde hala en sık kullanılan plastisite modeli 1948 yılında R. Hill tarafından ortaya atılmıştır [24]. Hill tarafından önerilen plastisite modeli düzlem gerilme için şu şekilde yazılabilmektedir.

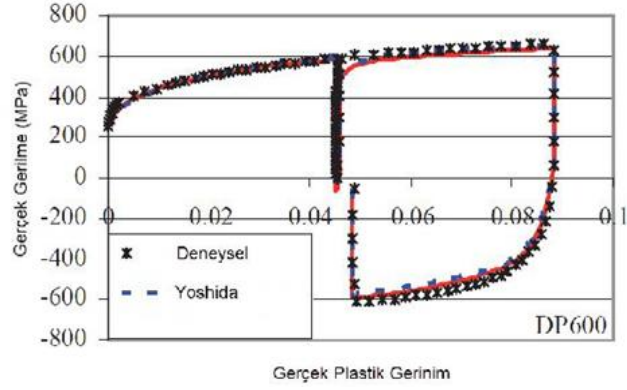
$$F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2 - 1 = 0 \quad (4)$$

Burada σ_{11} , σ_{22} ve σ_{33} asal gerilmeler ve σ_{12} , σ_{23} ve σ_{31} ise kayma akma gerilmeleridir. F, G H, L, M ve N sabitleri ise malzemenin anizotropi katsayılarına veya akma gerilmelerine bağlı parametrelerdir.

Bu çalışmada incelenilen üçüncü grup plastisite modeli olarak ise kinematik pekleşme kabulü yapan modellerden günümüzde en sık kullanılan Yoshida-Uemori [25] kinematik pekleşme modeli tercih edilmiştir. Pekleşmeyi temsil edebilmek adına bu model, akma yüzeyi ve sınır yüzey olmak üzere iki yüzeye ihtiyaç duymaktadır. Şekillendirme prosesinde, akma yüzeyi boyut olarak değişmez fakat deformasyonla akma yüzeyinin merkez noktası hareket eder, sınır yüzeyi ise hem şekil olarak hem de konum olarak değişir. Şekil 1’de iki yüzeyli kinematik modelin şematik gösterimi görülmektedir. Burada, “O” akma yüzeyinin merkez noktasıdır, α^* , akma yüzeyinin mevcut durumdaki merkezidir ve α ise sınır yüzeyin merkezidir. β , iki yüzeyin merkez noktaları arasındaki ilişkiyi temsil etmektedir. Y, akma yüzeyinin boyutudur ve deformasyon süresince değişmemektedir. B+R, sınır yüzeyinin boyutunu temsil etmektedir, R izotropik pekleşme ile ilişkilidir. Yoshida nonlineer pekleşme modeli Bauschinger etkisini ve sac metal şekillendirme proseslerindeki malzeme davranışını tanımlamakta başarılı bir modeldir. Yeni nesil yüksek mukavemetli çelikler için de başarılı sonuçlar verebilmektedir. Şekil 2’de Yoshida kinematik pekleşme modeli ile tahmin edilen bir malzeme davranışı gerilme-gerinim eğrisi üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 1. İki yüzeyli modelin şematik gösterimi [26]



Şekil 2. Yoshida nonlinear kinematik pekleşme modeli ile malzeme davranışının tahmini [27]

III. UYGULAMA ÇALIŞMALARI

Bu çalışma kapsamında yukarıda anlatılanlar doğrultusunda plastisite modellerinden Power Law, Hill-48, Barlat-89 ve Yoshida-Uemori modellerinin sac metal şekillendirme sonlu elemanlar analizleri tahmin performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda sac metal şekillendirme işlemlerinden derin çekme, kare kutu çekme ve V-kalıpta eğme prosesleri kullanılmıştır. Bu proseslerin tercih nedeni her bir prosesin farklı bir karakterizasyona sahip olmasıdır. Bu proseslerde toplamda 4 adet malzeme kullanılmış olup bu malzemeler DP600, DP980, AA5754 ve DC05'tir. Plastisite modellerinin ihtiyaç duyduğu mekanik özellikler mekanik testler vasıtası ile elde edilebilmektedir. Bu çalışma kapsamında kullanılan tüm malzemelerin yine bu çalışmada kullanılan tüm plastisite modellerine ait parametreler Tablo 1'de özetlenmiştir. Çalışma kapsamında yapılan sonlu elemanlar analizlerinde Dynaform ticari yazılımı tercih edilmiştir.

Tablo 1. Çalışma kapsamında kullanılan malzemelerin malzeme modellerine göre mekanik özellikleri [28-30]

	DP600	DP980	DC05	AA5754
POWER LAW MALZEME MODEL PARAMETRELERİ				
Mukavemet katsayısı (MPa)	1080,7	1142	538,5	425
Pekleşme üsteli	0,152	0,12	0,25	0,29
HILL-48 MALZEME MODEL PARAMETRELERİ				
Akma gerilmesi (MPa)	420	652	171	142,5
Elastisite modülü (GPa)	206	207	191	69
Mukavemet katsayısı (MPa)	1080,7	1142	538,5	425
Pekleşme üsteli	0,15	0,12	0,25	0,29
Ortalama anizotropi	0,89	0,74	1,57	0,61
BARLAT-89 MALZEME MODEL PARAMETRELERİ				
Akma gerilmesi (MPa)	420	652	171	142,5
Elastisite modülü (GPa)	206	207	191	69
Hadde yönünde anizotropi	0,82	0,85	1,96	0,5
Hadde yönüne 45°'de anizotropi	0,92	0,70	1,35	0,66
Hadde yönüne dik anizotropi	0,91	0,72	1,62	0,61
Kristal yapı üsteli (m)	6	6	6	8
YOSHIDA-UEMORI MALZEME MODEL PARAMETRELERİ				
B (MPa)	555	775,2	168	159,4
c	200	239,2	100	75,08
R _{sat} (MPa)	190	109,8	200	160
K (MPa)	1080,7	1142	538,5	425
b (MPa)	110	74	13	81,25
h	0,9	0,82	1,6	0,6

A. Derin Çekme

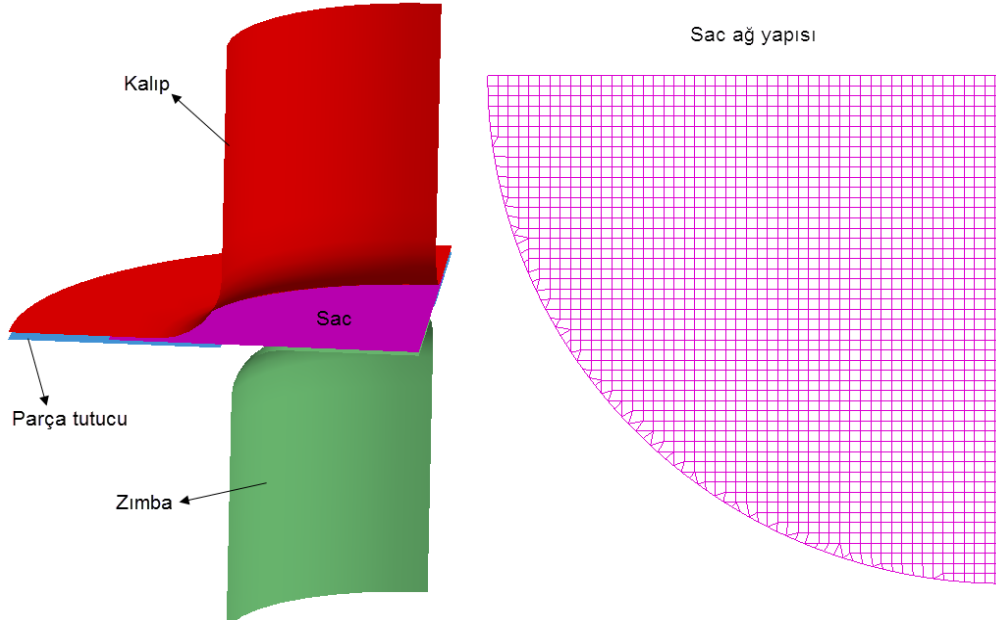
Derin çekme prosesi bir malzemenin derin çekilebilirlik sınırını elde etmek adına kullanılan bir benzetim testi olmakla birlikte aynı zamanda bir üretim yöntemidir. Bu süreçte daire kesitli bir sac açınımlı silindirik bir zımba vasıtası ile çekme işlemine tabi tutulmaktadır. Bu çalışmada çift fazlı çelik grubundan DP600 ve DP980 malzemelerine ait bir derin çekme prosesinin sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiş ve farklı malzeme modellerinin deneysel sonuca [31] yakınsama performansları incelenmiştir. Bu kapsamda deneysel sonuçlarla

kıyaslama limit çekme oranı (LÇO) ile gerçekleştirilmiştir. Limit çekme oranı derin çekilebilirliğin maksimum olduğu sac açınım çapının zımba çapına oranı olarak tanımlanmaktadır. Limit çekme oranı şu şekilde yazılabilmektedir.

$$L\check{C}O = \frac{D_s}{D_z} \quad (5)$$

Burada D_s sac açınım çapını, D_z zımba çapını temsil etmektedir.

Çalışmada dört farklı malzeme modeli ve iki farklı malzeme kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiş ve malzeme modellerine göre LÇO hesaplanmış ve deneysel sonuç ile kıyaslanmıştır. Sonlu elemanlar analiz modeli Şekil 3'te verilmiştir. Proses parametresi olarak parça tutucu kuvvet deneysel çalışma [31] referans alınarak DP600 için 23 kN ve DP980 için 30 kN olarak kullanılmıştır. Bunun dışında sürtünme katsayısı 0,125 ve kalıp hızı 2000 mm/s'dir. Sonlu elemanlar hesaplama parametreleri ise Tablo 2'de verilmiştir. Gerçekleştirilen simülasyonlar sonrasında LÇO'lar her model için tespit edilmiştir. Deneysel sonuçlarla kıyaslama Tablo 3'te görülmektedir. Tablodan görüldüğü üzere her model derin çekilebilirliği yakın tahmin etse de kinematik pekleşme davranışını modelleyen Yoshida-Uemori modeli her iki malzeme için de en yakın sonucu elde etmiştir.



Şekil 3. Derin çekme sonlu elemanlar modeli ve sac açınım ağ yapısı

Tablo 2. Derin çekme simülasyonu hesaplama parametreleri

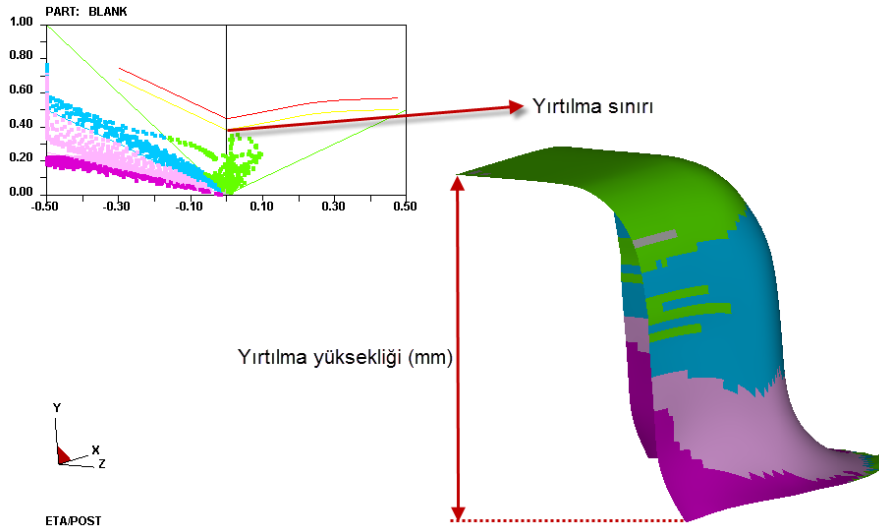
Parametre	Değer
Sac eleman boyutu	1 mm
Sac eleman sayısı	1943
Eleman formülasyonu	Tam integrasyonlu kabuk eleman
İntegrasyon nokta sayısı	7

Tablo 3. Derin çekme sonlu elemanlar malzeme modellerinin tahmin performanslarının karşılaştırılması

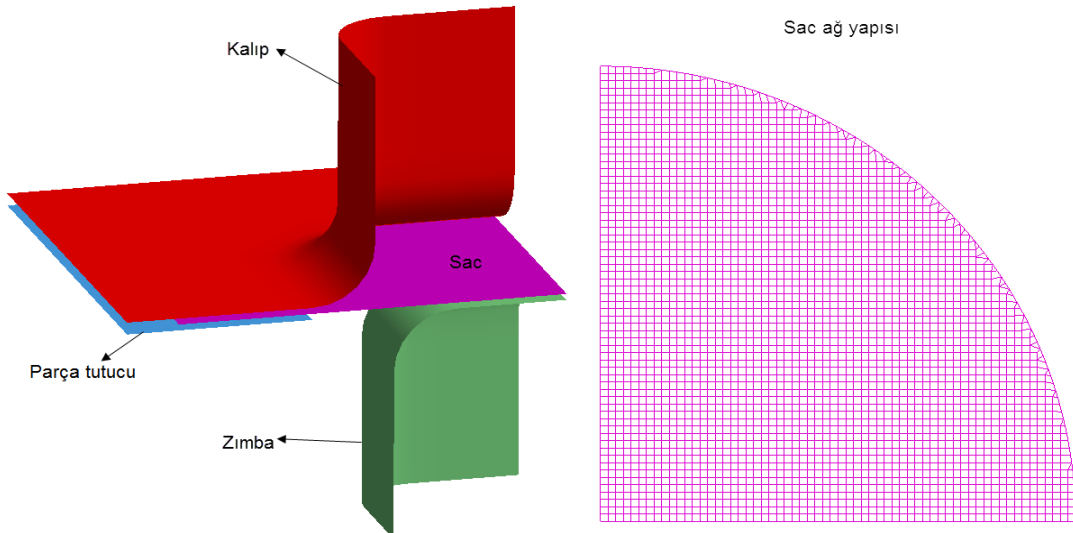
	LÇO Oranları (mm)			
	DP600		DP980	
DeneySEL	3,33	DeneySEL	3,33	
Power Law	3,60	Power Law	3,84	
Hill-48	3,70	Hill-48	3,82	
Barlat-89	3,69	Barlat-89	3,71	
Yoshida-Uemori	3,51	Yoshida-Uemori	3,51	

B. Kare Kutu Çekme

Kare kutu çekme benzetimi sac metallerin şekillendirilebilirliklerinin en efektif tespit edilebildiği proseslerin başında gelmektedir. Gerek yırtılma yüksekliği gerekse de kırışma ve kulaklanma durumları etkin bir şekilde gözlemlenebilmektedir. Bu nedenle malzeme modellerinin etkisinin araştırılması adına çalışmada ikinci proses olarak kare kutu çekme seçilmiştir. Bu kapsamda malzeme olarak AA5754 alüminyum alaşımı kullanılarak bir kare kutu çekme işlemine ait sonlu elemanlar analizleri farklı malzeme modelleri ile gerçekleştirilmiştir. Deneysel referans olarak yırtılma yüksekliği alınmış olup sonlu elemanlar analizlerinden de yırtılma yükseklikleri tespit edilmiştir. Sonlu elemanlar analizlerinde yırtılma yüksekliği şekillendirme sınır diyagramında yırtılma sınırındaki kalıp ilerleme mesafesi olarak alınmıştır (Şekil 4). Eksenel simetriden dolayı 1/4 model kullanılmış olup proses parametresi olarak 55 kN parça tutucu kuvvet, 0,125 sürtünme katsayısı ve 2000 mm/s kalıp hızı uygulanmıştır. Prosesin sonlu elemanlar modeli Şekil 5'te, sonlu elemanlar hesaplama parametreleri ise Tablo 5'te verilmiştir. Yapılan simülasyonlar sonrasında her malzeme modeli ile elde edilen yırtılma yüksekliklerinin deneysel sonuç [32] ile kıyaslanması Tablo 6'da görülmektedir.



Şekil 4. Kare kutu çekme prosesi için sonlu elemanlar analizlerinde yırtılma yüksekliğinin tespiti



Şekil 5. Kare kutu çekme sonlu elemanlar modeli ve sac açılımı ağ yapısı

Tablo 5. Kare kutu çekme simülasyonu hesaplama parametreleri

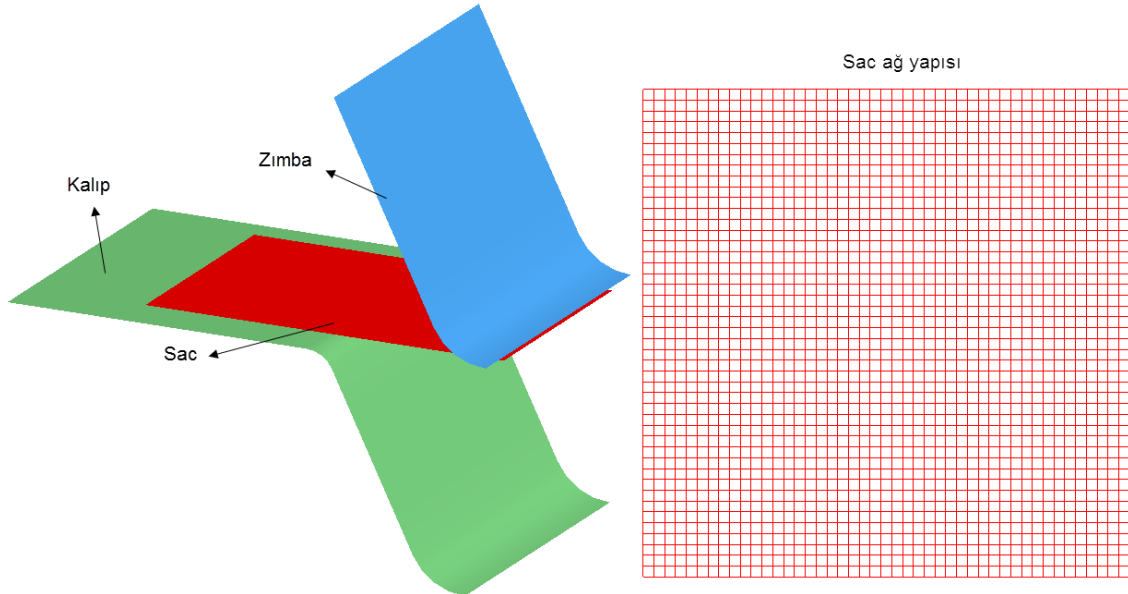
Parametre	Değer
Sac eleman boyutu	1 mm
Sac eleman sayısı	3042
Eleman formülasyonu	Tam integrasyonlu kabuk eleman
İntegrasyon nokta sayısı	7

Tablo 6. Kare kutu çekme sonlu elemanlar malzeme modellerinin tahmin performanslarının karşılaştırılması

Yırtılma Yüksekliği (mm)	
AA 5754	
DeneySEL	39,2
Power Law	42,7
Hill-48	42,1
Barlat-89	41,8
Yoshida-Uemori	39,5

C. V-Kalıpta Eğme

Benzetim testleri malzemelerin şekillendirilebilirliklerinin yanı sıra form verme işlemi sonrasında şekil bozukluklarını da tespit edebilmektedir. Bu anlamda en sık kullanılan benzetim testlerinin başında gelen V-kalıpta eğme testi çalışmanın üçüncü prosesi olarak seçilmiştir. Bu adımda malzeme modellerinin şekil bozukluğu üzerine etkileri tespit edilecektir. Bu amaçla 60° açılıya sahip bir V-kalıpta eğme prosesi [33] deneysel referans olarak kullanılmış olup, şekillendirme sonrasındaki geri esneme açısı sonlu elemanlar doğrulamasında kullanılan parametre olarak belirlenmiştir. Burada geri esneme açısı, form verme işlemi sonrasında çıkan ürünün ara açısı ile kalıp açısının farkı olarak tanımlanmıştır. Malzeme olarak DP600 ve DC05 çelikleri kullanılmıştır. Bu doğrultuda prosese ait sonlu elemanlar modeli simetri koşulundan dolayı 1/2 model olarak oluşturulmuş (Şekil 6) ve farklı malzeme modelleri ile simülasyonlar gerçekleştirilerek sonuçlar deneysel sonuç ile kıyaslanmıştır. Simülasyonlarda kullanılan sonlu elemanlar hesaplama parametreleri Tablo 7'de verilmiş olup proses parametresi olarak sürtünme katsayısı 0,125 ve kalıp hızı 2000 mm/s olarak kullanılmıştır. Bu proses bir serbest bükme işlemi olduğundan kalıp takımları arasında parça tutucu yer almamaktadır. Simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçların karşılaştırılması Tablo 8'de görülmektedir. Tahmin performansı olarak en yakın sonucu Yoshida-Uemori modeli vermekle birlikte bu proseste DC05 malzemesi için Barlat-89 modeli başarılı bir şekillendirme işlemi gerçekleştirememiştir. Bu durum Şekil 7'de verilmiştir.



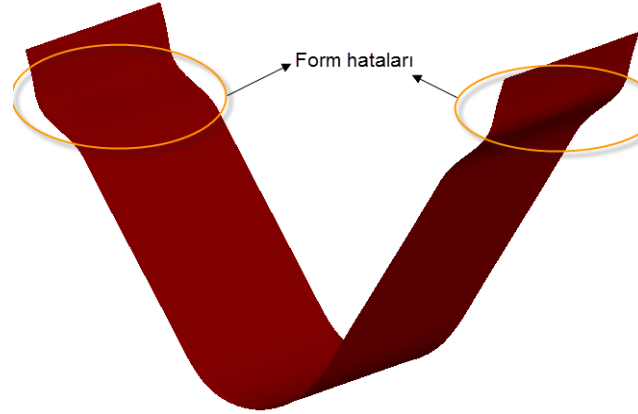
Şekil 6. V-kalıpta eğme sonlu elemanlar modeli ve sac açılımı ağı yapısı

Tablo 7. V-kalıpta eğme simülasyonu hesaplama parametreleri

Parametre	Değer
Sac eleman boyutu	1 mm
Sac eleman sayısı	2025
Eleman formülasyonu	Tam integrasyonlu kabuk eleman
İntegrasyon nokta sayısı	7

Tablo 8. V-kalıpta eğme sonlu elemanlar malzeme modellerinin tahmin performanslarının karşılaştırılması

Geri Esneme (°)			
DP600		DC05	
DeneySEL	7,33	DeneySEL	2,1
Power Law	5,90	Power Law	0,48
Hill-48	3,98	Hill-48	2,96
Barlat-89	6,20	Barlat-89	Başarısız
Yoshida-Uemori	7,06	Yoshida-Uemori	1,72



Şekil 7. Barlat-89 modelinin DC05 malzemesi için gerçekleştirdiği başarısız tahminde gözlemlenen form hataları

IV. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Yapılan çalışmada sac metal sonlu elemanlar tahmin performansına malzemelerin plastik davranışı modelleyen malzeme modellerinin etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda hem yeni nesil yüksek mukavemetli (DP600, DP980) hem de düşük karbonlu çelik (DC05) grubundan ve demir dışı malzeme grubundan (AA5754) malzemeler seçilerek malzeme modeli etkisi irdelenmiştir. Proses olarak ise şekillendirilebilirlik temelli olarak derin çekme ve kare kutu çekme, şekil bozukluğu temelli olarak ise V-kalıpta eğme prosesleri kullanılmıştır. Her malzeme ve her proses için dört farklı malzeme modeli kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Malzeme modelleri temelde izotropik malzeme-izotropik pekleşme kabullü (Power Law), anizotropik malzeme - izotropik pekleşme kabullü (Hill-48, Barlat-89) ve anizotropik malzeme - kinematik pekleşme kabullü (Yoshida-Uemori) olarak gruplandırılmıştır. Simülasyonlar sonrasında elde edilen sonuçlar ilgili proseslerin deneysel verileri ile karşılaştırılarak modellerin tahmin performansları irdelenmiştir.

Elde edilen sonuçlar tartışıldığında şu bulgulara varılmaktadır:

a) Malzeme modelleri, ihtiyaç duydukları parametreler bakımından incelendiğinde kinematik pekleşme modelinin daha fazla parametreye ihtiyaç duyduğu görülmektedir. Bu bakımdan bu tarz bir model kullanabilmek için daha fazla test ya da optimizasyon adımlarının gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu bakımdan kinematik pekleşme modelleri diğer modellere göre daha fazla kullanım zorluğuna sahiptirler.

b) Derin çekme prosesinde her malzeme modeli deneysel modele yakın sonuç vermekle birlikte en yakın sonuçlar kinematik pekleşme modeli olan Yoshida-Uemori modeli ile elde edilmiştir. Her iki çift fazlı çelik için de başarılı tahminler gerçekleştirilmiştir.

c) Kare kutu çekme prosesinde en yakın sonuç neredeyse deneysel yırtılma yüksekliğini yakalayabilen Yoshida-Uemori modeli ile elde edilmiştir. Diğer modellerin deneysel yırtılma yüksekliği ile farkları 2,5-3,5 mm

mertebelerinde iken Yoshida-Uemori modelinin deneysel modelle farkı 0,2 mm'dir. Bu proseste kinematik malzeme modelinin alüminyum alaşımları için de doğru tahmin verebildiği tespit edilmiştir.

d) V-kalıpta eğme deneyi açısından sonuçlar incelendiğinde yine şekil bozukluğunu Yoshida-Uemori modeli deneysel sonuca en yakın tahmini vermiştir. Şekil bozukluğunda kinematik pekleşmenin etkisi daha fazla gözlemlenmiş olup modeller arasındaki en büyük farkın bu proseste ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Buna ek olarak Barlat-89 modeli bu prosesin şekillendirme adımını dahi tahmin edememiştir. Barlat-89 modelinin alüminyum alaşımları için daha uygun bir model olduğu literatürdeki çalışmalarla doğrulanmıştır [34, 35]. Bu durum yapılan çalışmada da gözlemlenmiş olup çelik malzemelerde Barlat-89 modeli özellikle şekil bozukluğu açısından başarısız olmuştur.

Sonuçlar özetlendiğinde, kinematik pekleşme kabulü yapan malzeme modellerinin sonlu elemanlar analizlerinde daha hassas tahminler yapabildikleri tespit edilmiştir. Bu durum, kinematik pekleşme modellerinin Bauschinger etkisini dikkate alabilme kabiliyetlerinin bulunmasının ve sac metal şekillendirme işlemlerinde büküm bölgelerinde de bu durumun etkin olmasının bir sonucu olduğu düşünülmektedir. Tahmin hassasiyetinde malzeme modellerinin şekil bozukluğu üzerinde daha baskın bir etkiye sahip oldukları tespit edilmiştir. Sonuç olarak sac metal sonlu elemanlar analizlerinde malzeme modelinin tespiti özellikle şekil bozukluğu tahminlerinde büyük rol oynamaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Hattalli, V. L., & Srivatsa, S. R. (2018). Sheet metal forming processes–recent technological advances. *Materials Today: Proceedings*, 5(1), 2564-2574.
- [2] Lal, R. K., Choubey, V. K., Dwivedi, J. P., & Kumar, S. (2018). Study of factors affecting Springback in sheet metal forming and deep drawing process. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 4353-4358.
- [3] Ahmed, M. (2018). Adaptive finite element simulation of sheet forming process parameters. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 30(3), 259-265.
- [4] Wang, X., Li, L., Deng, L., Jin, J., & Hu, Y. (2015). Effect of forming parameters on sheet metal stability during a rotary forming process for rim thickening. *Journal of Materials Processing Technology*, 223, 262-273.
- [5] Kumara, A., Gulatia, V., & Kumarb, P. (2018). Effects of Process Parameters on Surface Roughness in Incremental Sheet Forming. *Materials Today: Proceedings*, 5(14), 28026-28032.
- [6] Shi, Y., Jin, H., & Wu, P. D. (2018). Analysis of cup earing for AA3104-H19 aluminum alloy sheet. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 69, 1-11.
- [7] Wang, X., & Cao, J. (2000). An analytical prediction of flange wrinkling in sheet metal forming. *Journal of Manufacturing Processes*, 2(2), 100-107.
- [8] Son, Y. K., Ko, D. C., & Kim, B. M. (2015). Prediction of delamination and tearing during stamping of polymer-coated metal sheet. *Journal of Materials Processing Technology*, 220, 146-156.
- [9] Dewang, Y., Panthi, S. K., & Hora, M. S. (2018). Some aspects of blank holding force in stretch flanging process. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 6789-6798.
- [10] Leminen, V., Matthews, S., Pesonen, A., Tanninen, P., & Varis, J. (2018). Combined effect of blank holding force and forming force on the quality of press-formed paperboard trays. *Procedia Manufacturing*, 17, 1120-1127.
- [11] Wang, Y. G., Huang, G. S., Liu, D. K., Lin, C. H. E. N., Han, T. Z., Jian, P. E. N. G., & Pan, F. S. (2016). Influence of blank holder type on drawability of 5182-O aluminum sheet at room temperature. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 26(5), 1251-1258.
- [12] Ozsoy, M., Esener, E., Ercan, S., & Firat, M. (2014). Springback predictions of a dual-phase steel considering elasticity evolution in stamping process. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(4), 3199-3207.

- [13] Zhang, R., Shao, Z., & Lin, J. (2018). A review on modelling techniques for formability prediction of sheet metal forming. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 1(3), 115-125.
- [14] Kim, J. H., Lee, M. G., Kang, J. H., Oh, C. S., & Barlat, F. (2017). Crystal plasticity finite element analysis of ferritic stainless steel for sheet formability prediction. *International Journal of Plasticity*, 93, 26-45.
- [15] Zahedi, A., Dariani, B. M., & Mirnia, M. J. (2019). Experimental determination and numerical prediction of necking and fracture forming limit curves of laminated Al/Cu sheets using a damage plasticity model. *International Journal of Mechanical Sciences*, 153, 341-358.
- [16] Panthi, S. K., Ramakrishnan, N., Pathak, K. K., & Chouhan, J. S. (2007). An analysis of springback in sheet metal bending using finite element method (FEM). *Journal of Materials Processing Technology*, 186(1-3), 120-124.
- [17] Yao, H., Liu, S. D., Du, C., & Hu, Y. (2002). Techniques to improve springback prediction accuracy using dynamic explicit FEA codes. *SAE Transactions*, 111, 100-106.
- [18] Turon, A., Davila, C. G., Camanho, P. P., & Costa, J. (2007). An engineering solution for mesh size effects in the simulation of delamination using cohesive zone models. *Engineering fracture mechanics*, 74(10), 1665-1682.
- [19] Bruschi, S., Altan, T., Banabic, D., Bariani, P. F., Brosius, A., Cao, J., ... & Tekkaya, A. E. (2014). Testing and modelling of material behaviour and formability in sheet metal forming. *CIRP Annals*, 63(2), 727-749.
- [20] Kuwabara, T., Hashimoto, K., Iizuka, E., & Yoon, J. W. (2011). Effect of anisotropic yield functions on the accuracy of hole expansion simulations. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(3), 475-481.
- [21] Slater, R. C. (1977). *Engineering and Plasticity: Theory and Application to Metal Forming Processes*. Macmillan International Higher Education, London, UK, 419.
- [22] Holloman, J. H. (1945). Tensile Deformation, *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*, 162:268-290.
- [23] Barlat, F., Lian, J. (1989). Plastic behaviour and stretchability of sheet metals (Part I): A yield function for orthotropic sheet under plane stress conditions, *International Journal of Plasticity*, 5:51-56.
- [24] Hill, R. (1948). A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals, *Proc. Roy. Soc. London*, 281-297.
- [25] Yoshida, F., & Uemori, T. (2002). A model of large-strain cyclic plasticity describing the Bauschinger effect and workhardening stagnation. *International journal of plasticity*, 18(5-6), 661-686.
- [26] Ls-Dyna Theoretical Manual. (1998). Livermore Software Technology Corporation.
- [27] Shi, M. F., Zhu, X., Xia, C., & Stoughton, T. (2008). Determination of nonlinear isotropic/kinematic hardening constitutive parameters for AHSS using tension and compression tests. In *NUMISHEET Conference*, Interlaken, Switzerland, Sept, 1-5.
- [28] Aryanpour A., & Green D. E. Evaluation of LS-DYNA® Material Models for the Analysis of Sidewall Curl in Advanced High Strength Steels. *12th International LS-DYNA® Users Conference*, Canada.
- [29] Toros, S. (2016). Parameters Determination of Yoshida Uemori Model Through Optimization Process of Cyclic Tension-Compression Test and V-Bending Springback. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 13(10), 1893-1911.
- [30] Pipard, J. M., Balan, T., Abed, Meraim, F., & Lemoine, X. (2013). Elasto-visco-plastic modeling of mild steels for sheet forming applications over a large range of strain rates. *International Journal of Solids and Structures*, 50, 2691-2700.

- [31] Bandyopadhyay, K., Panda, S. K., Saha, P., & Padmanabham, G. (2015). Limiting drawing ratio and deep drawing behavior of dual phase steel tailor welded blanks: FE simulation and experimental validation. *Journal of materials processing technology*, 217, 48-64.
- [32] Demirci, H. İ., Esner, C., & Yaşar, M. (2008). Effect of the blank holder force on drawing of aluminum alloy square cup: Theoretical and experimental investigation. *Journal of Materials Processing Technology*, 206, 152-160.
- [33] Uslu, E. (2014). Sac Malzemelerin Bükülmesinde Geri Yaylanma Davranışının Araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [34] Lazarescu, L., Ciobanu, I., Nicodim, I. P., Comsa, D. S., & Banabic, D. (2013). Effect of the mechanical parameters used as input data in the yield criteria on the accuracy of the finite element simulation of sheet metal forming processes. *Key Engineering Materials*, 554, 204-209.
- [35] Tang, B., Lu, X., Wang, Z., & Zhao, Z. (2010). Springback investigation of anisotropic aluminum alloy sheet with a mixed hardening rule and Barlat yield criteria in sheet metal forming. *Materials & design*, 31(4), 2043-2050.

Araştırma Makalesi – Research Article

A Novel Stress-Level-Specific Feature Ensemble for Drivers' Stress Level Recognition

İdil IŞIKLI ESENER^{1*}

Geliş / Received: 17/04/2019

Revize / Revised: 01/05/2019

Kabul / Accepted: 03/05/2019

A *bstract-* This paper proposes a novel feature set for drivers' stress level recognition. The proposed feature set consists of data-independent and almost uncorrelated feature pairs for each stress level with very strong intra-class and relatively weak inter-class correlations, constructed by realizing a correlation analysis on the popular features studied in the literature. By using the proposed feature set, a maximum of 100% stress level recognition accuracy is achieved with an average increment of 24.85% while a mean reduction rate of 88.01% is satisfied in false positive rate compared to the full feature set. These outcomes clearly show that the proposed feature set can confidently be integrated into the driving assistance systems.

Keywords- Stress Recognition, Feature Selection, Feature Correlation

I. INTRODUCTION

Distress (negative stress), the negative emotions and unexpected behaviors of an individual as a result of physical and emotional deterioration, is analyzed as acute, episodic acute and chronic stress due to its effects and duration of these effects [1, 2]. It is known that the effects of distress on drivers affect the driving performance negatively, concluding in traffic violations or accidents [3, 4]. Related studies show that the drivers mostly experience acute stress due to road conditions, traffic density, social interactions, unexpected situations, other drivers' or pedestrians' behaviors, events that impact time schedule, and difficult driving due to urban planning [5, 6]. Acute stress is known to be a short-term stress caused by daily life stressors related to recent past or near future [5], and by stimulating the sympathetic nervous system, it physiologically shows itself in increments in blood sugar level, respiration rate, number of heartbeat, blood pressure, and muscle activity; shortness of breath, sweaty palms, cold hands or feets, dizziness, chest pain, headache, activation of the blood coagulation mechanism, irritable bowel syndrome and pupil dilation [7]. Electrocardiogram (ECG), Photoplethysmogram (PPG), Galvanic Skin Response (GSR), Electromyogram (EMG), and Respiration (RESP) are the physical sensors used for digitizing these effects.

In this paper, a correlation analysis of a number of popular measurements computed from the mentioned physical sensors with each other and also with the stress levels is made. As the result of this analysis, the full correlated measurements with each other are eliminated, and the very strongly correlated measurements with each stress level are determined. These measurements are then used for stress level recognition by using Logistic Linear Classifier (LLC), k-Nearest Neighbor (kNN), random forest, decision tree, and Support Vector Machines (SVM) classifiers. The accuracy in stress level recognition is reached up to 100%, and shows a remarkable amount of increment against when all of the measurements are utilized.

This paper is organized as follows: the studies related with stress level recognition in the literature are summarized in the following section. In Section 3, the experimental studies are explicitly defined and the succeeded results and discussions on these results are given in Section 4. The main conclusions are indicated in the last section.

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: idil.isikli@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-0136-7635>)
Department of Electrical and Electronics Engineering, Bilecik Şeyh Edebali Univ. Bilecik

II. BACKGROUND

The studies related to stress recognition analyze the stress responses on sympathetic nervous system and parasympathetic nervous system based on the fact that SNS is stimulated in a stressed state, and PNS in a relaxed state [2]. These analyses are widely realized on ECG [7-18, 20-27], GSR [7-14, 16, 17, 19, 20, 23, 25-27], RESP [7, 9-17, 20, 23, 25, 26], EMG [7, 9-11, 14, 16, 17, 20, 21, 26], and PPG [19] signals.

The variations in the heart beats are analyzed by Heart Rate (HR) and Heart Rate Variability (HRV) measurements using ECG [7-18, 20-27] and PPG [19] signals. Heart rate is the frequency of heart beats per minute, and HRV indicates the variations between heart beats. The most utilized measurements for HR are the mean (MHR) [7, 11, 14, 16, 17, 20, 22, 25-27] and the standard deviation (SDHR) [11, 14, 16, 17, 20, 25] of heart rate. The median of HR [20], variance of HR [20], maximum HR [27], and minimum HR [27] are also used for HR analyses.

The HRV is analyzed on both time and spectral domain. The time-domain measurements for HRV include the mean of N-to-N intervals (MNN) [19, 23], the standard deviation of N-to-N intervals (SDNN) [18, 19, 23, 24], the root-mean-square of successive interval differences (RMSSD) [18, 19, 23, 26], the triangular interpolation of the N-to-N interval histogram [23], the number of N-to-N interval differences differ by more than 50 milliseconds (NN50) [18], the percentage of NN50 over the number of heart beats (pNN50) [18, 19, 23], the percentage of the number of N-to-N interval differences differ by more than 20 milliseconds over the number of heart beats (pNN20) [19], the mean of first differences (MFD) [7,18, 22], the mean of second differences (MSD) [18], the mean of QRS-to-QRS intervals (MQRS) [22], the mean of R-to-R intervals (MRR) [22], the mean of Q-to-Q intervals (MQQ) [22], the mean of S-to-S intervals (MSS) [22], the mean of Q-to-R intervals (MQR) [22], the mean of R-to-S intervals (MRS) [22], the PPG pulse height [19], the PPG rise time [19], the PPG fall time [19], the PPG cardiac period [19], the PPG instantaneous heart rate [19], and the heart rate variation from baseline [8]. The total spectral power (TP) [19], the spectral powers of very low frequency band (VLF) [18, 19, 23], the low frequency band (LF) [9, 10, 14, 17-19, 23, 25, 26], the high frequency band (HF) [9, 10, 18, 19, 23, 25, 26], and the LF/HF ratio [9, 10, 12, 13, 18, 19, 23-26] are the frequently used HRV measurements in Fourier domain. Besides, the VLF/TP ratio [12, 13], the LF/VLF ratio [12, 13], the HF/VLF ratio [12, 13], the spectrum entropy [12]; the QRS power spectrum [15], the power samples of the R-peaks [21], the mean and the standard deviation in Wavelet domain [25] are also used for spectral HRV analysis.

Sweaty palms and cold hands or feet cause changes on skin conductance (SC) of human body. In the literature, the SC is analyzed in three groups. One of the group of features are directly extracted from the GSR and includes the mean (MSC) [9, 11, 14, 16, 17, 20, 25, 27], the median [20], the variance (VarSC) [9, 20], the standard deviation (SDSC) [11, 1, 17, 20, 25], the maximum [27] and the minimum [27] of the skin conductivity. Another group analyzes the Skin Conductance Level (SCL – the tonic component of GSR) by means of the mean of SCLs (MSCL) [23, 26] and the variance of SCLs (VarSCL) [23]. The most popular group analyzes the Skin Conductance Response (SCR – the phasic component of GSR) through the sum of frequency of occurrence [9], the number of peaks [19, 25, 27], the number of local maxima [26], the number of SCRs (NSCR) [10, 14, 17, 23], the rate of SCR (RSCR) [7], the mean of SCRs (MSCR) [7, 23], the variance of SCRs (VarSCR) [23], the mean amplitude (MAmp – mean value of the increases in SC between SCR initiations and SCR peaks) [7, 27], the maximum phasic amplitude (MaxPhAmp) [23], the amplitude sum of SCRs (AmpSum) [23], the magnitude [14, 17], the peak amplitude sum (PAmpSum) [19], the peak energy sum (PEngSum) [19], the sum of magnitudes [9, 10, 25], the first absolute difference (FAD) [12, 13], MFD [7], the mean of positive derivative [26], the mean of absolute derivative [26], the proportion of positive samples in derivative [26], the area of orienting responses [14, 17, 23, 25], the sum of the estimated areas under the responses [9, 10], the latitude (Lat) [23], the rise rate average (MRT) [19, 27], the peak rise time sum (PRTSum) [19], the decay rate average [19], the percentage decay [19], the half-recovery sum (HalfRecSum) [19], the duration [14, 17], the mean rise duration [7], and the sum of durations [9, 10, 25]. Besides, number of the nonspecific response [23] is also used. These features are extracted either from hand GSR [7, 12, 23, 27] or both hand and foot GSRs [11, 14, 16, 17, 20, 25, 26].

The respiration rate as well as the breathing amplitudes (BA) and the breathing durations vary between relaxed and stressed states. These metrics are analyzed on time-domain using the mean (MRESP) [9, 10, 14, 17, 20, 25], the standard error of the mean (SEM) [23], the median [20], the variance [9, 10, 20], and the standard deviation (SDRESP) [14, 17, 20, 25, 26] of the RESP signal; the respiration rate (RESPR) [7, 11, 15, 16, 23, 26], the ratio of heart rate or RESPR (HR/RESPR) [12], the central respiration frequency [23], the difference between maximal respiration and MRESP (range) [26]; the maximum breathing amplitude (MaxBA) [23], the minimum breathing amplitude (MinBA) [23], the mean of breathing amplitude (MBA) [7], the difference between

maximum and minimum values of breathing amplitude (MaxBA-MinBA) [23], the second difference of breathing amplitude (SDBA) [23], the MFD [7, 23], the mean of the second difference (MSD) [23], the standard deviation of the first difference (SDFD) [23], the standard deviation of the second difference (SDSD) [23]; the skewness [23], the kurtosis [23], and the entropy [13] measurements in the literature. In addition to time-domain measurements, these metrics are also analyzed in Fourier domain computing the spectral powers of RESP signals [10, 14, 17, 23, 25] within the bands 0-to-0.1 Hz, 0.1-to-0.2 Hz, 0.2-to-0.3 Hz, and 0.3-to-0.4 Hz.

Characteristics of increasing muscle activity in a stressed state are defined, in the literature, by the mean (MEMG) [9-11, 14, 16, 17, 20, 21], the variance [9, 20], the standard deviation [11, 20], the median [20], the zero-crossing-rate (ZCR) [21], the root-mean-square (RMS) [16, 21, 26], the root-mean-quad (RMQ) [28], the number of contractions per minute [11], the power spectrum [21], and the amplitude modulation of the envelope [21] measurements of the EMG signal.

III. EXPERIMENTAL STUDY

A. Database

The MIT-BIH PhysioNet Multi-parameter Database [29] is used for drivers' stress level recognition in this paper. This database consists of ECG, EMG, foot GSR, hand GSR, heart rate (HR), and respiration signals collected by Healey and Piccard [10] from wearable sensors on 17 automobile drivers while driving from MIT's East Garage to River Street Bridge and back through three cities and two highways between an initial rest and a final rest states. A marker in the database indicates the durations of rest states, city drive and highway drive. It is defined as one in rest state has low stress (LS) while he has moderate stress (MS) and high stress (HS) during highway and city drives, respectively in the database. The hand GSR, foot GSR, and respiration signals are sampled at 31 Hz while ECG and EMG signals are sampled at 496 and 15.5 Hz, respectively [10].

10 of the 17 drivers' bio-signals are used in this paper because of missing signals and non-clear markers of other drivers'. The list of these 10 drivers is given in Table 1.

Table 1. List of bio-signals'-used drivers.

Record Names				
drive5	drive6	drive7	drive8	drive9
drive10	drive11	drive12	drive15	drive16

B. Feature Extraction

1) *ECG Features:* Initially, a pre-processing is realized on ECG signals for time-domain feature extraction in order to remove baseline wander and muscle noise by applying a bandpass filter with cut-off frequencies of 0.5 Hz and 4 Hz. The time-domain ECG features in the literature related to HR and HRV are driven by the R-peaks of the ECG signal. Hence, R-peak detection is realized on the pre-processed ECG signals using inverted second derivative method [30]. In addition to the time-domain feature extraction, frequency-domain feature extraction on ECG signals is also realized for analyzing the energy distributions. The ECG features extracted in this paper are given in Table 2.

2) *GSR Features:* A Butterworth bandpass filter with cut-off frequencies of 0.1 Hz and 1 Hz is applied to hand GSR and foot GSR signals to remove baseline wander in these signals. The GSR features extracted from both hand GSR and foot GSR in this paper are given in Table 3.

3) *Respiration Features:* A pre-processing operation is performed on respiration signals to remove baseline wander and body movements related noises as given in [23]. This operation is realized by concatenating a moving-average filter and a 10th order low pass filter with a cut-off frequency of 1 Hz [23]. The respiration features extracted in this paper are given in Table 4.

4) *EMG Features:* A Butterworth low pass filter with a cut-off frequency of 500 Hz is applied to EMG signals for removing noises caused by sudden body movements. The EMG features extracted in this paper are given in Table 5.

Table 2. The ECG features extracted for drivers' stress analysis.

	Time-Domain ECG Features	Frequency-Domain ECG Features
Features Related to HR	<ul style="list-style-type: none"> • MHR • SDHR • MNN • SDNN • RMSSD of NN intervals (RMSSD_NN) • NN50 	-
Features Related to HRV	<ul style="list-style-type: none"> • pNN50 • NN20 • pNN20 • MRR • SDRR • RMSSD of RR intervals (RMSSD_RR) 	<ul style="list-style-type: none"> • TP • power of ultra-low frequency (ULF) (≤ 0.003 Hz) • VLF (0.003 Hz – 0.04 Hz) • LF (0.04 Hz – 0.15 Hz) • HF (0.15 Hz – 0.4 Hz) • VHF (≥ 0.4 Hz) • LF/HF

Table 3. The GSR features extracted for drivers' stress analysis.

Time-Domain GSR Features	
• MAmp	• MFD of GSR (MFD_GSR)
• PAmpSum	• MSC
• AmpSum	• VarSC
• MaxPhAmp	• SDSC
• NSCR	• HalfRecSum
• RSCR	• mean half recovery (HalfRecMean)
• MSCR	• Lat
• VarSCR	• PRTSum
• MSCL	• MRT
• VarSCL	• PEngSum

Table 4. The respiration features extracted for drivers' stress analysis.

Time-Domain Respiration Features	Frequency-Domain Respiration Features	
• MRESP	• MaxBA-MinBA	
• SDDRESP	• range	
• SEM	• MFD of RESP (MFD_RESP)	
• skewness	• SDFD	
• kurtosis	• MSD	• RESP power (0-0.1)
• entropy	• SDSD	• RESP power (0.1-0.2)
• RESPR	• MSD of BA (MSD_BA)	• RESP power (0.2-0.3)
• HR/RESPR	• SDSD of BA (SDSD_BA)	• RESP power (0.3-0.4)
• MaxBA		
• MinBA		
• MBA		

Table 5. The EMG features extracted for drivers' stress analysis.

Time-Domain EMG Features
• MEMG
• RMS
• RMQ
• ZCR

The 86-dimensional feature vector of each driver is constructed by concatenating the features given in Tables 2-5 as given in the following.

$$\text{Feature Vector} = \begin{bmatrix} \text{Time - Domain ECG Features} \\ \text{Frequency - Domain ECG Features} \\ \text{Time - Domain Hand GSR Features} \\ \text{Time - Domain Foot GSR Features} \\ \text{Time - Domain RESP Features} \\ \text{Frequency - Domain RESP Features} \\ \text{Time - Domain EMG Features} \end{bmatrix} \quad (1)$$

C. Correlation Analysis

Pearson's correlation analysis of the extracted features with each other and with the stress levels is made. The Pearson's correlation r_{XY} between the n - dimensional signals X and Y is computed as:

$$r_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{x}) \cdot (Y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

where \bar{x} and \bar{y} are the means of X and Y , and X_i and Y_i are the i^{th} samples of X and Y , respectively. The correlation coefficient has a value in the $[-1, 1]$ interval. Full correlation ($r_{XY} = 1$) shows that the signals X and Y are identical while negative full correlation ($r_{XY} = -1$) indicates that there is a 180° phase shift between identical signals X and Y , and zero correlation ($r_{XY} = 0$) means that X and Y are completely

different signals. Strength of correlation between the features and between each feature and each stress level are analyzed based on the range given by [16] and shown in Table 6.

Table 6. Interpretation of the strength of correlation results [16].

Correlation Coefficient Range	Strength of Correlation
0.00 -0.30	Weak
0.31 -0.50	Moderate
0.51 -0.80	Strong
0.81 -1.00	Very strong

IV. RESULTS AND DISCUSSION

Pearson's correlation analysis of the features given in (1) with each other and with the stress levels is realized in this paper. A-dimension-reduced feature set for stress level recognition is constructed by concatenating the very strongly features of each stress level. Table 7 shows the features to be found as very strongly correlated with the low stress level. The absolute correlation values of these features with each other as well as with all stress levels are given in this table.

It is seen that the SDHR and the NN50 of ECG signals are full correlated. Hence, it is not necessary to use both of them for classification. Since the SDHR is more correlated with low stress level, the NN50 is eliminated from the feature set. Besides, the NSCR in hand GSR signals and the RESP powers between 0.1 Hz – 0.2 Hz and 0.2 Hz – 0.3 Hz are also full correlated with each other. On the score of stronger correlation of the RESP power between 0.2 Hz and 0.3 Hz with low stress level, it is kept in the feature set. Although the RESP power between 0.3 Hz – 0.4 Hz and the RMS of the EMG signals are not full correlated with any of the other features, they are very strongly and strongly correlated with the SDHR, respectively and not much correlated as the SDHR does with the low stress level. Hence, they are also excluded from the feature set.

Table 7. Correlation matrix obtained for features found to be very strongly correlated with the low stress level, including all stress levels.

	SDHR	NN50	NSCR (Hand)	RESP power (0.1–0.2)	RESP power (0.2–0.3)	RESP power (0.3–0.4)	RMS	LS	MS	HS
SDHR	1,000	1,000	0,194	0,208	0,195	0,998	0,782	0,924	0,164	0,536
NN50	1,000	1,000	0,194	0,208	0,195	0,998	0,782	0,918	0,140	0,534
NSCR (Hand)	0,194	0,194	1,000	1,000	1,000	0,239	0,722	0,851	0,643	0,689
RESP power (0.1–0.2)	0,208	0,208	1,000	1,000	1,000	0,254	0,733	0,872	0,704	0,147
RESP power (0.2–0.3)	0,195	0,195	1,000	1,000	1,000	0,240	0,723	0,886	0,623	0,185
RESP power (0.3–0.4)	0,998	0,998	0,239	0,254	0,240	1,000	0,813	0,880	0,433	0,241
RMS	0,782	0,782	0,722	0,733	0,723	0,813	1,000	0,887	0,548	0,774
LS	0,924	0,918	0,851	0,872	0,886	0,880	0,887	1,000	0,412	0,416
MS	0,164	0,140	0,643	0,704	0,623	0,433	0,548	0,412	1,000	0,592
HS	0,536	0,534	0,689	0,147	0,185	0,241	0,774	0,416	0,592	1,000

The features to be detected as very strongly correlated with the moderate stress level and their corresponding $|r_{XY}|$ values including all stress levels are given in Table 8. The TP of the ECG signals is included in the feature set since it is full correlated with the moderate stress level. Resulting from the high correlation of the ULF and the TP features of ECG signals and lower correlation of the ULF with moderate stress level, the ULF is removed from the feature set. The VarSCR within and the HalfRecSum of the hand GSR and the MaxPhAmp of the foot GSR signals are full correlated and they are also very strongly correlated with the LF

of the ECG signals and the MFD of the foot GSR signals. Among these features, due to the highest correlation with moderate stress level, only the MaxPhAmp of the foot GSR signals is remained in the feature set.

Table 8. Correlation matrix obtained for features found to be very strongly correlated with the moderate stress level, including all stress levels.

	TP	ULF	LF	VarSCR	HalfRecSum (Hand)	MaxPhAmp (Foot)	MFD_GSR (Foot)	LS	MS	HS
TP	1,000	0,955	0,696	0,230	0,244	0,231	0,203	0,137	1,000	0,118
ULF	0,955	1,000	0,843	0,452	0,466	0,454	0,426	0,087	0,937	0,062
LF	0,696	0,843	1,000	0,851	0,859	0,851	0,834	0,320	0,876	0,113
VarSCR	0,230	0,452	0,851	1,000	1,000	1,000	0,999	0,785	0,842	0,793
HalfRecSum (Hand)	0,244	0,466	0,859	1,000	1,000	1,000	0,999	0,568	0,806	0,298
MaxPhAmp (Foot)	0,231	0,454	0,851	1,000	1,000	1,000	0,999	0,152	0,885	0,637
MFD_GSR (Foot)	0,203	0,426	0,834	0,999	0,999	0,999	1,000	0,537	0,829	0,735
LS	0,137	0,087	0,320	0,785	0,568	0,152	0,537	1,000	0,412	0,416
MS	1,000	0,937	0,876	0,842	0,806	0,885	0,829	0,412	1,000	0,592
HS	0,118	0,062	0,113	0,793	0,298	0,637	0,735	0,416	0,592	1,000

The in between absolute correlation values of very strongly correlated features with the high stress level are indicated in Table 9, and the absolute correlation values of these features are given in Table 10. None of the features are full correlated but there exist very strongly correlated features. The MSCR in the hand GSR signals is highly correlated with the MinBA and the SDFD of the respiration signals. It is visible to use just the SDFD of respiration signals through these features since it is almost full correlated with the moderate stress level. In addition, the MFD and the HalfRecMean of the hand GSR signals are highly correlated and the HalfRecMean of the hand GSR signals is excluded from the feature set since the MFD of the hand GSR signals has a stronger correlation with this level of stress. Moreover, because the SDSD of the respiration signals is more correlated with the moderate stress level than the MaxBA-MinBA of which it is highly correlated, the MaxBA-MinBA is excluded from the feature set. Among these features in the feature set, all the features except the SDFD and the SDSD of the respiration signals due to their weaker correlations with high stress level are removed from the set.

Table 9. Correlation matrix obtained for features found to be very strongly correlated with the high stress level.

	AmpSum (Hand)	MSCR (Hand)	MFD_GSR (Hand)	HalfRecMean (Hand)	PEngSum (Hand)	MRT (Foot)	MBA	MaxBA - MinBA	SDFD	SDSD	SDSD_BA
AmpSum (Hand)	1,000	0,026	0,218	0,224	0,223	0,331	0,155	0,319	0,147	0,015	0,011
MSCR (Hand)	0,026	1,000	0,587	0,405	0,519	0,377	0,895	0,614	0,822	0,504	0,177
MFD_GSR (Hand)	0,218	0,587	1,000	0,907	0,655	0,359	0,530	0,261	0,477	0,292	0,028
HalfRecMean (Hand)	0,224	0,405	0,907	1,000	0,801	0,506	0,291	0,111	0,260	0,186	0,037
PEngSum (Hand)	0,223	0,519	0,655	0,801	1,000	0,733	0,315	0,113	0,380	0,197	0,316
MRT (Foot)	0,331	0,377	0,359	0,506	0,733	1,000	0,313	0,263	0,511	0,352	0,562
MBA	0,155	0,895	0,530	0,291	0,315	0,313	1,000	0,518	0,859	0,472	0,069
MaxBA - MinBA	0,319	0,614	0,261	0,111	0,113	0,263	0,518	1,000	0,754	0,920	0,611
SDFD	0,147	0,822	0,477	0,260	0,380	0,511	0,859	0,754	1,000	0,772	0,560
SDSD	0,015	0,504	0,292	0,186	0,197	0,352	0,472	0,920	0,772	1,000	0,725
SDSD_BA	0,011	0,177	0,028	0,037	0,316	0,562	0,069	0,611	0,560	0,725	1,000

Table 10. Correlation matrix of features, found to be very strongly correlated with the high stress level, with all stress levels.

	LS	MS	HS
AmpSum (Hand)	0,748	0,785	0,915
MSCR (Hand)	0,672	0,725	0,844
MFD_GSR (Hand)	0,609	0,780	0,962
HalfRecMean (Hand)	0,029	0,758	0,948
PEngSum (Hand)	0,365	0,699	0,939
MRT (Foot)	0,620	0,628	0,877
MBA	0,336	0,500	0,975
MaxBA-MinBA	0,197	0,348	0,969
SDFD	0,027	0,654	0,991
SDSD	0,577	0,224	0,984
SDSD_BA	0,045	0,599	0,975
LS	1,000	0,412	0,416
MS	0,412	1,000	0,592
HS	0,416	0,592	1,000

The resultant 6-dimensional feature set constructed by selecting almost uncorrelated features that are very strongly correlated with each of the stress levels, are given in Table 11.

Table 11. Selected features by correlation analysis.

Related Signal	Feature	Shows Very Strongly Correlation with
SDHR	ECG	Low stress
RESP power (0.2–0.3)	RESP	Low stress
TP	ECG	Moderate stress
MaxPhAmp	Foot GSR	Moderate stress
SDFD	RESP	High stress
SDSD	RESP	High stress

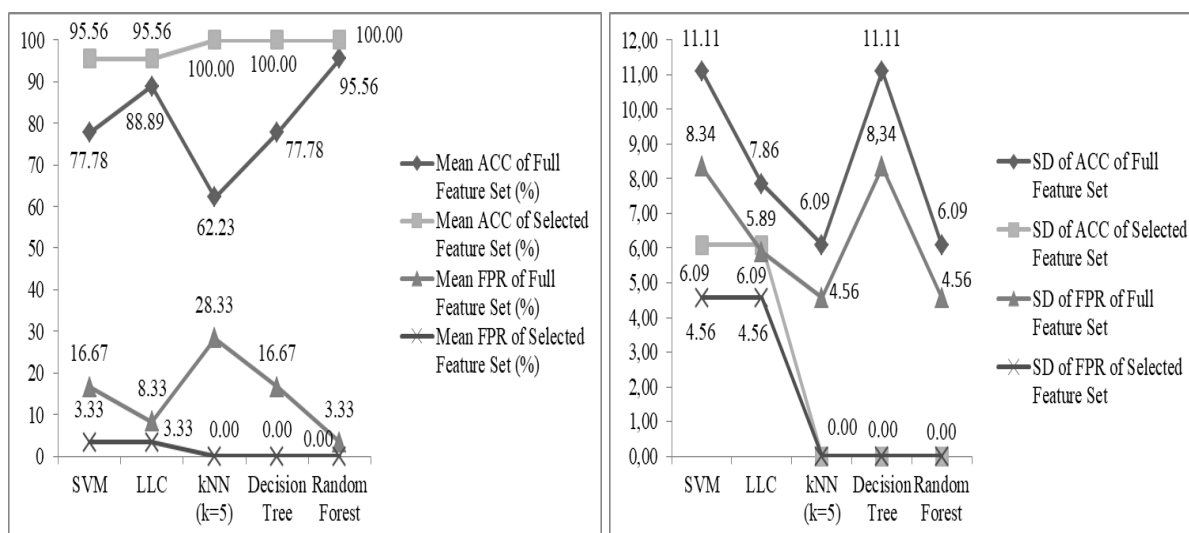
The stress level discriminating power of the selected features, given in Table 10, is measured by the Accuracy (ACC) and the False Positive Rate (FPR) metrics succeeded by the kNN (k=5), random forest, decision tree, LLC, and SVM classifiers. The classification procedure is realized by 5-fold cross-validation technique. These metrics are computed by using the following relations,

$$\% \text{ ACC} = \frac{\text{TP} + \text{TN}}{\text{TP} + \text{TN} + \text{FP} + \text{FN}} \cdot 100 \quad (3)$$

$$\% \text{ FPR} = \frac{\text{FP}}{\text{FP} + \text{TN}} \cdot 100 \quad (4)$$

where TP, TN, FP, and FN refer to the numbers of true positives, true negatives, false positives, and false negatives, respectively. These metrics are computed for each of the five folds, and the mean and the standard deviations of the computations are evaluated. The same classification process is also executed by the full feature set given in (1) for comparison. The classification results of both full and selected feature sets are shown in Figure 1. An average increment of 24.85% in mean ACC and an average decrement of 88.01% in mean FPR are satisfied by using the selected feature set for drivers' stress level recognition. Besides the classification success, the decrement in standard deviations of the performance metrics indicates the data dependency of the selected feature set.

Although an overall classification accuracy of 100% is achieved by most of the classifiers using the selected feature set, the SVM and the LLC classifiers succeeded an accuracy of 95.56% and a FPR of 3.33%.

**Figure 1.** Classification results of drivers' stress level recognition

Analyzing the total confusion matrices of these classifiers given in Table 12, it is seen that although high stress level is perfectly detected, the non-100% accuracies are because of the inter-belonged FPs and FNs of

low and moderate stress levels. These misclassifications are thought to be caused by the closeness of correlation strength of the RESP power (0.2–0.3) with low and moderate stress levels.

Table 12. The total confusion matrices achieved by classifying the selected feature set via SVM and LLC classifiers.

		Classified Stress Levels by					
		SVM Classifier			LLC Classifier		
		Low Stress	Moderate Stress	High Stress	Low Stress	Moderate Stress	High Stress
Actual Stress Levels	Low Stress	9	1	0	9	1	0
	Moderate Stress	1	9	0	1	9	0
	High Stress	0	0	10	0	0	10

In conclusion, low, moderate, and high stress levels are recognized by 93.33%, 93.33%, and 100% accuracies, respectively.

V. CONCLUSIONS

A correlation analysis of frequently used physiological measurements, computed from the ECG, hand GSR, foot GSR, RESP, and EMG signals for drivers' stress level recognition, is realized in this paper. The experimental study is executed on the publicly available MIT-BIH PhysioNet Multi-parameter Database [10]. The correlation analysis is concluded in proposal of almost uncorrelated feature pairs for each stress level with very strong intra-level and relatively weak inter-level correlations. These feature pairs indicate that the SDHR and the RESP power within the band 0.2-0.3 Hz shows a significant difference in low stress level while the TP of the ECG signal and the MaxPhAmp of the foot GSR have high significance for moderate stress level and SDFD and SDSA are discriminators for high stress level. The strength of these features are verified by a classification procedure using kNN (k=5), random forest, decision tree, LLC, and SVM classifiers with by 5-fold cross-validation technique. The recognition ACC is raised up to 100% with an average increment of 24.85%, and the FPR is decreased up to 0% by providing a reduction rate of 88.01% on average when the proposed feature set is used instead of the full feature set. Besides, the proposed feature set satisfies these results in less time consumption which is extremely important for real-time applications. In addition, the data independency of these features is approved by the reduced and mostly zeroed standard deviations of both ACC and FPR. These outcomes clearly show that the proposed feature set can confidently be integrated into the driving assistance systems in new generation vehicles.

REFERENCES

- [1] Selye, H. (1976). *Stress without distress. Psychopathology of Human Adaptation Serban G. (Eds.)*. Springer, Boston, MA, 137-146.
- [2] Rastgoo, M. N., Nakisa, B., Rakotonirainy, A., Chandran, V., & Tjondronegoro, D. (2018). A critical review of proactive detection of driver stress levels based on multimodal measurements. *ACM Computing Surveys*, 51, 1–35.
- [3] Beirness, D. J. (1993). Do we really drive as we live? The role of personality factors in road crashes. *Alcohol, Drugs, and Driving: Abstracts and Reviews*, 9 (3), 129-143.
- [4] Simon, F. & Corbett, C. (1996) Road traffic offending, stress, age, and accident history among male and female drivers. *Ergonomics*, 39 (5), 757–780.
- [5] Miller, L. H., Smith, A. D., & Rothstein, L. (1994). *The Stress Solution: An Action Plan to Manage the Stress in Your Life reprint ed.*, Pocket Books, New York.
- [6] Rodrigues, J. G. P., Kaiseler, M., Aguiar, A., Cunha, J. P. S., & Barros, J. (2015). A mobile sensing approach to stress detection and memory activation for public bus drivers. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16, 3294–3303.

- [7] Katsis, C. D., Katertsidis, N., Ganiatsas, G., & Fotiadis, D. I. (2008). Toward emotion recognition in car-racing drivers: A biosignal processing approach, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A*, 38 (3), 502–512.
- [8] Rigas, G., Katsis, C. D., Bougia, P., & Fotiadis, D. I. (2008). A Reasoning-Based Framework for Car Driver's Stress Prediction. 16. *Mediterranean Conference on Control and Automation*, 25-27 June, Ajaccio, France, 627–632.
- [9] Healey, J. & Picard, R. (2002). SmartCar: Detecting Driver Stress. 15. *International Conference on Pattern Recognition*, 3-7 September, Barcelona, Spain, 4, 218–221.
- [10] Healey, J. A. & Picard, R. W. (2005). Detecting stress during real-world driving tasks using physiological sensors, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 6 (2), 156–166.
- [11] Akbaş, A. (2011). Evaluation of the physiological data indicating the dynamic stress level of drivers, *Scientific Research and Essays*, 6 (2), 430-439.
- [12] Rigas, G., Goletsis, Y., Bougias, P., & Fotiadis, D. I. (2011). Towards driver's state recognition on real driving conditions. *International Journal of Vehicular Technology*, 2011, 1-14.
- [13] Rigas, G., Goletsis, Y., & Fotiadis, D. (2012). Real-time driver's stress event detection. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13 (1), 221–234.
- [14] Deng, Y., Wu, Z., Chu, C. H., & Yang, T. (2012). Evaluating Feature Selection for Stress Identification. *IEEE 13. International Conference on Information Reuse & Integration*, 8-10 August, Las Vegas, NV, USA, 584–591.
- [15] Soman, K., Alex, V., & Srinivas, C. (2013). Analysis of Physiological Signals in Response to Stress using ECG and Respiratory Signals of Automobile Drivers. 2013 *International Mutli-Conference on Automation, Computing, Communication, Control and Compressed*, 22-23 March, Kottayam, Kerala, India, 574-579.
- [16] Singh, M. & Bin Queyam, A. (2013). A novel method of stress detection using physiological measurements of automobile drivers. *International Journal of Electronics Engineering*, 5 (2), 13–20.
- [17] Deng, Y., Wu, Z., Chu, C. H., Zhang, Q., & Hsu, D. F. (2013). Sensor feature selection and combination for stress identification using combinatorial fusion. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 10, 306-313.
- [18] Wang, J. S., Lin, C. W., & Yang, Y. T. C. (2013). A k-nearest-neighbor classifier with heart rate variability feature-based transformation algorithm for driving stress recognition. *Neurocomputing*, 116, 136–143.
- [19] Singh, R. R., Conjeti, S., & Banerjee, R. (2013). A comparative evaluation of neural network classifiers for stress level analysis of automotive drivers using physiological signals, *Biomedical Signal Processing and Control*, 8 (6), 740-754.
- [20] Avcı C., Akbaş, A., & Yüksel, Y. (2014). Evaluation of Statistical Metrics by using Physiological Data to Identify the Stress Level of Drivers. 3. *International Conference on Environment, Chemistry and Biology*, 29-30 November, Port Louis, Mauritius, 124-128.
- [21] Soman, K., Sathiya, A., & Suganthi, N. (2015). Classification of Stress of Automobile Drivers using Radial Basis Function Kernel Support Vector Machine. 2014 *IEEE International Conference on Information Communication & Embedded Systems*, 27-28 February, Chennai, India, 1-5.
- [22] Keshan, N., Parimi, P.V., & Bichindaritz, I. (2015). Machine Learning for Stress Detection from ECG Signals in Automobile Drivers. 2015 *IEEE International Conference on Big Data*, 29 October-1 November, Santa Clara, CA, USA, 2661–2669.
- [23] Lanatà, A., Valenza, G., Greco, A., Gentili, C., Bartolozzi, R., Bucchi, F., Frenzo, F., & Scilingo, E. P. (2015). How the autonomic nervous system and driving style change with incremental stressing conditions during simulated driving. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16 (3), 1505-1517.
- [24] Heikoop, D. D., de Winter, J. C. F., Arem, B., & Stanton, N. A. (2016). Effects of platooning on signal-detection performance, workload, and stress: A driving simulator study. *Applied Ergonomics*, 60, 116-127.
- [25] Chen, L., Zhao, Y., Ye, P., Zhang, J., & Zou, J. (2017). Detecting driving stress in physiological signals based on multimodal feature analysis and kernel classifiers. *Expert System with Applications*, 85, 279-291.

- [26] Ollander, S., Godin, C., Charbonnier, S., & Campagne, A. (2016). Feature and Sensor Selection for Detection of Driver Stress. *3. International Conference on Physiological Computing Systems*, 27-28 July, Lisbon, Portugal, 115–122.
- [27] Urbano, M., Alam, M., Ferreira, J., Fonseca, J., & Simões, P. (2017). Cooperative Driver Stress Sensing Integration with Ecall System for Improved Road Safety. *17. International Conference on Smart Technologies*, 6-8 July, Ohrid, Macedonia, 883-888.
- [28] Zheng, R., Yamabe, S., Nakano, K., & Suda, Y. (2015). Biosignal analysis to assess mental stress in automatic driving of trucks: palmar perspiration and masseter electromyography. *Sensors*, 15, 5136-5150.
- [29] Goldberger A. L., Amaral L. A. N., Glass L., Hausdorff J. M., Ivanov P. Ch., Mark R. G., Mietus J. E., Moody G. B., Peng C-K., & Stanley H. E. (2000). PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: components of a new research resource for complex physiologic signals. *Circulation*, 101 (23), 215-220.
- [30] Deshmukh, S. V. (2018). Study of online driver distraction analysis using ECG-dynamics. Master of Science Thesis, University of Michigan, Computer and Information Sciences, Dearborn, Michigan.

Araştırma Makalesi - Research Article

Bath Temperature Effect on c-axis Preferred Orientations and Band Gap of Semiconductor ZnO Thin Films

Sinan TEMEL^{1*}

Geliş / Received: 08/04/2019

Reviz / Revised: 30/04/2019

Kabul / Accepted: 06/05/2019

Abstract- Semiconductor ZnO thin films were deposited via chemical bath deposition technique (CBD) on glass substrates at varying temperatures (75°C-90°C). Influence of bath temperature on c-axis preferred orientations of ZnO thin films were examined. X-ray diffraction (XRD) results proved that thin films deposited at 80°C and 85°C bath temperature have a preferred orientation towards (011) peak. The preferred orientation changed towards (010) peak when the bath temperature increased to 90°C. Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) images proved that ZnO thin film structure was formed by flower-like nanorods. In the thin films produced at 80°C and 85°C, the alignment of the nanorods was vertical, while in the films produced at 90°C, the nanorods mostly formed horizontally. These FESEM images also proved that the preferential orientation has changed from (011) to (010). Effects of bath temperature on band gap of semiconductor ZnO thin films were investigated by UV-Visible Spectrophotometer. ZnO thin films band gap value increased to 3.37 eV as the bath temperature increased to 85°C. When the bath temperature increased to 90°C the band gap value strongly decreased to 3.24 eV.

Keywords- ZnO Thin Films, Chemical Bath Deposition, Bath Temperature Effect, Preferred Orientations, Band Gap.

I. INTRODUCTION

Lately, interest in metal oxides such as ZnO, MgO, TiO₂ and CuO has been increasing. Transistors [1], water purification [2], optoelectronic devices [3] are some of the application areas of metal oxides. Owing to its various structures such as nanorods, nanoflowers, nanorings and nanobelts, ZnO is one of the most preferred and investigated materials [4].

ZnO metal semiconductor oxides have a wide direct band gap of about 3.3 eV. ZnO is also low-cost, nontoxic and chemically-inert material. Additionally, ZnO has hexagonal structure [5]. It has been widely utilized in optoelectronic applications such as sensors, LCDs, UV laser diodes, solar cells and plasma displays [6].

There are many publications in literature about ZnO thin film production by using several techniques such as PLD [7], laser ablation [8], sol-gel [9], sputtering [10], MBE [11] and CBD [12].

CBD technique is very low cost. It does not require vacuum and complicated procedures. In addition, the low working temperature and fast thin film deposition times are advantageous over other thin film deposition techniques. [13]. In this work, thin films were prepared via CBD technique. Deposition of ZnO thin film completed only 30 min and no annealing required to crystallize the produced thin film. Effects of bath temperature on c-axis preferred orientations and band gap of semiconductor ZnO films were examined.

II. EXPERIMENTAL STUDY

Thin films were prepared via CBD technique at varying bath temperatures on glass substrates. 100 ml of 0.1M Zinc nitrate hexahydrate solution was prepared. The pH was fixed to 10 by adding ammonia to the solution. Prior to thin film deposition, acetone, methanol and distilled water were used to clean glass substrates. Clean substrates were dipped in the bath solution and it was heated on magnetic stirrer with a temperature-controller. The bath solution was set to 75°C-90°C for A, B, and D series, respectively (Table 1).

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: sinan.temel@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-0889-9490>)
Bilecik Şeyh Edebali University, Central Research Laboratory, Bilecik, Turkey.

Thin film deposition was performed in 30 minutes for each series. After the deposited thin films were removed from the bath solution, distilled water were used to wash the films. Produced thin films were dried at room temperature. Annealing process was not required to crystallize the thin films.

Table 1. Label of ZnO thin films

Bath temperature	Label
75°C	A
80°C	B
85°C	C
90°C	D

The structural, surface and optical properties of the samples were characterized and the results were examined comparatively.

III. RESULTS AND DISCUSSION

Semiconductor ZnO thin films' crystal structure was determined via XRD measurements. (X-ray diffractometer: Panalytical Empyrean). CuK α radiation was used and the measurement was performed in the 30°-60° 2 θ range at the room temperature. In Figure 1, XRD spectra of ZnO semiconductor thin films were shown. All obtained ZnO semiconductor thin films have hexagonal structure. The diffraction patterns were matched with ZnO (hexagonal structure, ICDD:98-003-1052). Also thin films were in polycrystalline nature. In A series, (010) and (011) peaks of hexagonal ZnO structure in poor intensity were started to be observed at 75°C bath temperature. There is no preferred orientation for A series. B and C series deposited at 80°C and 85°C bath temperature have a preferred orientation towards (011) peak. C series have a strong preferred orientation towards (011) peak. When the bath temperature increased to 90°C, the preferred orientation changed towards (010) peak. The increase in bath temperature has changed the preferential orientation.

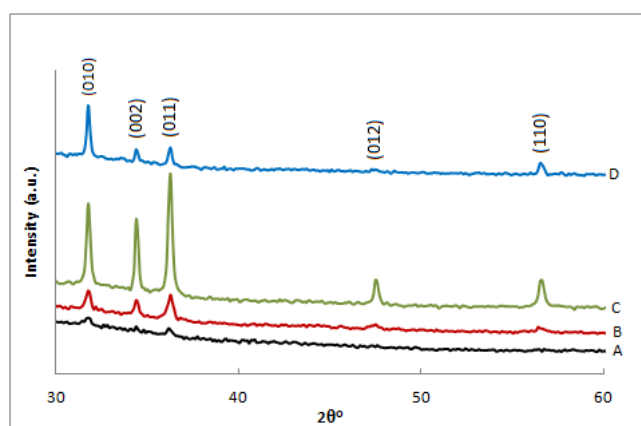


Figure 1. XRD spectra of ZnO semiconductor thin films.

The crystallite sizes of all samples were calculated by Scherrer's equation [14];

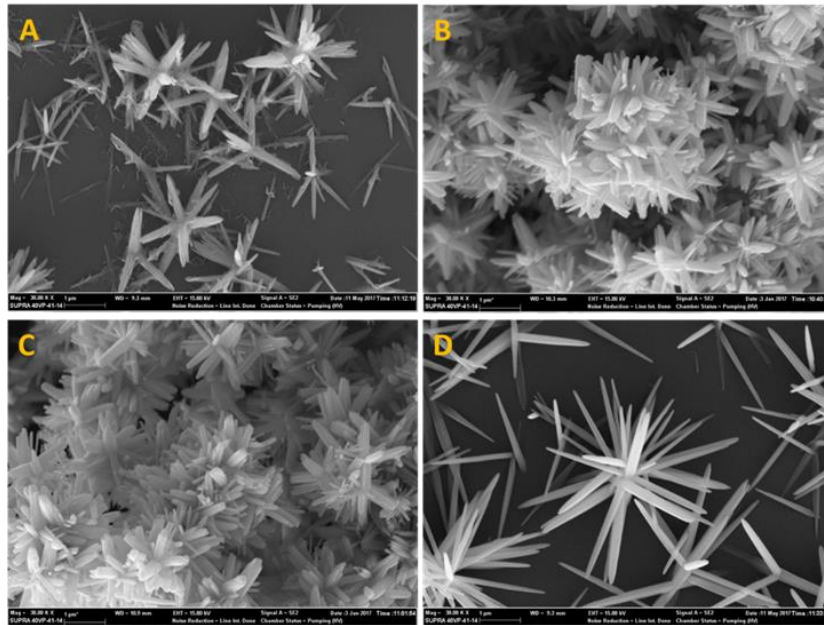
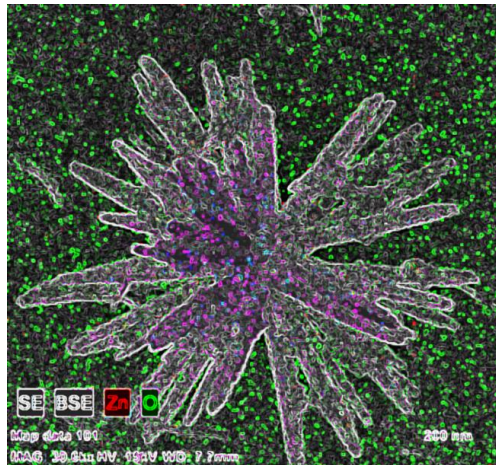
$$D = \frac{0,9\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (1)$$

Where λ ; the wavelength of X-rays, β ; the full width at half maximum value and θ is the angle of diffraction. The crystallite size values were given in Table 2. As seen from the table, the crystallite size values increase as the bath temperature increases.

Table 2. The crystallite size values of ZnO thin films

Series	D (nm)
A	30
B	38
C	47
D	62

The morphological properties of ZnO semiconductor thin films were determined by Zeiss Supra 40 VP FESEM. FESEM images showed that ZnO thin film structure was occurred by flower-like nanorods. FESEM images of ZnO semiconductor thin films were shown in Figure 2. As it seen in the series A, the flower-like nanorod structure was not fully developed. In the thin films deposited at 80°C and 85°C (B and C series), the alignment of the nanorods was usually vertical, while in the films deposited at 90°C (D series), the nanorods mostly formed horizontally. These FESEM images also proved that the preferential orientation has changed from (011) to (010). FESEM images are in agreement with XRD results.

**Figure 2.** FESEM images of ZnO semiconductor thin films.**Figure 3.** Elemental mapping image of ZnO nanoflower.

Elemental mapping results of ZnO nanoflower taken by the EDX detector was given in Figure 3. The green dots show the oxygen (O) atoms, and the red dots show the zinc (Zn) atoms. This image indicates that the nanoflower is zinc oxide (ZnO).

The band gap values of ZnO semiconductor thin films was specified by absorption spectra which were measured by Perkin Elmer Lambda 25 UV-Vis. Spectrophotometer (Wavelength: 300-1100 nm). Tauc method [15] was used to find out the band gap values. Due to Tauc method, the band gap energy value of the material is the point at which the linear part of the graph cuts the energy axis. In Figure 4, the plots of $(\alpha h\nu)^2$ versus energy and band gap values of ZnO semiconductor thin films were presented. The band gap values of ZnO films determined between 3.20 to 3.37 eV. The band gap value of ZnO thin films increased to 3.37 eV as the bath temperature increased to 85°C. When the bath temperature increased to 90°C the band gap value strongly decreased to 3.24 eV. The decrease in the band gap value is due to the dramatic increase in the crystallite size value at 90°C of bath temperature and the change in preferential orientation. This results showed that the band gap values of ZnO semiconductor thin films depend on the bath temperature.

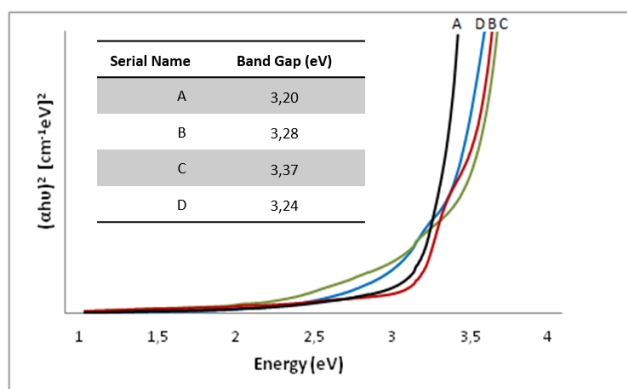


Figure 4. The plots of $(\alpha h\nu)^2$ vs. energy and band gap values of ZnO semiconductor thin films.

IV. CONCLUSION

ZnO semiconductor thin films were produced via CBD technique at varying bath temperatures to investigate effects of varying temperature on c-axis preferred orientations and band gap values. In this technique, deposition of ZnO thin film completed only 30 min and no annealing required to crystallize the produced thin film. All obtained ZnO semiconductor thin films have hexagonal structure and polycrystalline nature. Although hexagonal ZnO structure in a very small intensity were started to be observed at 75°C bath temperature, there is no preferred orientation in A series. B and C series deposited at 80°C and 85°C bath temperature have a preferred orientation towards (011) peak. When the bath temperature increased to 90°C, the preferred orientation changed towards (010) peak. It was showed that the increase in bath temperature has changed the preferential orientation. It was seen from FESEM images that that ZnO structure was formed by flower-like nanorods. In the series A, the structure was not fully formed. In B and C series, the alignment of the nanorods was usually vertical, while in the films deposited at 90°C (D series), the nanorods mostly formed horizontally. These FESEM images also proved that the preferential orientation has changed from (011) to (010). These structural and morphological characterizations indicated that preferred orientation of ZnO thin films can be easily changed by increasing the bath temperature in chemical bath deposition technique. The band gap values of ZnO thin films varied from 3.20 to 3.37 eV. The band gap value of ZnO thin films increased to 3.37 eV as the bath temperature increased to 85°C. When the bath temperature increased to 90°C the band gap value strongly decreased to 3.24 eV. This results showed that the band gap values of ZnO semiconductor thin films depend on the bath temperature. In ZnO semiconductor thin film applications that require lower band gap, the band gap value can be reduced by increasing the bath temperature in chemical bath deposition technique.

REFERENCES

- [1] Thiemann S., Gruber M., Lokteva I., Hirschmann J., Halik M. and Zaumseil J. (2013). High-mobility ZnO nanorod field-effect transistors by self-alignment and electrolyte-gating. *J. ACS Appl. Mater. Interfaces*, 5, 1656-1662.
- [2] Zhang X., Qin J., Xue Y., Yu P., Zhang B., Wang L. and Liu R. (2014). Effect of aspect ratio and surface defects on the photocatalytic activity of ZnO nanorods. *Sci.Rep.*, 4, 4596.
- [3] Pourshaban E., Abdizadeh H. and Golobostanfard M.R., "A close correlation between nucleation sites, growth and final properties of ZnO nanorod arrays: Sol-gel assisted chemical bath deposition process. *Ceram. Int.*, vol. 42, pp. 14721-14729, 2016.
- [4] Wang Z.L. (2014) Nanostructures of zinc oxide. *Mater. Today*, 7, 26-33.
- [5] Jiménez-García F.N. (2014). Influence of substrate on structural, morphological and optical properties of ZnO films grown by SILAR method. *Bull. Mater. Sci.* 37, 1283-1291.
- [6] Chen S. and Wang S. (2014). ZnO:H indium-free transparent conductive electrodes for active-matrix display applications. *Appl. Phys. Lett.*, 105, 223304.
- [7] Lu Y.F., Ni H.Q., Z. Mai H., and Ren Z.M. (2010). The effects of thermal annealing on ZnO thin films grown by pulsed laser deposition. *J. Appl. Phys.* 88, 498.
- [8] Kim T.H., Park J.J., Nam S.H., Park H.S., Cheong N.R., Song J.R. and Park S.M. (2012). Fabrication of Mg-doped ZnO thin films by laser ablation of Zn: Mg target. *Applied Surface Science*, 255, 5264-5266.
- [9] Tsay C.Y., Fan K.S., and Lei C.M. (2012). Synthesis and characterization of sol-gel derived gallium-doped zinc oxide thin films. *Journal of Alloys and Compounds*, 512, 216-222.
- [10] Zhao Y., Jiang D., Liu R., Duan Q., Tian C., Sun L., Gao S., Qin J., Liang Q. and Zhao J. (2015). Surface treatment to improve responsivity of MgZnO UV detectors. *Solid. State. Electron.*, 111, 223-226.
- [11] Yazawa M., Koguchi M., Muto A., Ozawa M. and Hiruma K. (1992). Effect of one monolayer surface gold atoms on the epitaxial growth of InAs nanowhiskers. *Appl. Phys. Lett.*, 61, 2051-2053.
- [12] Shaikh S.K., Inamdar S.I., Ganbavle V.V and Rajpure K.Y. (2016). Chemical bath deposited ZnO thin film based UV photoconductive detector. *J. Alloys Compd.*, 664, 242-249.
- [13] Kumar Y., Rana A.K., Bhojane P., Pusty M., Bagwe V., Sen S. and Shirage P.M. (2015). Controlling of ZnO nanostructures by solute concentration and its effect on growth, structural and optical properties. *Mater. Res. Express*, 2, 105017.
- [14] Cullity B.D. and Stock S.R. (2001). Elements of x-ray diffraction, Pearson Prentice Hall, New Jersey.
- [15] Tauc j. (1976). Amorphous and liquid semiconductors New York: Plenum.

Araştırma Makalesi - Research Article

Multi-Criteria Decision- Making Modeling of *b*-type ORC- Binary Geothermal Power Plant: EATWOS Analysis

Aslı ERGENEKON ARSLAN¹, Merve ŞENTÜRK ACAR² and Oğuz ARSLAN*

Geliş / Received: 08/05/2019

Revize / Revised: 16/05/2019

Kabul / Accepted: 16/05/2019

Abstract- In this study, taking the different parameters into account, different designs of *b*-type ORC power plant have analytically conducted. In the designs, Simav geothermal resources have been taken into consideration as the source of the plant. Then, the best design has been determined using EATWOS in the viewpoint of the working conditions. As a conclusion, the available models of *b1*-type, *b2*-type and *b3*-type were determined as Model 12, Model 10 and Model 31, respectively for energy efficiency, net yearly electricity generation and integrated-based values. Amongst these, the best model was determined as Model 10 with the design parameters of 353.15 K, 413.15 K, 295.15 K, 656.37 MWh and 18.08 for T_{1b} , T_{2d} , T_{2c} , E_{net} and η , respectively.

Keywords- EATWOS, Geothermal Energy, *B*-Type ORC

I. INTRODUCTION

Geothermal energy is one of the prominent renewable energy sources in reducing fossil fuel consumption due to its continuity and thus reducing the emission of waste gas which causes environmental pollution. The use of geothermal energy for electricity generation is one of the indirect ways of evaluating these resources. In the use of geothermal energy for electricity generation, the most common application for the evaluation of medium enthalpy resources is the Organic Rankine Cycle (ORC) power plants. The designs of these plants are depending on several parameters such as thermophysical properties of the geothermal resources and the working parameters of plants. However, the decision on the most effective system design is a very complex problem if the number of parameters or criteria is taken into account.

The people, who need to make an individual, institutional or global decision, have to take into account multiple criteria such as cost, sustainability, time, relationships and environmental issues in each other. From this point of view, Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) techniques is an advantageous tool since it propounds a multidimensional sight for the solution of the problem including mathematics, social issues, economics and act of operations. MCDM techniques are the techniques in which the multiple problems are optimized and the best one is chosen. So, it is widely used for problems with multi-criteria. Data Enveloping Analysis (DEA), Efficiency Analysis Technique with Output Satisficing (EATWOS), Analytical Hierarchy Process (AHP), and Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) are the commonly used MCDM techniques [1-2]. These techniques are used in many areas such as performance evaluation of corporations and universities, financial evaluations of the corporations and so on [3-7].

Energy topics and environmental topics related to energy are the complicated issues in which several purposes are mutually contradictory. So, they have a structure including more than single criteria, aim and quantity since they include maximum uncertainty, intensive investments and maximum time. For this reason, energy and environment decisions are in the scope of application of decision analysis [1, 8].

*Sorumlu yazar iletişim: oguz.arslan@bilecik.edu.tr, (<https://orcid.org/0000-0001-8233-831X>)

Department of Mechanical Engineering, Bilecik Şeyh Edebali Univ. Bilecik

¹İletişim: asli.arslan@bilecik.edu.tr, (<https://orcid.org/0000-0001-8052-8566>)

Machine and Metal Technologies, Bilecik Şeyh Edebali Univ. Bilecik

²İletişim: merve.senturkacar@bilecik.edu.tr, (<https://orcid.org/0000-0003-1442-4560>)

Department of Mechanical Engineering, Bilecik Şeyh Edebali Univ. Bilecik

If someone searches about the studies on decision analysis, electrical energy issues come into [8]. Beside this, the studies on renewable energy types (hydropower, solar energy, wind energy and geothermal energy) get increase in the last decade [1].

A new efficiency analysis technique, which determines the potential of recruitment of efficiency by considering satisfying levels for output amounts, was earned to literature by Peters and Zelewski (2006) [9]. This analysis technique, named EATWOS, is one of the most preferred methods of multivariate statistical analysis techniques. This technique puts on some advantages since it includes a calculation based on the weights of evaluating criteria(s). In this technique, the decision maker predicates satisfying results rather than the optimum ones [9, 10]. According to this, the decision maker avoids deceptive decisions since EATWOS allows a different grading in comparison to other techniques with its defined level of satisfying for one output at least. EATWOS is successfully used in a large area such as performance of industrial corporations, sportive players, suppliers, education, civil associations, energy systems [9-15] However in the literature, there is no or limited study on decision making of designing of energy systems such as power generation.

In this study, it is aimed to determine the best configuration of the geothermal power plant. In this purpose, conducting the different operating parameters, different designs of b-type Organic Rankine Cycle (ORC) were performed taking the properties of Simav geothermal field into account. The energy efficiencies and net power outputs of the designs were calculated by means of thermodynamic laws. Then, the optimum design parameters of the system determined with EATWOS method by using the results of the energy analysis.

II. DESIGN OF ORC-BINARY POWER PLANT

The flow diagram of the designed ORC power plant was given in Figure 1. The ORC power plant consists of separator (S), preheater (PH), evaporator (E), circulation pump (CP), condenser (C), control valve (CV) and turbine-generator (T/G) [16, 17].

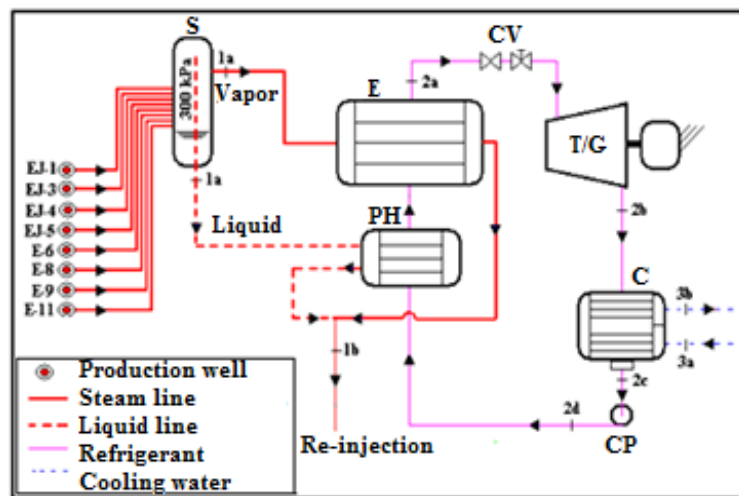


Figure 1. The flow diagram of the geothermal powered ORC-Binary power plant [16, 17]

According to Figure 1, the liquid and vapor phases of the geothermal fluid are divided into two flows in the separator. The liquid phase of the geothermal fluid enters to PH and gives its heat energy to the working fluid and vapor phase of the geothermal fluid enters to E and gives its heat energy to the preheated working fluid. At the end of these procedures both vapor and liquid phase of geothermal fluid compose and re-injected to the well. Superheated working fluid enters T/G (2a) and then expanded working fluid enters C (2b) at condensation pressure. The working fluid is compressed to the inlet pressure of the turbine at CP.

The type of working fluid is important for determining the operating conditions of the system. The thermodynamical properties of the working fluid effect the system operating parameters and the outputs of

the system (net power output, energy efficiency, condensation temperature). In this study, R-134a and R-141b are used as a working fluid. T - s diagrams of the cycles were given in Figure 2 [16,17].

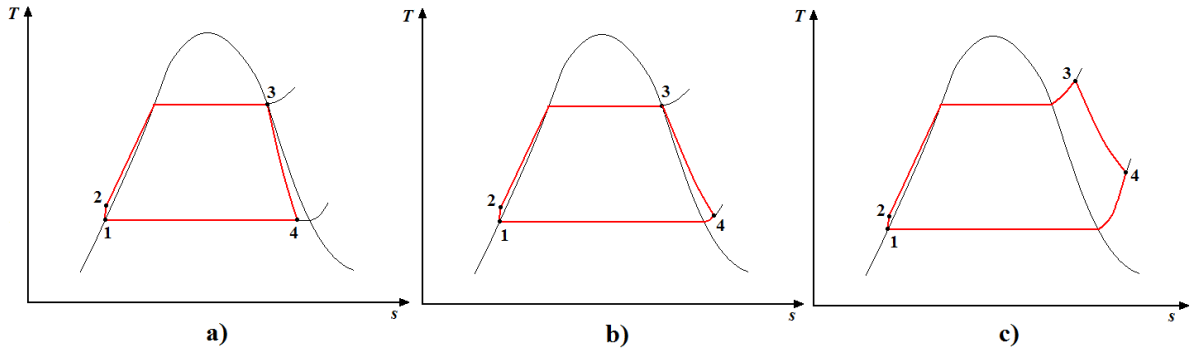


Figure 2. T - s diagram of B -Type ORC-Binary Power Plant a) $b1$ -type, b) $b2$ -type, c) $b3$ -type [16]

According to Figure 2., the B -type cycle design consists of $b1$, $b2$ and $b3$ models depending on the characteristics of the working fluid at the inlet and outlet of the turbine. At the $b1$ -type, the working fluid enters the turbine as a saturated vapor and exits the turbine as a saturated liquid-vapor mixture. The difference of type $b2$ -type from $b1$ -type is that the working fluid exits the turbine as a superheated vapor. At the $b3$ -type, the working fluid enters and exits the turbine as a superheated vapor. The temperatures of the geothermal fluids at the exit of preheater (T_{1b}) and evaporator (T_{1b}), the temperature of the working fluid at the exit of condenser (T_{2c}), the pressure and the temperature of the working fluid at the exit of pump (P_{2d} and T_{2d} , respectively) are the design parameters of the power plant.

The efficiency values of the heat exchanger, turbine, generator and pump were accepted as 98%, 85%, 99% and 90%, respectively. The net power output and the energy efficiencies of the systems were calculated by using the efficiency values of these components. The detailed information about the technical data and mathematical modeling of the designed plant could be reached from the study of Ref [16-18]. The results of designed plants can be seen in App. 1-4.

III. EATWOS ANALYSIS

EATWOS is a new technique developed in 2006 in order to obtain satisfactory solutions based on output. Depending on input values, it is a technique that can be used to give relative results in outputs and to compare these results with each other and to decide the optimum result in energy system design problems. The EATWOS implementation steps are summarized below [9]. Depending on the input and output values, the input and output matrices are respectively as follows;

$$\underline{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1K} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{I1} & \cdots & x_{IK} \end{bmatrix} \quad x_{ik} \in \mathbb{R}_{\geq 0} \quad \forall i = 1, \dots, I \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (1)$$

$$\underline{Y} = \begin{bmatrix} y_{11} & \cdots & y_{1J} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{I1} & \cdots & y_{IJ} \end{bmatrix} \quad y_{ij} \in \mathbb{R}_{\geq 0} \quad \forall i = 1, \dots, I \quad \forall j = 1, \dots, J \quad (2)$$

As a second step, these matrices are normalized using the following equations;

$$s_{ik} = \frac{x_{ik}}{\sqrt{\sum_{i=1}^K x_{ik}^2}} \quad (3)$$

$$r_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^I y_{ik}^2}} \quad (4)$$

As the third step, the distance matrices are calculated for the input and output values. In this context, the following distance measurement expressions are used for input and output values respectively.

$$ip_{ik} = 1 + s_{ik} - s_k^* \tag{5}$$

$$op_{ik} = 1 + r_{ij} - r_j^* \tag{6}$$

s_k^* and r_j^* are normalized maximum input and output values, respectively. These values are given as follows.

$$s_k^* = \min_i \{s_k\} \tag{7}$$

$$r_j^* = \max_i \{r_j\} \tag{8}$$

The efficiency values of the designs in the decision-making mechanisms are based on the weight values of the input (w_k) and output (v_j) parameters. The last step, the efficiency values are calculated by the following equation;

$$E_i = \frac{\sum_{j=1}^J v_j \cdot op_{ij}}{\sum_{k=1}^K w_k \cdot ip_{ik}} \tag{9}$$

IV. RESULTS AND DISCUSSION

In this study, 48 designs for *b1-Type*, 48 designs for *b2-Type* and 288 designs for *b3-Type* were designed for two different working fluid (R-141b, R-134a), pressure and temperature values of the geothermal energy powered ORC cycle. T_{1b} , T_{2d} , T_{2c} and P_{2d} values are the input parameters of the EATWOS analysis. Also, the output parameters of this analysis are energy efficiency (η) and the net power output values. The weights used in the modeling of inputs and outputs are calculated as the ratio of the sum of the normalized distance within each input and output to the total weight of all parameters as given in Table 1-3. The efficiency values of EATWOS analysis which were calculated according to the weight values were given in Figure 3 for *b1-type* (R-134a), Figure 4 for *b2-type* (R-141b) and Figure 5 for *b3-type* (R-134a, R-141b).

Table 1. The weights for *b1-type* models

Weight values	w_k			v_j	
	T_{1b} (K)	T_{2d} (K)	T_{2c} (K)	W_{net} (MW)	η
Parameters Total	49.086	48.385	49.555	46.641	47.125
Overall Total	147.026			93.766	
Weight	0.333863	0.329089	0.337048	0.497419	0.502581

Table 2. The weights for *b2-type* models

Weight values	w_k			v_j	
	T_{1b} (K)	T_{2d} (K)	T_{2c} (K)	W_{net} (MW)	η
Parameters Total	49.086	48.532	49.555	46.784	47.261
Overall Total	147.173			94.045	
Weight	0.333529	0.329761	0.336711	0.497469	0.502531

Table 3. The weights for *b3-type* models

R-134a						
Weight values	w_k				v_j	
	T_{1b} (K)	T_{2d} (K)	T_{2c} (K)	P_{2d} (kPa)	W_{net} (MW)	η
Parameters Total	145.882	144.666	146.693	145.958	139.575	140.506
Overall Total	583.198				280.082	
Weight	0.250141	0.248056	0.251532	0.250271	0.498338	0.501662
R-141b						
Weight values	w_k				v_j	
	T_{1b} (K)	T_{2d} (K)	T_{2c} (K)	P_{2d} (kPa)	W_{net} (MW)	η
Parameters Total	145.882	144.921	146.693	149.306	139.307	140.351
Overall Total	586.802				279.659	
Weight	0.248605	0.246968	0.249987	0.25444	0.498133	0.501867

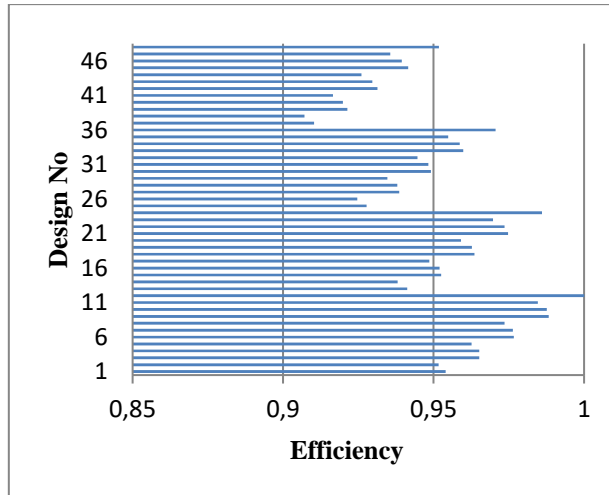


Figure 3. W_{net} based efficiency values of $b1$ -type models (R-134a)

According to Figure 3, the efficiency values of the models are determined between 0.90 and 1.00. In this case, the most effective design in terms of decision-making is determined as Model 12 depending on its highest efficiency value. W_{net} based efficiency values of $b2$ -type models and $b3$ -type models are given in Figure 4 and Figure 5, respectively.

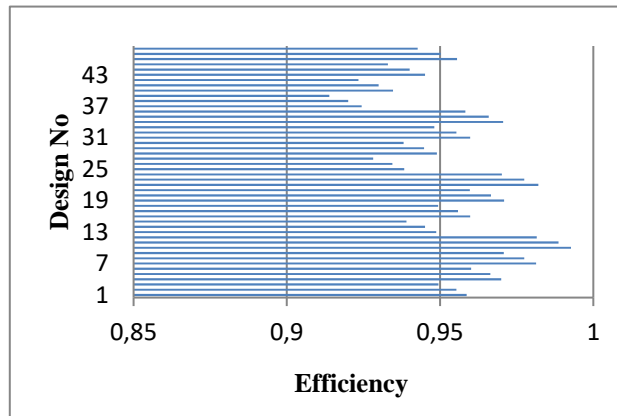


Figure 4. W_{net} based efficiency values of $b2$ -type models (R-141b)

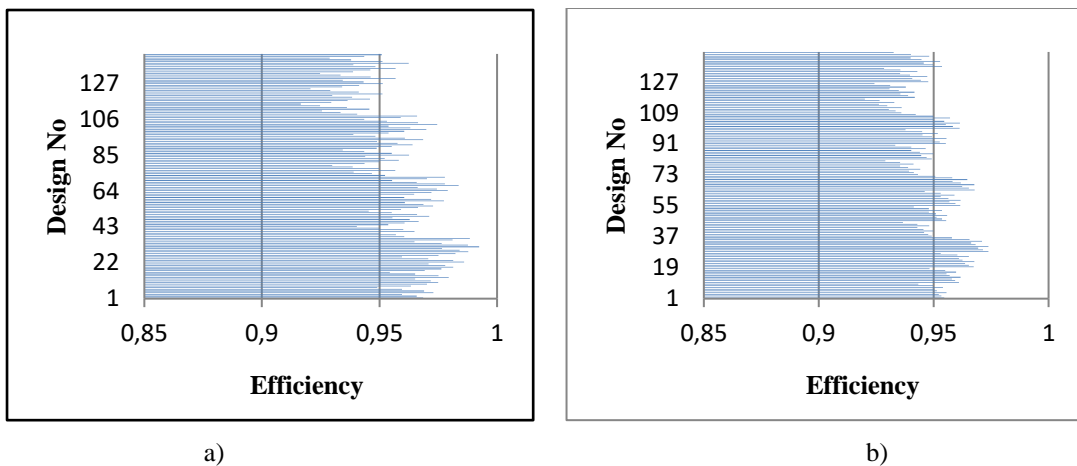


Figure 5. W_{net} based efficiency values of $b3$ -type models a) R-134a, b) R-141b

According to Figure 4 and Figure 5a, W_{net} based efficiency values of *b2-type* models and *b3-type* models for R-134a are determined between 0.91 and 0.99. The most effective design in terms of decision-making is determined as Model 10 for *b2-type* models and Model 31 for *b3-type* (R-134a). According to Figure 5b, W_{net} based efficiency values of *b3-type* models are determined between 0.92 and 0.97 for R-141b. In this case, the most effective design in terms of decision-making is determined as Model 31. η based efficiency values of *b1-type* models and *b2-type* models are given in Figure 6 and Figure 7, respectively.

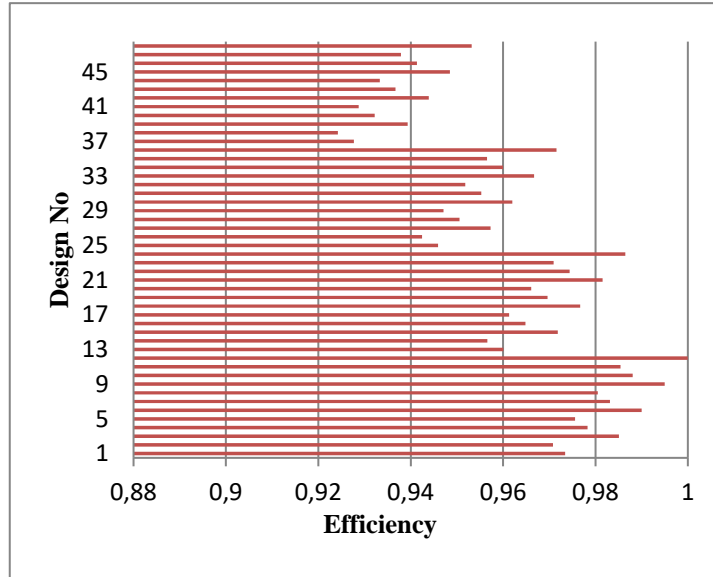


Figure 6. η based efficiency values of *b1-type* models (R-134a)

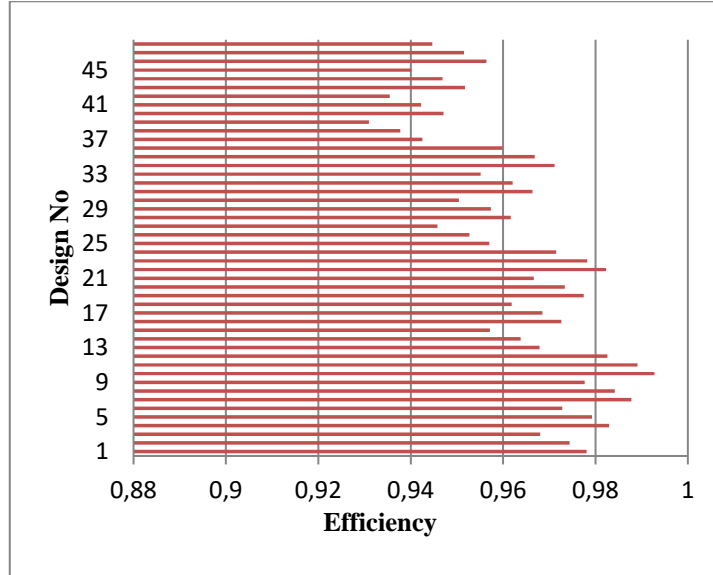


Figure 7. η based efficiency values of *b2-type* models (R-141b)

As seen in Figure 6, η based efficiency values of *b1-type* models are calculated between 0.92 and 1.00. Under the same circumstances, the most effective design in terms of decision-making is determined as model 12. According to Figure 7, η based efficiency values of *b2-type* models are determined between 0.93 and 0.99. In this case, the most effective design in terms of decision-making is determined as Model 10. η based efficiency values of *b3-type* models for R-134a and R-141b are given in Figure 8a and Figure 8b, respectively.

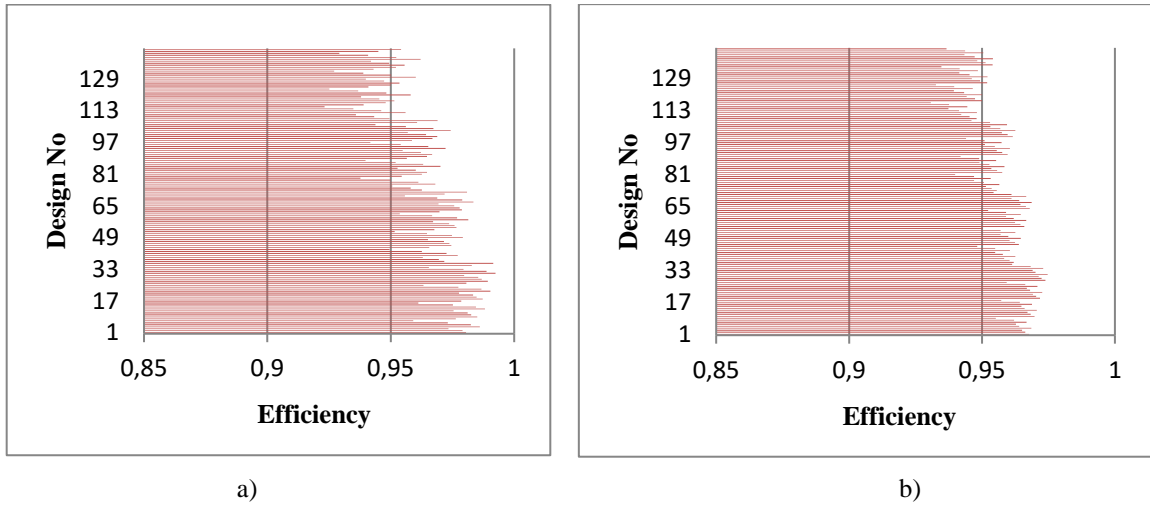


Figure 8. η based efficiency values of $b3$ -type models a) R-134a, b) R-141b

As seen in Figure 8a and Figure 8b, η based efficiency values of $b3$ -type models are calculated between 0.92 and 1.00 for R-134a and 0.93 and 0.97 for R-141b. Under the same circumstances, the most effective design in terms of decision-making is determined as Model 31 for both working fluids. W_{net} and η integrated-based efficiency values of $b1$ -type models and $b2$ -type models are given in Figure 9 and Figure 10, respectively.

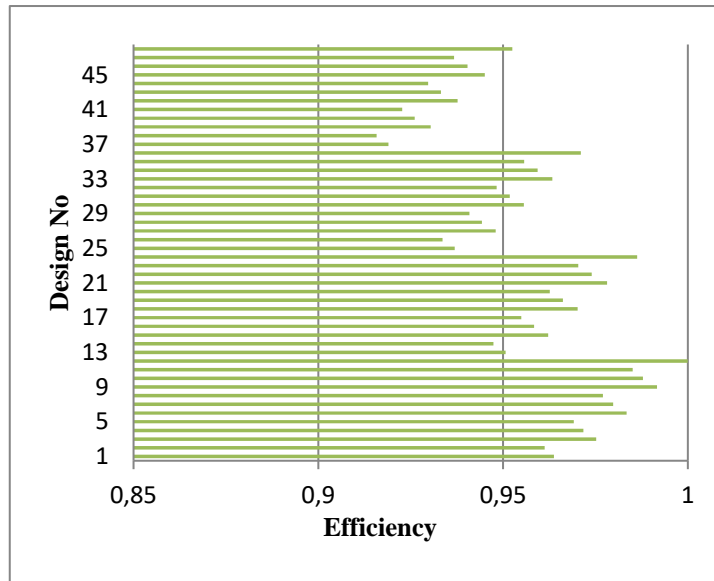


Figure 9. W_{net} and η integrated-based efficiency values of $b1$ -type models (R-134a)

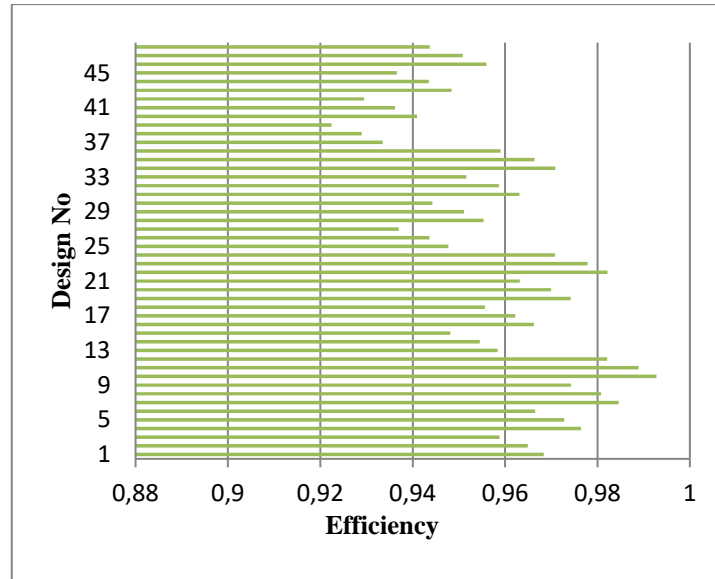


Figure 10. W_{net} and η integrated-based efficiency values of $b2$ -type models (R-141b)

As seen in Figure 9, W_{net} and η integrated-based efficiency values of $b1$ -type models are calculated between 0,91 and 1.00. Under the same circumstances, the most effective design in terms of decision-making is determined as model 12. According to Figure 10., W_{net} and η integrated-based efficiency values of $b2$ -type models are determined between 0.92 and 0.99. In this case, the most effective design in terms of decision-making is determined as Model 10. W_{net} and η integrated-based efficiency values of $b3$ -type models for R-134a and R-141b are given in Figure 11a and Figure 11b, respectively

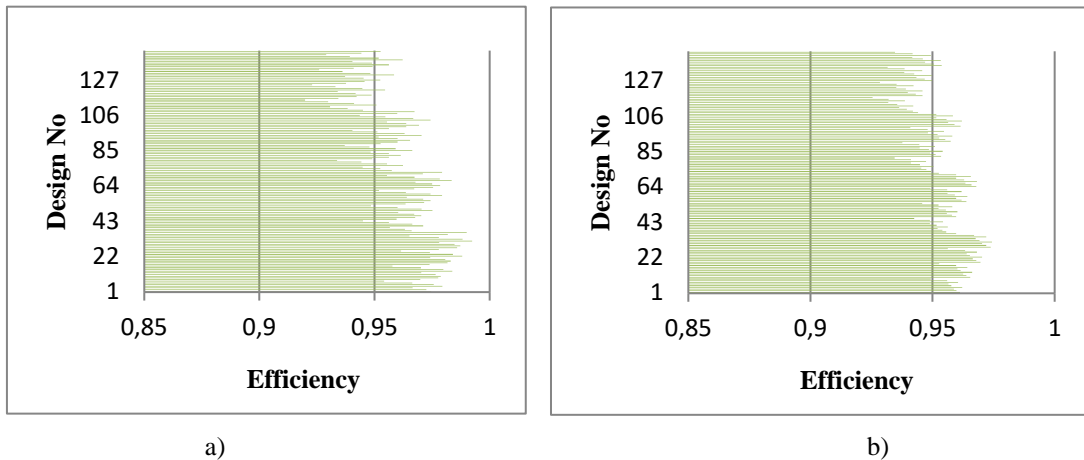


Figure 11. W_{net} and η integrated-based efficiency values of $b3$ -type models a) R-134a, b) R-141b

As seen in Figure 11a and Figure 11b, W_{net} and η integrated-based efficiency values of $b3$ -type models are calculated between 0.91 and 0.99 for R-134a and 0.92 and 0.97 for R-141b. Under the same circumstances, the most effective design in terms of decision-making is determined as model 31 for both working fluids.

The efficiency values increase with the decrease of the T_{1b} and T_{2d} . With the increase of T_{2c} , the efficiency values decrease. The effect of pressure on efficiency is negative since the efficiency decrease with the increase of pressure.

V. CONCLUSION

In this study, *b-type* ORC geothermal power plants have been analytically examined considering various design parameters. Then, obtained energy efficiency and net power output values were evaluated with EATWOS multi-criteria decision-making model and the most effective design was determined.

As a result, the most effective models of *b1-type*, *b2-type* and *b3-type* were determined as Model 12, Model 10 and Model 31, respectively for energy efficiency, net yearly electricity generation and integrated-based values. The system parameters of Model 12 for *b1-type* were determined as 353.15 K, 358.15 K, 295.15 K, 410.92 MWh and 11.32 for T_{1b} , T_{2d} , T_{2c} , E_{net} and η , respectively. The system parameters of Model 10 for *b2-type* were determined as 353.15 K, 413.15 K, 295.15 K, 656.37 MWh and 18.08 for T_{1b} , T_{2d} , T_{2c} , E_{net} and η , respectively. The system parameters of Model 31 for *b3-type* (R-141b) were determined as 353.15 K, 403.15 K, 295.15 K, 1000 kPa, 601.10 MWh and 16.29 for T_{1b} , T_{2d} , T_{2c} , P_{2d} , E_{net} and η , respectively. The system parameters of model 31 for *b3-type* (R-134a) were determined as 353.15 K, 363.15 K, 295.15 K, 2750 kPa, 439.99 MWh and 11.22 for T_{1b} , T_{2d} , T_{2c} , P_{2d} , E_{net} and η , respectively.

In decision making for the optimum design, it is still needed an expert view. From this point, Model 10 seems as the best configuration taking the highest energy generation rate, relatively higher thermal efficiency and lower pressure ratios into account.

REFERENCES

- [1] Atici K.B., Ulucan, A. (2009). Enerji Projelerinin Değerlendirilmesi Sürecinde Çok Kriterli Karar Verme Yaklaşımları ve Türkiye Uygulamaları. Hacettepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, Cilt 27, Sayı 1, 161-186 (in Turkish).
- [2] Yıldırım, B.F., Önder, E. (2015). İşletmeciler, Mühendisler ve Yöneticiler için Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri. Dora Yayınevi, 2. Baskı, Bursa (in Turkish).
- [3] Arslan, A. E., Güven, Ö.Z., (2018). Veri Zarflama Analizi ile Üniversite Etkinliklerinin Belirlenmesine Yönelik Bir Çalışma: Türkiye Örneği. Uluslararası Afro-Avrasya Araştırmaları Dergisi, 3(6), 86-105.
- [4] Arslan, A. E., Acar, M. S., Arslan O., (2018). Data Enveloping Based Effectiveness Analysis of Integrated Geothermal System: Simav Case Study. International Congress on Afro - Eurasian Research IV, 27-29 April 2018.
- [5] Huang, W., Eling, M., (2013). An efficiency comparison of the non-life insurance industry in the BRIC countries. European Journal of Operational Research, 226(3), 577-591.
- [6] Kundakcı, N., (2018). Efficiency Evaluation of State Universities in Turkey with EATWOS Method. International Congress on Afro - Eurasian Research IV, 27-29 April 2018.
- [7] Özbek, A., (2015). Efficiency Analysis of Non-Governmental Organizations Based in Turkey. International Business Research, 8(9), 1-11.
- [8] Zhou, P., Ang, B.W., Poh, K.L. (2006). Decision Analysis in Energy and Environmental Modeling: an Update. Energy, 31, 2604–2622.
- [9] Peters, M. L., Zelewski, S. (2006). Efficiency analysis under consideration of satisficing levels for output quantities. In Proceedings of the 17th Annual Conference of the Production and Operations Management Society (POMS), April 28-May 01, Boston, USA.
- [10] Özbek, Aşır, (2016), Madencilik Sektöründe Yer Alan Şirketlerin Eatwos İle Karşılaştırılması. Uluslararası Katılımlı 16. Üretim Araştırmaları Sempozyumu, İstanbul Teknik Üniversitesi, 12-14 Ekim 2016, İstanbul.
- [11] Özbek, A., (2017). Çok Ölçütlü Karar Verme Yöntemleriyle Hayırsever Kuruluşlarında Verimlilik Analizi. Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 18, No: 2, 99-114.
- [12] Soni, V., Singh, S. P., Devinder K. B., (2016). Precise decisions in Indian energy sector by imprecise evaluation. International Journal of Energy Sector Management, Volume 10, Issue 1.

- [13] Bansal, A. K., Singh, R., Issar, S., Varkey, J., (2014). Evaluation of Vendors Ranking By EATWOS Approach. *Journal of Advances in Management Research*, 11(3), 290-311.
- [14] Peters, M. L., Zelewski. S., (2016). Benefits and Risks of Satisficing Levels for Input and Output Quantities in Efficiency Analyses from A Corporate Social Responsibility Perspective. *International Journal of Management and Sustainability*, Vol. 5, No. 12, 94-101.
- [15] Peters, M. L., Zelewski S., (2018). Some Thoughts on Operationalizing The Concept of Sufficiency in Efficiency Analysis. *International Journal of Management and Sustainability*, Vol. 7, No. 1, 63-71.
- [16] Arslan, O., (2008). *Simav-Eynal Jeotermal Kaynaklarının Hassas Değerlendirilmesi: Entegre sistem tasarım ve enerji-ekserji analizleri*. Eskisehir Osmangazi Üniversitesi. Doktora Tezi.
- [17] Arslan, O., Yetik, O., (2014). ANN modeling of an ORC-binary geothermal power plant: simav case study. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 36 (4), 418-428.
- [18] Arslan, O., Ozgur, M.A., Kose, R., (2012). Electricity generation ability of the Simav geothermal field: A techno-economic approach. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 34 (12), 1130-1144.

APPENDIX

APP. 1. Design parameters of b1-type model for R-134a as a working fluid

Design No	T_{1b} (K)	T_{2d} (K)	T_{2c} (K)	E_{net} (MWh)	η	No	T_{1b} (K)	T_{2d} (K)	T_{2c} (K)	E_{net} (MWh)	η
1	383.15	368.15	295.15	347.58	10.85	25	383.15	368.15	303.15	313.29	9.78
2	383.15	363.15	295.15	335.79	10.48	26	383.15	363.15	303.15	299.75	9.35
3	383.15	358.15	295.15	362.62	11.32	27	383.15	358.15	303.15	328.17	10.24
4	373.15	368.15	295.15	363.06	10.85	28	373.15	368.15	303.15	327.24	9.78
5	373.15	363.15	295.15	350.75	10.48	29	373.15	363.15	303.15	313.10	9.35
6	373.15	358.15	295.15	378.77	11.32	30	373.15	358.15	303.15	342.79	10.24
7	363.15	368.15	295.15	378.49	10.85	31	363.15	368.15	303.15	341.14	9.78
8	363.15	363.15	295.15	365.65	10.48	32	363.15	363.15	303.15	326.40	9.35
9	363.15	358.15	295.15	394.86	11.32	33	363.15	358.15	303.15	357.35	10.24
10	353.15	368.15	295.15	393.88	10.85	34	353.15	368.15	303.15	355.02	9.78
11	353.15	363.15	295.15	380.52	10.48	35	353.15	363.15	303.15	339.67	9.35
12	353.15	358.15	295.15	410.92	11.32	36	353.15	358.15	303.15	371.88	10.24
13	383.15	368.15	299.15	331.57	10.35	37	383.15	368.15	309.15	292.01	9.11
14	383.15	363.15	299.15	317.88	9.92	38	383.15	363.15	309.15	278.54	8.69
15	383.15	358.15	299.15	347.16	10.83	39	383.15	358.15	309.15	308.06	9.61
16	373.15	368.15	299.15	346.34	10.35	40	373.15	368.15	309.15	305.02	9.11
17	373.15	363.15	299.15	332.03	9.92	41	373.15	363.15	309.15	290.94	8.69
18	373.15	358.15	299.15	362.62	10.83	42	373.15	358.15	309.15	321.78	9.61
19	363.15	368.15	299.15	361.05	10.35	43	363.15	368.15	309.15	317.98	9.11
20	363.15	363.15	299.15	346.14	9.92	44	363.15	363.15	309.15	303.31	8.69
21	363.15	358.15	299.15	378.02	10.83	45	363.15	358.15	309.15	335.46	9.61
22	353.15	368.15	299.15	375.74	10.35	46	353.15	368.15	309.15	330.91	9.11
23	353.15	363.15	299.15	360.22	9.92	47	353.15	363.15	309.15	315.64	8.69
24	353.15	358.15	299.15	393.40	10.83	48	353.15	358.15	309.15	349.10	9.61

APP. 2. Design parameters of *b2-type* model for R-141b as a working fluid

Design No	T_{1b} (K)	T_{2d} (K)	T_{2c} (K)	E_{net} (MWh)	η	No	T_{1b} (K)	T_{2d} (K)	T_{2c} (K)	E_{net} (MWh)	η
1	383.15	413.15	295.15	579.22	18.08	25	383.15	413.15	303.15	547.54	17.09
2	383.15	403.15	295.15	552.68	17.25	26	383.15	403.15	303.15	518.72	16.19
3	383.15	393.15	295.15	516.07	16.10	27	383.15	393.15	303.15	480.26	14.99
4	373.15	413.15	295.15	605.02	18.08	28	373.15	413.15	303.15	571.92	17.09
5	373.15	403.15	295.15	577.29	17.25	29	373.15	403.15	303.15	541.81	16.19
6	373.15	393.15	295.15	539.05	16.10	30	373.15	393.15	303.15	501.65	14.99
7	363.15	413.15	295.15	630.73	18.08	31	363.15	413.15	303.15	596.23	17.09
8	363.15	403.15	295.15	601.82	17.25	32	363.15	403.15	303.15	564.84	16.19
9	363.15	393.15	295.15	561.95	16.10	33	363.15	393.15	303.15	522.96	14.99
10	353.15	413.15	295.15	656.37	18.08	34	353.15	413.15	303.15	620.47	17.09
11	353.15	403.15	295.15	626.29	17.25	35	353.15	403.15	303.15	587.81	16.19
12	353.15	393.15	295.15	584.80	16.10	36	353.15	393.15	303.15	544.23	14.99
13	383.15	413.15	299.15	564.90	17.63	37	383.15	413.15	309.15	527.70	16.47
14	383.15	403.15	299.15	536.83	16.75	38	383.15	403.15	309.15	496.91	15.51
15	383.15	393.15	299.15	499.33	15.58	39	383.15	393.15	309.15	458.92	14.32
16	373.15	413.15	299.15	590.06	17.63	40	373.15	413.15	309.15	551.20	16.47
17	373.15	403.15	299.15	560.73	16.75	41	373.15	403.15	309.15	519.04	15.51
18	373.15	393.15	299.15	521.56	15.58	42	373.15	393.15	309.15	479.36	14.32
19	363.15	413.15	299.15	615.13	17.63	43	363.15	413.15	309.15	574.62	16.47
20	363.15	403.15	299.15	584.56	16.75	44	363.15	403.15	309.15	541.09	15.51
21	363.15	393.15	299.15	543.73	15.58	45	363.15	393.15	309.15	499.73	14.32
22	353.15	413.15	299.15	640.15	17.63	46	353.15	413.15	309.15	597.99	16.47
23	353.15	403.15	299.15	608.33	16.75	47	353.15	403.15	309.15	563.09	15.51
24	353.15	393.15	299.15	565.84	15.58	48	353.15	393.15	309.15	520.05	14.32

APP. 3. Design parameters of *b3*-type model for R-134a as a working fluid

Design No	T_{1b} (K)	T_{2d} (K)	T_{2c} (K)	P_{2d} (kPa)	E_{net} (MWh)	η
1	383.15	368.15	295.15	3000	383.16	10.97
2	383.15	368.15	295.15	2500	356.02	10.37
3	383.15	368.15	295.15	2000	315.35	9.32
4	383.15	363.15	295.15	2750	388.27	11.22
5	383.15	363.15	295.15	2500	364.18	10.61
6	383.15	363.15	295.15	2000	311.01	9.17
7	383.15	358.15	295.15	2500	281.83	8.01
8	383.15	358.15	295.15	2300	331.71	9.67
9	383.15	358.15	295.15	2000	348.51	10.33
10	373.15	368.15	295.15	3000	400.22	10.97
11	373.15	368.15	295.15	2500	371.88	10.37
12	373.15	368.15	295.15	2000	329.40	9.32
13	373.15	363.15	295.15	2750	405.56	11.22
14	373.15	363.15	295.15	2500	380.40	10.61
15	373.15	363.15	295.15	2000	324.86	9.17
16	373.15	358.15	295.15	2500	294.38	8.01
17	373.15	358.15	295.15	2300	346.48	9.67
18	373.15	358.15	295.15	2000	364.03	10.33
19	363.15	368.15	295.15	3000	417.23	10.97
20	363.15	368.15	295.15	2500	387.68	10.37
21	363.15	368.15	295.15	2000	343.39	9.32
22	363.15	363.15	295.15	2750	422.79	11.22
23	363.15	363.15	295.15	2500	396.57	10.61
24	363.15	363.15	295.15	2000	338.66	9.17
25	363.15	358.15	295.15	2500	306.89	8.01
26	363.15	358.15	295.15	2300	361.20	9.67
27	363.15	358.15	295.15	2000	379.50	10.33
28	353.15	368.15	295.15	3000	434.19	10.97
29	353.15	368.15	295.15	2500	403.44	10.37
30	353.15	368.15	295.15	2000	357.36	9.32
31	353.15	363.15	295.15	2750	439.99	11.22
32	353.15	363.15	295.15	2500	412.69	10.61
33	353.15	363.15	295.15	2000	352.43	9.17
34	353.15	358.15	295.15	2500	319.37	8.01
35	353.15	358.15	295.15	2300	375.89	9.67
36	353.15	358.15	295.15	2000	394.93	10.33
37	383.15	368.15	299.15	3000	362.47	10.32
38	383.15	368.15	299.15	2500	332.26	9.64
39	383.15	368.15	299.15	2000	289.20	8.51

APP. 3. (continued)

Design No	T_{1b} (K)	T_{2d} (K)	T_{2c} (K)	P_{2d} (kPa)	E_{net} (MWh)	η
40	383.15	363.15	299.15	2750	367.43	10.57
41	383.15	363.15	299.15	2500	340.09	9.86
42	383.15	363.15	299.15	2000	284.14	8.34
43	383.15	358.15	299.15	2500	258.16	7.27
44	383.15	358.15	299.15	2300	304.09	8.82
45	383.15	358.15	299.15	2000	321.88	9.51
46	373.15	368.15	299.15	3000	378.61	10.32
47	373.15	368.15	299.15	2500	347.06	9.64
48	373.15	368.15	299.15	2000	302.07	8.51
49	373.15	363.15	299.15	2750	383.79	10.57
50	373.15	363.15	299.15	2500	355.23	9.86
51	373.15	363.15	299.15	2000	296.80	8.34
52	373.15	358.15	299.15	2500	269.66	7.27
53	373.15	358.15	299.15	2300	317.63	8.82
54	373.15	358.15	299.15	2000	336.22	9.51
55	363.15	368.15	299.15	3000	394.69	10.32
56	363.15	368.15	299.15	2500	361.81	9.64
57	363.15	368.15	299.15	2000	314.91	8.51
58	363.15	363.15	299.15	2750	400.10	10.57
59	363.15	363.15	299.15	2500	370.32	9.86
60	363.15	363.15	299.15	2000	309.41	8.34
61	363.15	358.15	299.15	2500	281.12	7.27
62	363.15	358.15	299.15	2300	331.13	8.82
63	363.15	358.15	299.15	2000	350.50	9.51
64	353.15	368.15	299.15	3000	410.74	10.32
65	353.15	368.15	299.15	2500	376.52	9.64
66	353.15	368.15	299.15	2000	327.72	8.51
67	353.15	363.15	299.15	2750	416.37	10.57
68	353.15	363.15	299.15	2500	385.38	9.86
69	353.15	363.15	299.15	2000	321.99	8.34
70	353.15	358.15	299.15	2500	292.55	7.27
71	353.15	358.15	299.15	2300	344.60	8.82
72	353.15	358.15	299.15	2000	364.76	9.51
73	383.15	368.15	303.15	3000	340.69	9.64
74	383.15	368.15	303.15	2500	302.48	8.71
75	383.15	368.15	303.15	2000	255.95	7.49
76	383.15	363.15	303.15	2750	345.49	9.89
77	383.15	363.15	303.15	2500	309.80	8.92
78	383.15	363.15	303.15	2000	249.99	7.29

APP. 3. (continued)

Design No	T_{1b} (K)	T_{2d} (K)	T_{2c} (K)	P_{2d} (kPa)	E_{net} (MWh)	η
79	383.15	358.15	303.15	2500	226.73	6.30
80	383.15	358.15	303.15	2300	275.03	7.92
81	383.15	358.15	303.15	2000	290.22	8.53
82	373.15	368.15	303.15	3000	355.86	9.64
83	373.15	368.15	303.15	2500	315.95	8.71
84	373.15	368.15	303.15	2000	267.34	7.49
85	373.15	363.15	303.15	2750	360.87	9.89
86	373.15	363.15	303.15	2500	323.59	8.92
87	373.15	363.15	303.15	2000	261.12	7.29
88	373.15	358.15	303.15	2500	236.82	6.30
89	373.15	358.15	303.15	2300	287.28	7.92
90	373.15	358.15	303.15	2000	303.15	8.53
91	363.15	368.15	303.15	3000	370.98	9.64
92	363.15	368.15	303.15	2500	329.37	8.71
93	363.15	368.15	303.15	2000	278.70	7.49
94	363.15	363.15	303.15	2750	376.21	9.89
95	363.15	363.15	303.15	2500	337.34	8.92
96	363.15	363.15	303.15	2000	272.22	7.29
97	363.15	358.15	303.15	2500	246.89	6.30
98	363.15	358.15	303.15	2300	299.49	7.92
99	363.15	358.15	303.15	2000	316.03	8.53
100	353.15	368.15	303.15	3000	386.07	9.64
101	353.15	368.15	303.15	2500	342.77	8.71
102	353.15	368.15	303.15	2000	290.04	7.49
103	353.15	363.15	303.15	2750	391.50	9.89
104	353.15	363.15	303.15	2500	351.06	8.92
105	353.15	363.15	303.15	2000	283.29	7.29
106	353.15	358.15	303.15	2500	256.93	6.30
107	353.15	358.15	303.15	2300	311.66	7.92
108	353.15	358.15	303.15	2000	328.88	8.53
109	383.15	368.15	309.15	3000	309.14	8.65
110	383.15	368.15	309.15	2500	264.92	7.56
111	383.15	368.15	309.15	2000	217.97	6.34
112	383.15	363.15	309.15	2750	317.78	9.03
113	383.15	363.15	309.15	2500	271.60	7.75
114	383.15	363.15	309.15	2000	210.84	6.10
115	383.15	358.15	309.15	2500	189.69	5.16
116	383.15	358.15	309.15	2300	234.95	6.69
117	383.15	358.15	309.15	2000	252.92	7.40

APP. 3. (continued)

Design No	T_{1b} (K)	T_{2d} (K)	T_{2c} (K)	P_{2d} (kPa)	E_{net} (MWh)	η
118	373.15	368.15	309.15	3000	322.91	8.65
119	373.15	368.15	309.15	2500	276.71	7.56
120	373.15	368.15	309.15	2000	227.68	6.34
121	373.15	363.15	309.15	2750	331.93	9.03
122	373.15	363.15	309.15	2500	283.70	7.75
123	373.15	363.15	309.15	2000	220.23	6.10
124	373.15	358.15	309.15	2500	198.13	5.16
125	373.15	358.15	309.15	2300	245.41	6.69
126	373.15	358.15	309.15	2000	264.18	7.40
127	363.15	368.15	309.15	3000	336.63	8.65
128	363.15	368.15	309.15	2500	288.47	7.56
129	363.15	368.15	309.15	2000	237.35	6.34
130	363.15	363.15	309.15	2750	346.03	9.03
131	363.15	363.15	309.15	2500	295.75	7.75
132	363.15	363.15	309.15	2000	229.59	6.10
133	363.15	358.15	309.15	2500	206.55	5.16
134	363.15	358.15	309.15	2300	255.84	6.69
135	363.15	358.15	309.15	2000	275.41	7.40
136	353.15	368.15	309.15	3000	350.32	8.65
137	353.15	368.15	309.15	2500	300.20	7.56
138	353.15	368.15	309.15	2000	247.00	6.34
139	353.15	363.15	309.15	2750	360.10	9.03
140	353.15	363.15	309.15	2500	307.78	7.75
141	353.15	363.15	309.15	2000	238.93	6.10
142	353.15	358.15	309.15	2500	214.95	5.16
143	353.15	358.15	309.15	2300	266.24	6.69
144	353.15	358.15	309.15	2000	286.61	7.40

APP. 4. Design parameters of $b3$ -type model for R-141b as a working fluid

Design No	T_{1b} (K)	T_{2d} (K)	T_{2c} (K)	P_{2d} (kPa)	E_{net} (MWh)	η
1	383.15	413.15	295.15	1300	576.57	17.65
2	383.15	413.15	295.15	1000	525.76	16.15
3	383.15	413.15	295.15	700	476.63	14.70
4	383.15	403.15	295.15	1000	530.44	16.29
5	383.15	403.15	295.15	700	462.95	14.27
6	383.15	403.15	295.15	500	427.93	13.24
7	383.15	393.15	295.15	700	469.91	14.48
8	383.15	393.15	295.15	500	416.63	12.88
9	383.15	393.15	295.15	400	365.63	11.32
10	373.15	413.15	295.15	1300	602.25	17.65
11	373.15	413.15	295.15	1000	549.17	16.15
12	373.15	413.15	295.15	700	497.85	14.70
13	373.15	403.15	295.15	1000	554.07	16.29
14	373.15	403.15	295.15	700	483.57	14.27
15	373.15	403.15	295.15	500	446.99	13.24
16	373.15	393.15	295.15	700	490.84	14.48
17	373.15	393.15	295.15	500	435.18	12.88
18	373.15	393.15	295.15	400	381.91	11.32
19	363.15	413.15	295.15	1300	627.84	17.65
20	363.15	413.15	295.15	1000	572.50	16.15
21	363.15	413.15	295.15	700	519.01	14.70
22	363.15	403.15	295.15	1000	577.61	16.29
23	363.15	403.15	295.15	700	504.11	14.27
24	363.15	403.15	295.15	500	465.98	13.24
25	363.15	393.15	295.15	700	511.69	14.48
26	363.15	393.15	295.15	500	453.67	12.88
27	363.15	393.15	295.15	400	398.14	11.32
28	353.15	413.15	295.15	1300	653.37	17.65
29	353.15	413.15	295.15	1000	595.78	16.15
30	353.15	413.15	295.15	700	540.11	14.70
31	353.15	403.15	295.15	1000	601.10	16.29
32	353.15	403.15	295.15	700	524.61	14.27
33	353.15	403.15	295.15	500	484.93	13.24
34	353.15	393.15	295.15	700	532.50	14.48
35	353.15	393.15	295.15	500	472.12	12.88
36	353.15	393.15	295.15	400	414.33	11.32
37	383.15	413.15	299.15	1300	559.88	17.12
38	383.15	413.15	299.15	1000	508.59	15.61
39	383.15	413.15	299.15	700	454.93	14.03

APP. 4. (continued)

Design No	T_{1b} (K)	T_{2d} (K)	T_{2c} (K)	P_{2d} (kPa)	E_{net} (MWh)	η
40	383.15	403.15	299.15	1000	512.77	15.74
41	383.15	403.15	299.15	700	444.56	13.70
42	383.15	403.15	299.15	500	400.92	12.39
43	383.15	393.15	299.15	700	451.00	13.89
44	383.15	393.15	299.15	500	392.84	12.14
45	383.15	393.15	299.15	400	342.94	10.61
46	373.15	413.15	299.15	1300	584.82	17.12
47	373.15	413.15	299.15	1000	531.24	15.61
48	373.15	413.15	299.15	700	475.19	14.03
49	373.15	403.15	299.15	1000	535.61	15.74
50	373.15	403.15	299.15	700	464.36	13.70
51	373.15	403.15	299.15	500	418.77	12.39
52	373.15	393.15	299.15	700	471.09	13.89
53	373.15	393.15	299.15	500	410.34	12.14
54	373.15	393.15	299.15	400	358.21	10.61
55	363.15	413.15	299.15	1300	609.67	17.12
56	363.15	413.15	299.15	1000	553.81	15.61
57	363.15	413.15	299.15	700	495.38	14.03
58	363.15	403.15	299.15	1000	558.37	15.74
59	363.15	403.15	299.15	700	484.09	13.70
60	363.15	403.15	299.15	500	436.56	12.39
61	363.15	393.15	299.15	700	491.10	13.89
62	363.15	393.15	299.15	500	427.77	12.14
63	363.15	393.15	299.15	400	373.43	10.61
64	353.15	413.15	299.15	1300	634.46	17.12
65	353.15	413.15	299.15	1000	576.33	15.61
66	353.15	413.15	299.15	700	515.52	14.03
67	353.15	403.15	299.15	1000	581.07	15.74
68	353.15	403.15	299.15	700	503.78	13.70
69	353.15	403.15	299.15	500	454.32	12.39
70	353.15	393.15	299.15	700	511.07	13.89
71	353.15	393.15	299.15	500	445.17	12.14
72	353.15	393.15	299.15	400	388.62	10.61
73	383.15	413.15	303.15	1300	540.11	16.50
74	383.15	413.15	303.15	1000	486.68	14.93
75	383.15	413.15	303.15	700	432.59	13.33
76	383.15	403.15	303.15	1000	494.56	15.17
77	383.15	403.15	303.15	700	421.32	12.97
78	383.15	403.15	303.15	500	373.09	11.53

APP. 4. (continued)

Design No	T_{1b} (K)	T_{2d} (K)	T_{2c} (K)	P_{2d} (kPa)	E_{net} (MWh)	η
79	383.15	393.15	303.15	700	427.05	13.14
80	383.15	393.15	303.15	500	364.81	11.26
81	383.15	393.15	303.15	400	313.46	9.69
82	373.15	413.15	303.15	1300	564.16	16.50
83	373.15	413.15	303.15	1000	508.36	14.93
84	373.15	413.15	303.15	700	451.86	13.33
85	373.15	403.15	303.15	1000	516.58	15.17
86	373.15	403.15	303.15	700	440.08	12.97
87	373.15	403.15	303.15	500	389.70	11.53
88	373.15	393.15	303.15	700	446.07	13.14
89	373.15	393.15	303.15	500	381.06	11.26
90	373.15	393.15	303.15	400	327.42	9.69
91	363.15	413.15	303.15	1300	588.13	16.50
92	363.15	413.15	303.15	1000	529.96	14.93
93	363.15	413.15	303.15	700	471.06	13.33
94	363.15	403.15	303.15	1000	538.53	15.17
95	363.15	403.15	303.15	700	458.78	12.97
96	363.15	403.15	303.15	500	406.26	11.53
97	363.15	393.15	303.15	700	465.03	13.14
98	363.15	393.15	303.15	500	397.25	11.26
99	363.15	393.15	303.15	400	341.33	9.69
100	353.15	413.15	303.15	1300	612.05	16.50
101	353.15	413.15	303.15	1000	551.51	14.93
102	353.15	413.15	303.15	700	490.21	13.33
103	353.15	403.15	303.15	1000	560.43	15.17
104	353.15	403.15	303.15	700	477.44	12.97
105	353.15	403.15	303.15	500	422.78	11.53
106	353.15	393.15	303.15	700	483.94	13.14
107	353.15	393.15	303.15	500	413.41	11.26
108	353.15	393.15	303.15	400	355.21	9.69
109	383.15	413.15	309.15	1300	520.34	15.88
110	383.15	413.15	309.15	1000	463.42	14.20
111	383.15	413.15	309.15	700	404.24	12.44
112	383.15	403.15	309.15	1000	470.67	14.42
113	383.15	403.15	309.15	700	391.72	12.05
114	383.15	403.15	309.15	500	342.78	10.58
115	383.15	393.15	309.15	700	401.10	12.34
116	383.15	393.15	309.15	500	335.93	10.37
117	383.15	393.15	309.15	400	285.34	8.82

APP. 4. (continued)

Design No	T_{1b} (K)	T_{2d} (K)	T_{2c} (K)	P_{2d} (kPa)	E_{net} (MWh)	η
118	373.15	413.15	309.15	1300	543.52	15.88
119	373.15	413.15	309.15	1000	484.06	14.20
120	373.15	413.15	309.15	700	422.24	12.44
121	373.15	403.15	309.15	1000	491.63	14.42
122	373.15	403.15	309.15	700	409.16	12.05
123	373.15	403.15	309.15	500	358.04	10.58
124	373.15	393.15	309.15	700	418.96	12.34
125	373.15	393.15	309.15	500	350.89	10.37
126	373.15	393.15	309.15	400	298.04	8.82
127	363.15	413.15	309.15	1300	566.61	15.88
128	363.15	413.15	309.15	1000	504.63	14.20
129	363.15	413.15	309.15	700	440.18	12.44
130	363.15	403.15	309.15	1000	512.52	14.42
131	363.15	403.15	309.15	700	426.55	12.05
132	363.15	403.15	309.15	500	373.26	10.58
133	363.15	393.15	309.15	700	436.76	12.34
134	363.15	393.15	309.15	500	365.80	10.37
135	363.15	393.15	309.15	400	310.71	8.82
136	353.15	413.15	309.15	1300	589.65	15.88
137	353.15	413.15	309.15	1000	525.14	14.20
138	353.15	413.15	309.15	700	458.08	12.44
139	353.15	403.15	309.15	1000	533.36	14.42
140	353.15	403.15	309.15	700	443.89	12.05
141	353.15	403.15	309.15	500	388.43	10.58
142	353.15	393.15	309.15	700	454.52	12.34
143	353.15	393.15	309.15	500	380.68	10.37
144	353.15	393.15	309.15	400	323.34	8.82

Araştırma Makalesi – Research Article

Enerji Tüketiminde Optimizasyon İçin Temel Hareket Analizi Kullanılarak Yeni Bir Pompa Dişlisinin Geliştirilmesi

Development of a New Pump Gear via Basic Motion Analysis for Optimization of Energy Consumption

Burak ÖZTÜRK^{1*}, Özkan KÜÇÜK²

Geliş / Received: 19/04/2019

Revize / Revised: 15/05/2019

Kabul / Accepted: 16/05/2019

Öz- Endüstride; benzin, mazot, kimyasallar ve farklı tip yağların aktarılması için çeşitli tipte pozitif deplasmanlı dişli pompalar yaygın olarak kullanılmaktadır. Dişli pompalar transfer setlerinde asenkron motordan tahrik olarak yakıt transferini sağlamakta olup, bu işlem sırasında bir enerji sarfiyatında bulunmaktadır. Bu pompaların, içten dişli, paletli ve helis dişli pompalar olmak üzere farklı tipte üretimi yapılabilmektedir. Bunların ortak özelliği, akaryakıtı, zemin seviyesinin altına yerleştirilen depodan emerek yüksek seviyelere aktarabilesidir. Pompalar endüstride harcanan enerji sarfiyatının önemli bir kısmını kapsamaktadırlar. Sürdürülebilir üretim uygulamalarının geliştirilmesi için optimum seviyede enerji tüketimiyle akaryakıt transferi, sektörün başlıca misyonudur. Bu kapsamda yurt dışında üretim yapan bir dişli pompa, tersine mühendislik yöntemi ile modellenmiştir. Elde edilen bu tasarımın imalatı diş içerisinde bulunan palet montajı yüzünden çok zordur. Üretim maliyetleri piyasada rekabet gücünü düşürmektedir. Bu yüzden yazarlar bu dişli geometrisini temel hareket analizi yöntemi ile geliştirerek yeni bir endüstriyel tasarım ortaya koymuşlardır. Geliştirilen bu tasarım düşük enerji tüketimi ile maksimum miktarda yakıt transferi ve emiş gücüne sahip olduğu belirlenmiştir. Günlük 100 ton kapasitesi olan bir akaryakıt transfer sisteminde belirlenen devir sayısında ve dişli tasarımı ile yıllık 3506 kWh enerji tasarrufu sağlanabilecektir. Anova Varyans analizi sonucunda, motor devir sayısındaki değişimlerinin, enerji tüketimi ve debi miktarını %94-95 oranında etkilediği gözlemlenmiştir. Dişli pompa için ise minimum enerji tüketiminin, asenkron motorda 500-600 RPM aralığında olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler- Dişli Pompa, Temel Hareket Analizi, Endüstriyel Tasarım, Enerji Tüketimi

Abstract- Various types of positive displacement gear pumps are widely used for the transfer of petrol, diesel, chemicals and different types of liquid. The gear pump provides transfer of the fuel by transferring the asynchronous motor on the transfer kits, and it is in an energy expenditure during this process. These pumps can be produced in different types including internal gear, pellet and helical gear pumps. Their common feature is that the fuel can be transported to higher levels by sucking the reservoir placed below the ground level. Achieving energy consumption and fuel transfer at the optimum level for the development of sustainable production practices is the industry's main mission. In this context, a gear pump which is produced abroad is modeled by reverse engineering method. The manufacturing of this design is very difficult because of the pallet assembly in the tooth. Production costs reduce competitive power in the market. Therefore, the authors have developed a new industrial design by developing this gear geometry through basic motion analysis method. This design has been determined to have the maximum amount of fuel transfer and suction power with low energy consumption. A fuel-transfer system with a daily capacity of 100 tonnes will provide 3506 kWh of annual energy savings with the specified speed and gear design. Anova variance analysis applied on the calculated frame rate of 94-95% effect considering the energy consumption rate has been observed that the act of changing the engine speed and the amount of flow. Gear pump is determined that the minimum energy consumption at 500-600 RPM induction motor speed range.

Keywords- Gear Pump, Basic Motion Analysis, Industrial Design, Energy Consumption

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: burak.ozturk@bilecek.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-1018-6545>)

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Bilecik Şeyh Edebali Üniv, Gülümbe Kampüsü, Merkez, Bilecik

²İletişim: ozkan.kucuk@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-4337-4454>)

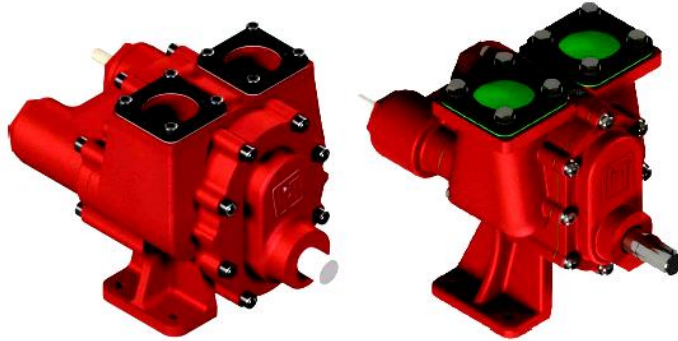
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Bilecik Şeyh Edebali Üniv, Gülümbe Kampüsü, Merkez, Bilecik

I. GİRİŞ

Dişli pompalar, akaryakıtı, endüstriyel yağları ve çeşitli akışkan ürünleri transfer etmek için endüstride kullanılır [1]. Kavitasyon etkisi nedeniyle gövde ve dişliler yüksek basınç altında olabilir. Güvenlik katsayıları ve pompanın ekonomik ömrü tasarımı önemli kriterler olup, üretim maliyetlerini minimize etmek, üretim endüstrileri için vazgeçilmezdir. Gövde genişliği, vida çapı ve dişli pompanın ağırlığı, tasarım parametrelerini optimize etmek için çalışılmıştır [2]. Bir çalışmada, bir dişli pompasının debisini hesaplamak için bir denklem önerilmiştir. Dişli tasarımı için kullanılan evolvent eğrisi için yeni bir formül tanımlanmıştır [3]. Çeşitli tipte pozitif deplasman pompaları değerlendirilmiş ve dişli pompaların avantaj ve dezavantajları analiz edilmiştir [4]. Yakıt ve yağ transfer etmek için kullanılan pompalar çeşitli bağlantı tipleri ile uygulanır. Yakıt tankerlerinde kullanılan pompalar, motordan güç alan bir şafttan beslenir. Bu tip uygulamada, pompanın ağırlığı ve boyutları çok önemlidir. Transfer setlerinde ise, güç asenkron motorla üretilir. Bir litre sıvı transfer etmek için pompanın harcadığı enerji büyük önem taşımaktadır. Pompaların enerji tüketimlerinin azaltılmasına yönelik yapılan araştırmalar, literatürde enerji tasarrufu çalışmalarının önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Amerikan hidrolik enstitüsü'nün araştırmasına göre gelişmiş ülkelerde pompaların tükettiği enerji, toplam tüketimin % 20'sidir. Bu enerjinin % 30'unun uygun pompa seçimi ve iyi bir sistem tasarımı ile tasarruf edilebileceği belirtilmektedir [5]. Yumurtacı ve Sarıgül 2011'de yaptıkları çalışmalarında, enerji tasarrufunun, elektrik enerjisini yoğun olarak kullanan pompa sistemlerinde nasıl yapılabileceğini açıklamaya çalışmışlardır [6]. Saqib ve Khan'ın (1993) çalışması, kapsamlı bir retrofit ve onarım programı ile toplam verimliliğin ortalama % 65'e yükseltilmesi ile ilgilidir. Tahmini enerji kullanımında yaklaşık 4-8 milyon kWh'lik toplam enerji tasarrufu yapılabilir [7]. Üretimde maliyetlerin azaltılması ve sürdürülebilirlik için enerji tasarrufu ile ilgili yapılan araştırmaların günümüzde önemi artmıştır [8,9]. Enerji ihtiyacının gün geçtikçe artış göstermesi ve enerji üretiminin yeterli düzeyde sağlanamaması günümüzde büyük bir sorun haline gelmiştir [9-10]. Bununla birlikte önemli oranda artan üretim ve ortaya çıkan enerji ihtiyacı; çevre kirliliğini artırarak iklim değişikliklerini ortaya çıkarmıştır [10-11]. Sürdürülebilir üretim uygulamalarının geliştirilmesi sanayi kuruluşlarının ekonomik olarak ve çevresel performanslarını artırmalarına imkân sağlamaktadır. Endüstri ürünlerinin elektrik sarfiyatlarını azaltmak ve çevre dostu üretimi gerçekleştirmek için tedbirlerin araştırılması üretim süreçleri için büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda minimum elektrik sarfiyatı ile maksimum debide yakıt transferi yapabilen pompaların geliştirilmesiyle sürdürülebilirlik sağlanabilecektir. Bu amaç doğrultusunda, yurt dışında üretim yapan bir dişli pompa üretim kuruluşuna ait olan dişli tasarımı, katalog üzerinden resim taraması ile tersine mühendislik yöntemi ile modellenmiştir. Elde edilen bu tasarımın imalatı dış içerisinde bulunan palet montajı yüzünden çok zordur. Üretim maliyetleri piyasada rekabet gücünü düşürmektedir. Bu çalışmada yazarlar, temel hareket analizi yöntemi ile bu tasarımın kinematik çalışma modelini oluşturmuşlardır. Sonrasında yeni bir paletsiz sistem geliştirmişlerdir. Son olarak ise dişli, daha önce geliştirdikleri bir pompa gövdesi tasarım ölçülerinde üretilmiştir [1]. Yazarlar daha önce geliştirdikleri bu pompa dişlisi ile geliştirilen dişli tasarımının enerji tüketim ve debi değişimlerini; Ar-Ge faaliyetlerini destekleyen kuruluşun test düzeneğinde karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir.

II. HELİS DİŞLİ POMPALARDA KIYASLAMA ANALİZİ SONUCUNDA YENİ BİR ÜRÜN TASARIMI (İLK PROTATİP)

Yazarlar akaryakıt transfer sistemlerinin üretimini yapan bir endüstriyel kuruluşun Ar-Ge ekibiyle birlikte daha önce yaptıkları çalışmada optimum tasarım özelliklerine sahip bir helis dişli pompa geliştirmişlerdir [1]. Bu içten dişli pompanın, hacmi tanker şasesi bağlantısına sığacak ölçülerde ve montaj kolaylığı için minimum ağırlıkta tasarımı geliştirilmiştir. Çalışmada yapılan analizlere göre, aynı enerji tüketimi ile dolum kapasitesi 400 litre/dk debiden 600 litre/dk debiye çıktığı gözlemlenmiştir (Şekil 1.).



Şekil 1. Kıyaslama sonunda tasarlanan pompa (solda) ve Er 1214-D tasarımı (sağda)

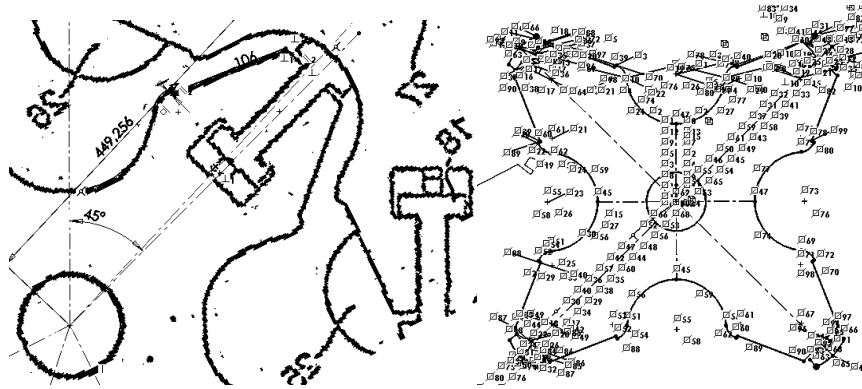
Yazarlar tarafından endüstriyel kuruluşun test düzeneğinde 1 ton yakıt aktarımı için gerekli olan enerji tüketimi diğer ürünler ile karşılaştırmalı olarak incelenerek enerji verimliliği ölçülmüş ve Tablo 1’deki sonuçlar alınmıştır [12-15]. Yazarlar, Şekil 1’deki (solda) tasarımın dişli sistemini geliştirerek daha yüksek debide ve daha düşük enerji tüketimi ile yakıt transferini sağlamışlardır (İlk Protatip).

Tablo 1. Çeşitli pompa enerji tüketimlerinin karşılaştırılması [1]

Pompa Tipi	Debi (L/dk)	Güç (kW)	Enerji Tüketimi (Wh/Ton)
Z11	18,720	4,3	229,70
Z 17	28,920	7,1	245,50
YHL	32,400	11,0	339,50
SG-1436	23,520	15,0	637,75
Er 1214 D	24,000	7,5	312,50
İlk Protatip	36,000	7,9	219,44

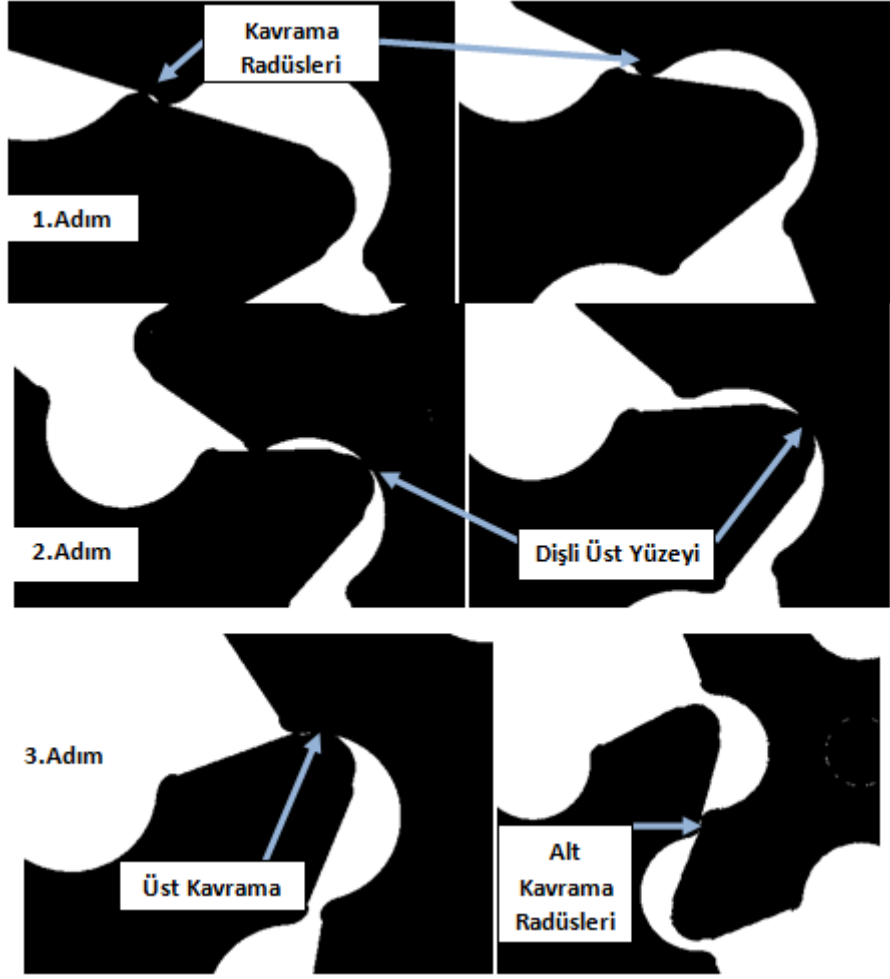
III. TEMEL HAREKET ANALİZİ İLE TASARIM GELİŞTİRME (YENİ PROTATİP)

Yazarların daha önce geliştirdiği sessiz çalışan ve kavitasyon oranı düşük olan bir pompa gövdesi kullanılarak bu makalede enerji tüketim verimliliği için yeni bir dişli sistemi geliştirilmek istenmiştir. Bu nedenle Amerika’da seri üretimi yapılan bir dişli sistemi incelenmiştir (Şekil 2) [16]. Bu uluslararası patente sahip tasarım geometrisinin imalatı çok zor ve maliyetlidir. Ayrıca bu sistemin özelliği palet sistemine sahip iç dişin emme özelliğini artırmak için yaylanma özelliğidir. Bu üretim maliyetlerini azaltmak ve yeni bir endüstriyel tasarım geliştirmek için palet tasarımı yerine kinematik analiz ile revize edilen yeni bir tip endüstriyel tasarım bu makalede modellenmiştir. Dişliler evolvent eğrilerine göre tasarım yapılan makine elemanlarıdır. Evolvent eğrileri ile dişlilerin; sürtünme miktarı minimum olması için belirlenen bazı unsurlara göre tasarımı yapılır. On dişin altında bu eğrilerin kullanımı uygun değildir. Dixon Pompa tasarım modeli dört dişe sahiptir. Bu tasarımın yapılması için kinematik çalışma modeli oluşturulan dişlilerin minimum sürtünme miktarı için ideal diş formunun çizimi gereklidir. Böylelikle bu tasarım bir palet olmadan çalışabileceği düşünülmüştür. Yazarlar ilk olarak ürün katalog resmini tersine mühendislik yöntemi ile Solid Works 2018 programında katı modele dönüştürmüşlerdir (Şekil 2).



Şekil 2. Dixon Pompa dişli çifti teknik resmi (solda) tasarım geometrisinin kopyalanması (sağda) [16].

Bu katı modele dönüştürülen tasarımın kinematik çalışma modeli Solid Works temel hareket analizi sekmesinde oluşturulmuştur. Her iki dişli birbirine kontaklı olarak programda tanımlanmıştır. 3 farklı adım için temel hareket incelenmiştir. 1.Adımda pompa akaryakıtı emiş yapmaya başlamıştır. Tasarlanan yeni dişli sisteminde diğerinden farklı olarak dişli yanak yüzeylerinden kavrayacak bir radüs tasarımı oluşturulmuştur. Bu tasarım şekli sayesinde pompada vakum özelliği artırılmak istenmiştir. Ayrıca dişliler dönme hareketini yaparken minimum alan teması ile dişliler arasındaki sürtünme azaltılmak istenmiştir. 2.Adımda dişli üst yüzeyi diğer dişli ile dönüş hareketini tamamlarken, vakum özelliğini devam ettirmektedir. Aynı zamanda dişli akaryakıtı bu aşamada pompalamaya ve basınç oluşturmaya başlamaktadır. 3.Aşamada sırası ile dişlinin alt kavrama radüsü diğer dişli üst yüzeyi ile birlikte kontak kurarak akaryakıtın transferini tamamlar ve sonrasında alt kavrama radüsleri dişli yanak yüzeyinde vakum yaparak emişe başlar.



Şekil 3. Farklı eme basma konumlarında temel hareket analizi ile dişli eğrilerin şekillendirilmesi

Bu aşamada çok sayıda farklı geometriye sahip dişli tasarımı yapılmıştır ve temel hareket analizi uygulanarak temas yüzeyleri incelenmiştir. İdeal tasarım geometrisi belirlenirken bu radüslerin düz yanak yüzeyleri ile yaptığı sürtünme hareketinin minimum yüzey kontağı ile yapılmasına dikkat edilmiştir. Amerika'da üretimi yapılan bir dişli takımından esinlenerek imalatı kolay ve emiş gücü yüksek yeni bir tür dişli tasarımı elde edilmiştir. Yazarların daha önce geliştirdikleri helis dişli ile birlikte karşılaştırmalı olarak bu dişli setinin; yakıt transferi sırasında debi miktarı ve enerji tüketimi ölçümü yapılmıştır.

IV. MATERYAL VE METOT

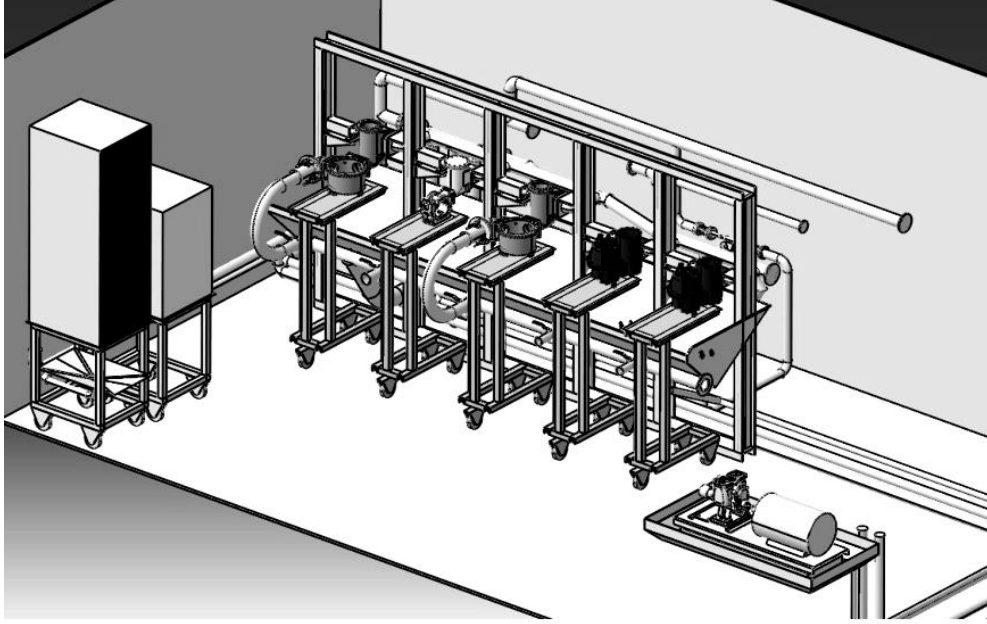
Farklı motor devir sayıları için (100-800 RPM) her iki dişli tipi montajında debi ve akım indeksleri ölçümü toplam on altı farklı deney ile yapılmıştır (Tablo 2.). Her deney iki kez tekrarlanmış ve sonuçların ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

Tablo 2. Deney tasarımı

Dene y No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Devir	100	200	300	400	500	600	700	800	100	200	300	400	500	600	700	800
Dişli Tipi	Düz Dişli	Düz Dişli	Düz Dişli	Düz Dişli	Düz Dişli	Düz Dişli	Düz Dişli	Düz Dişli	Helis Dişli	Helis Dişli	Helis Dişli	Helis Dişli	Helis Dişli	Helis Dişli	Helis Dişli	Helis Dişli

IPT Akaryakıt kuruluşuna ait transfer ünitesi ölçüm seti ile pompaların farklı devirler için toplam transfer debisi ölçümü enerji tüketimi değerleri ile birlikte karşılaştırmalı olarak incelenebilmektedir. Ayrıca hareketin sağlandığı inverter ve ampermetre montajlı asenkron motor test düzeneğinde yer almaktadır.

Belirlenen deney tasarımı şartları altında mazot transferi gerçekleştirilerek anlık akım indeksleri (PI) ve dakikada transfer edilen mazot miktarı ölçülmüştür.



Şekil 4. Akaryakıt transfer seti debi ve enerji tüketimi ölçüm test düzeneği

Akaryakıt transferi sırasında ampermetre ile asenkron motor inverterinin çektiği güç indeksi (PI) ölçümü 1 numaralı 3 fazlı motor enerji güç dönüşüm denklemiyle güç tüketimine dönüştürülmektedir [17]. $\cos \alpha$ değeri test ünitesi asenkron motoru için 0,85'dir. Bir saat süre içinde toplam enerji tüketimi, toplam transfer edilen akaryakıt miktarına bölünerek 1 litre akaryakıt transferi için gerekli olan enerji tüketimi bulunmaktadır (Eşitlik 2.). Bu hesaplamalar pompalar için 1 ton akaryakıt transferi için gerekli enerji tüketimi olarak ifade edilmektedir [1].

$$P_{transfer} = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \sigma \quad (1)$$

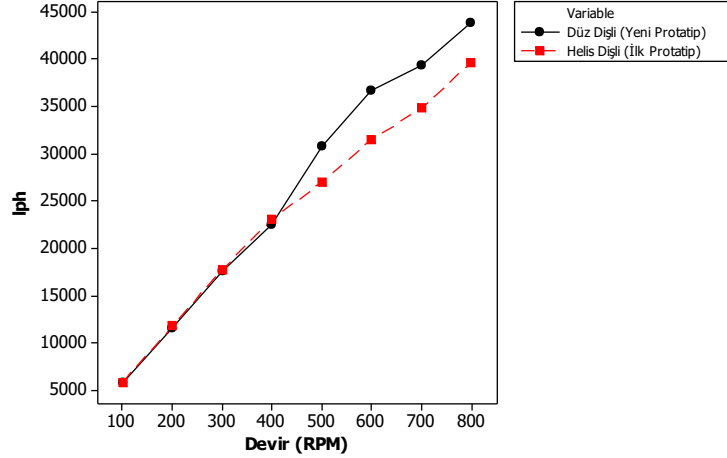
$$SEC = \frac{P_{transfer} (Wh)}{Debi \left(\frac{litre}{saat} \right)} \quad (2)$$

V. SONUÇLAR

Deney setinde helis dişli ve düz dişli çifti aynı gövde içerisinde akaryakıt transferi, farklı motor devir sayıları için uygulanmıştır. Tablo 3'de bu farklı devir sayıları için 1 dakikada toplam transfer edilen akaryakıt miktarları yer almaktadır. Şekil 5' de ise her iki dişli çiftinin saatlik akaryakıt transfer miktarı değişim grafiği verilmiştir.

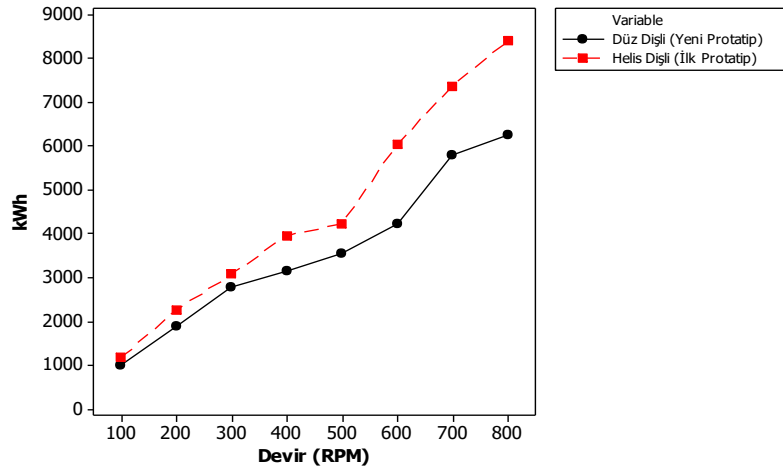
Tablo 3. Akaryakıt transfer seti farklı devir sayıları için debi değişimleri

Deney No	Dişli Tipi	Devir (Devir/dk)	Debi (L/dk)	Deney No	Dişli Tipi	Devir (Devir/dk)	Debi (L/dk)
01	Düz Dişli	100,0	97,0	09	Helis Dişli	100,0	97,0
02	Düz Dişli	200,0	193,0	10	Helis Dişli	200,0	196,0
03	Düz Dişli	300,0	292,0	11	Helis Dişli	300,0	295,0
04	Düz Dişli	400,0	374,0	12	Helis Dişli	400,0	385,0
05	Düz Dişli	500,0	514,0	13	Helis Dişli	500,0	450,0
06	Düz Dişli	600,0	612,0	14	Helis Dişli	600,0	525,0
07	Düz Dişli	700,0	656,0	15	Helis Dişli	700,0	580,0
08	Düz Dişli	800,0	730,0	16	Helis Dişli	800,0	661,0



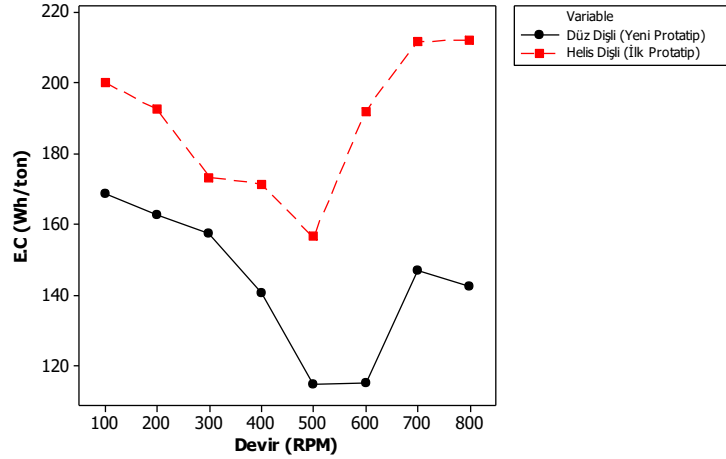
Şekil 5. Akaryakıt transfer seti saatlik debi ölçümü

Düz dişli çiftinin helis dişli pompa tasarımından daha fazla miktarda akaryakıt transferi sağladığı gözlemlenmiştir. Helis dişlide özellikle 400–500 RPM aralığındaki motor devir sayısından sonra debi miktarı azalmıştır. Düz dişlide ise aynı performansı sergileyerek bu devir aralığından sonra helis dişli çiftinden daha fazla miktarda akaryakıt transferi sağlamıştır. Yüksek devir sayılarında düz dişli çiftinin daha hızlı hareketinden dolayı emiş miktarının arttığı düşünülmektedir. Düz dişli pompa geometrisinde üç farklı bölgede yer alan radyal tasarım geliştirilerek pompa emiş gücü ve transfer kapasitesi artırılmıştır. Akaryakıt transferi sırasında gerekli olan güç; 3 fazlı enerji - güç dönüşüm denklemleri kullanılarak Minitap 18 programında line plot özelliği ile karşılaştırmalı olarak grafik haline getirilmiştir (Şekil 6.). Bu sonuçlara göre yeni geliştirilen düz dişli; helis dişli çiftine göre tüm devirler için, çok daha düşük enerji tüketimi ile akaryakıt transferini sağlayabildiği belirlenmiştir. 300–700 RPM devir sayısı aralığında her iki dişli çifti güç ihtiyacında azalma gözlemlenmiştir. Bu devir aralığında her iki pompanın emiş gücünün arttığı ve kavitasyon miktarının yüksek devirlere göre daha az olduğu düşünülmektedir.



Şekil 6. Akaryakıt transferi sırasında gerekli olan güç

1 ton akaryakıt transferi için harcanan enerji tüketimi miktarı çok önemlidir. Şekil 7’de bu transfer için gerekli olan enerji miktarı Wh/Ton olarak yer almaktadır. 500-600 RPM motor devri için tüketim miktarı her iki dişli çifti için en az değerlere ulaşırken 500 RPM’ den sonra artış gösterdiği söylenebilir. Ayrıca yeni geliştirilen dişli tasarımı çok daha az bir enerji sarfiyatı sergilemiştir.



Şekil 7. 1 ton akaryakıt transferi için gerekli enerji tüketimi

Farklı devir sayılarının ve her iki dişli tipinin debi ve güç ihtiyacına % etkilerini hesaplamak için Minitap 18 programı kullanılmıştır (Tablo 4). Debi ve güç ihtiyacı değişimine en fazla etkili olan parametre devir sayısıdır.

Tablo 4. Anova Varyans analizi sonuçları

	Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Debi (L/dk)	A	7	608013	608013	86859	1668,36	0,000
	B	1	30189	30189	30189	579,86	0,000
	Error	7	364	364	52		
	Total	15	638567				
P _{transfer} (kW)	A	7	67263033	67263033	9609005	96,40	0,000
	B	1	3327888	3327888	3327888	33,38	0,001
	Error	7	697778	697778	99683		
	Total	15	71288700				

VI. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Günümüzde enerji kaynaklarının artırılması, imalat, enerji üretimi ve enerji tüketiminde optimizasyon önemli konu başlıklarını oluşturmaktadır [18-23]. Enerjinin üretimi ne kadar önemli bir konu ise enerjinin verimli kullanımı da aynı oranda önemlidir. Literatürde farklı tip pompalar için yapılan araştırmalarda optimum enerji tüketimi araştırılmıştır [5,6]. Bizde bu makalede, akaryakıt transfer sistemlerinde kullanılan pozitif deplasmanlı pompalardan olan dişli pompaların enerji verimliliğini araştırdık. Akaryakıt transfer sistemleri için bu makalede önerilen spesifik enerji tüketim modeli 1 ton yakıt transferi başına harcanan toplam enerjiyi ifade etmektedir. Her iki pompada da 500 RPM motor devrine kadar enerji tüketiminde bir azalma gözlemlenmiştir. 500-600 RPM motor devrinden sonra bu tüketim artış göstermiştir. Akaryakıt sistemleri için minimum enerji tüketimi ile maksimum debide yakıt transferi için ideal asenkron motor devri 500 RPM olduğu belirlenmiştir. Akaryakıt test düzeneğinde 114,6 Wh/Ton olarak minimum enerji gereksinimi hesaplanırken 212 Wh/Ton en yüksek enerji sarfiyatı gözlemlenmiştir. Her iki değer arasında %54'lük bir büyük oransal fark bulunmaktadır.

Günlük 100 ton kapasitesi olan bir akaryakıt transfer sisteminde belirlenen devir sayısında ve dişli tasarımı için aylık 292,2 kWh enerji tasarrufu sağlanabilecektir. Anova Varyans analizi %1' den daha az bir hata oranıyla yapılmıştır. Parametrelerin % etki oranı dikkate alındığında %94-95 oranlarında enerji tüketimi ve debi miktarına devir değişimlerinin etki ettiği gözlemlenmiştir. Roper Pompa 229,7–245,5 Wh/Ton ve Viking Pompada ise 637,7 Wh/Ton enerji sarfiyatı yapmaktadır. İlk prototip olarak geliştirilen helis dişli pompa ise 219,4 Wh/Ton enerji sarfiyatı ile akaryakıt transferi yapmaktadır. Bu çalışmada tasarladığımız, Düz dişli pompa ise 145Wh/Ton enerji sarfiyatı ile dakikada 695 L/s akaryakıt transferi sağlamaktadır. Bu makalede yurt dışında üretilen bir dişli tasarım geometrisinden esinlenerek tersine mühendislik ve temel hareket analizi ile yeni bir dişli tasarımı geliştirilmiştir. Bu tasarım geometrisi ile pompa emiş gücü ve saatlik debi kapasitesi artırılırken enerji tüketiminde optimizasyon sağlanmıştır.

TEŞEKKÜRLER

Bu araştırmaya destek ve katkıları için IPT (İşmet Pompa Teknolojileri) Yakıt Ekipmanları Petrol Kimya Sanayi ve Ticaret Limited Şirketine teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- [1] Düzdar, A. İ., Kantoğlu, B., & Öztürk, B. (2018). A New Product Design After Benckmarking Analysis Of Helis Gear Pumps And Optimization In Energy Consumption. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6, 610-617.
- [2] Çelik, H. K., Uçar, M., & Cengiz, A. (2007). Yüksek Basınçlı Dişli Pompalarda Gövdenin Parametrik Tasarımı, Gerilme Analizi ve Optimizasyonu, *Mühendis ve Makina*, 576(49), 15-24
- [3] Öven, V., & Boğoçlu, M. E., (2014). Dişli Pompalarda Debi Hesaplamaları ve Tasarım Parametreleri, *Mühendis ve Makina*, 660(56), 34-40.
- [4] Çalışkan, H. Ç., & Ekmekçi, İ. (2003). Pozitif Deplasmanlı Pompalar. *SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 7(1), 206-212.
- [5] Ertöz, A. Ö. (2003). Pompalarda Enerji Verimliliği, *Tesisat Dergisi*
- [6] Yumurtacı, Z., & Sarıgul, A. Santrifüj Pompalarda Enerji Verimliliği ve Uygulamaları, 2011, Makina Mühendisleri Odası Tesisat Mühendisliği Dergisi, 49-58 .
- [7] Saqib, G. S., & Khan, S. (1993). Performance evaluation of deep well turbine pumps. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 56(2), 165-175.
- [8] Weinert, K., Inasaki, I., Sutherland J. W., & Wakabayashi, T. (2004). Dry Machining and Minimum Quantity Lubrication. *CIRP Annals* 53(2), 511-537.
- [9] Ingarao, G., Lorenzo D. R. & Micari, F. (2011). Sustainability issues in sheet metal forming processes. an overview. *J. Clean. Prod.* 19(4), 337-347.
- [10] Balogun, V. A., & Mativenga, P. T. (2013). Modelling of direct energy requirements in mechanical machining processes. *J. Clean. Prod.*, 41, 179-186.
- [11] Bhushan, R. K., (2013). Optimization of cutting parameters for minimizing power consumption and maximizing tool life during machining of Al alloy SiC particle composites. *J. Clean. Prod.*, 39, 242-254.
- [12] Viking Pompa “Viking Pump Enerji Tüketimi”, <http://www.vikingpump.com/>
Son erişim tarihi: 01.01.2017
- [13] Yıldız Pompa “Yıldız Pompa Enerji Tüketimi”, <http://www.yildizpompa.com.tr/asp/index.asp?bno=25&uno=255&dil=Tr>
Son erişim tarihi: 01.01.2017
- [14] Roper Pump “Roper Pump Enerji Tüketimi”, <https://www.powerflo.com/product/roper-z11-gear-pump/>
Son erişim tarihi: 01.01.2017
- [15] IPT Akaryakıt Sistemleri “IPT Akaryakıt Sistemleri Enerji Tüketimi”, http://www.ipt.com.tr/Urunler/TR/Er_1214_d-Er_1214_D/17
- [16] Dixon Pump “Dixon Pump Tasarım Geometrisi”, <http://fluid-management.dixonpumps.com/viewitems/all-categories/positive-displacement-pumps>
Son erişim tarihi: 01.01.2017

- [17] Shokoohi, Y., Khosrojerdi, E., & Shiadhi R. (2015). Machining and ecological effects of a new developed cutting fluid in combination with different cooling techniques on turning operation. *Journal of Cleaner Production*, 94, 330-339
- [18] Nas, E., & Öztürk, B. (2018). Optimization of surface roughness via the Taguchi method and investigation of energy consumption when milling spheroidal graphite cast iron materials. *Mater Test*, 60, 519-524.
- [19] Öztürk, B., Küçük, Ö., Düzdar, İ., & Altınbilek Y. S. (2017). Exploring the economical reasons of the usage of unhealthy & low resisting far-east products in the water pipe systems, *The Turkish Journal Of Occupational / Environmental Medicine and Safety*, 2 (3), 60-72.
- [20] Dokur, E., Gökhasan, O., Örs, O., & Kurban, M. (2016). Ulaşım Sistemlerinde Titreşim Tabanlı Enerji Hasadı ve Uygulamalı Analizi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 1 (1), 52-58.
- [21] Erbaş, O., Topal, H., Şentürk A., M., & Arslan, O. (2017). Akışkan Yatakta Rejim Bölgesinin Isı Transferine Etkisi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 4, 24-27
- [22] Kara, F., & Öztürk, B. (2019). Comparison and optimization of PVD and CVD method on surface roughness and flank wear in hard-machining of DIN 1.2738 mold steel, *Sensor Review*, 39,(1), 24-33.
- [23] Kara, F. (2018). Optimization of surface roughness in finish milling of AISI P20+ S plastic-mold steel. *Mater. Technol.* 52, 195-200.

Araştırma Makalesi - Research Article

IEC62305-2'ye Göre Yıldırım Risk Analizi: Hakkâri Üniversitesi Örneği

Lightning Risk Analysis According to the IEC62305-2: A Case of Hakkari University

Ali ERDUMAN^{1*}, Fikret YILDIZ²

Geliş / Received: 07/05/2019

Revize / Revised: 23/05/2019

Kabul / Accepted: 24/05/2019

Öz- Bu çalışmada IEC62305-2 standart kullanılarak risk analizi ve koruma sisteminin risk değeri üzerine etkisi araştırılmıştır. Örnek model olarak nüfus yoğunluğu açısından yükselen potansiyele sahip olan Hakkâri Üniversitesi modeli ele alınmıştır. Korunma sisteminin bulunması durumunda risk değerinin, koruma sistemlerinin bulunmadığı duruma göre önemli oranda azaldığı gözlenmiştir. LPD (Yıldırım koruma sistemi) ve SPD (Parafudr) sistemlerinin insanların hayat güvenliği için son derece önemli olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler- IEC62305-2, Yıldırım, Risk Analizi

Abstract- This paper studies the risk analysis and effects of protection systems on risk management based on IEC62305-2. Hakkari University was used as a case study for risk analysis due to potential on increasing population growth. It was shown that protection system (LPD and SPD) is significantly reduced risk value. Consequently, it is understand that protective system are important system to reduces risk of human life.

Keywords- IEC62305-2, Lightning, Risk Analysis

I. GİRİŞ

Yıldırım kaynaklı ölümler ve ciddi yaralanmalar dünyada üzerinde sıkça rastlanmaktadır. Ölüm ve yaralanmalara ek olarak ekonomik olarak da zarara sebep olmaktadır [1]–[3]. Türkiye'deki yıldırım kaynaklı zararlar göz önünde bulundurulduğunda her yıl 400 kişinin yıldırımdan dolayı öldüğü tahmin edilmektedir [3]–[5]. Franklin çubuğu ve Faraday kafesi yöntemleri uzun yıllardan beri insan nüfus yoğunluğunun fazla olduğu binaları, hastaneleri, okulları vb. yapıları yıldırımdan korumak için kullanılmaktadır [6], [7]. Bu tip yapıların içinde ve yapıya dışarıdan giren (Örneğin Telekom kabloları) karmaşık elektronik sistemlerinde yıldırımdan korunması gerekmektedir. Kapalı alanlara ek olarak, askerler, çiftçiler ve çobanlar açık alanda bir çok kez yıldırıma maruz kalmaktadırlar. Yıldırımın oluşturduğu zarar nüfus yoğunluğuna, bölgeye, sezona vb. etkilere bağlı olmasına rağmen, günümüz teknolojisi yıldırımın tespiti ve oluşan zararları azaltma konusunda yetersiz kalmaktadır [5], [8]. Bu yüzden yıldırımın sebep olduğu doğrudan veya dolaylı etkileri azaltmak için risk değerlendirme ve yıldırım korunma standartları göz önünde bulundurulmalıdır. Bunların yapılması kayıpların azaltılması, insan, hayvan, binalar ve cihazların güvenliği açısından son derece önemlidir.

Yıldırım riskinin değerlendirilmesinde ve korunma yöntemlerin belirlenmesinde 4 adet standart kullanılmaktadır. Bunlar; IEC 62305-1, IEC 62305-2, IEC 62305-3 ve IEC 62305-4 [2], [9]–[12] olarak sıralanmaktadır. Bu dört standart kısaca özetlenirse; IEC 62305-1 yıldırma karşı insan ve yapılar için genel kuralları tanımlar.

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: alierduman@hakkari.edu.tr, (<https://orcid.org/0000-0003-4116-3159>)

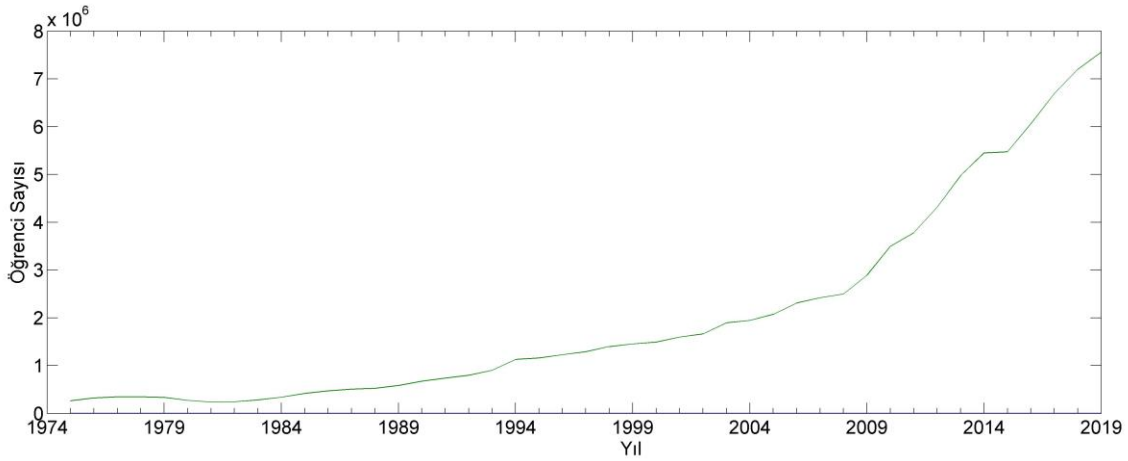
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Hakkâri Üniversitesi, Hakkari, Türkiye

²İletişim: fikretyildiz@hakkari.edu.tr, (<https://orcid.org/0000-0001-6289-2874>)

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Hakkâri Üniversitesi, Hakkari, Türkiye

Ayrıca, yıldırımdan korunma sistemlerinin tasarımı hakkında da bilgi verir. IEC 62305-2 insan kayıplarını, toplum için yapılan hizmet kayıplarını, kültürel miras kayıplarını ve ekonomik kayıpları göz önünde bulundurarak risk yönetiminden bahsetmektedir. IEC 62305-3 ise yapı içinde oluşan fiziksel hasarları azaltmak için gerekli korunma yöntemlerini kapsamaktadır. Son olarak, IEC 62305-4 da yapı içinde bulunan elektrik ve elektronik sistemlerde oluşan zararları azaltmak için gerekli koruyucu sistemlerin tasarımı, tamiri ve testlerini kapsamaktadır.

Üniversite nüfus sayısı her yıl bir önceki yıla göre artma eğilimi göstermektedir [13]. 1974-2019 yılları arasında Türkiye'deki yükseköğretim kurumlarındaki öğrenci sayılarının değişimi Şekil 1'de gösterilmiştir [14],[15]. Yoğun bir insan potansiyeline ve birçok yapıya ev sahipliği yapan üniversite kampüslerinde yıldırımın zarar verebileceği riskli alanlardandır. Bu nedenle üniversite kampüslerinin risk analizinin yapılması insanların ve yapıların korunması için bir zorunluluk haline gelmektedir.



Şekil 1. Yıllara göre üniversite öğrenci sayısı değişimi [14,15]

Bu çalışmada Hakkâri bölgesinde oluşan yıllık yıldırım olayları göz önüne alınarak risk değerlendirilmesi yapılmıştır. Meteoroloji Genel Müdürlüğünden alınan verilere göre Hakkâri Bölgesinde yıllık yıldırım düşme olasılığı düşüktür [5], [16]. Ancak km²'ye düşen yıldırım oranı düşünüldüğünde ciddi sonuçlar ortaya çıkarılabilir. Hakkâri Bölgesi dağlık bir yapıya sahip ve denizden yüksekliği de Türkiye ortalamasının üstündedir. Hakkâri ilindeki yapılar genellikle yıldırımdan koruma tesisatına sahip değil ya da standartlara uygun korunamamaktadırlar. Bu da yıldırım düşmesi durumunda oluşacak zararın boyutunu arttırmaktadır. . Tüm bu nedenlerden dolayı, öğrenci ve çalışan personel sayısı gün geçtikçe artan Hakkâri Üniversitesi'nin farklı koordinatlardaki Rektörlük ve Çölemerik Meslek Yüksekokulu binaları için yıldırım düşmesine karşı mevcut durumunun IEC 62305-2 ye göre risk analizi yapılmış ve ön görülen riskli alanlar için gerekli koruyucu sistemler önerilmiştir.

II. MATERYAL VE METOD

IEC62305 standardı şematik olarak Şekil 2'de gösterilmiştir. Dört bölgeden oluşan standart; birinci olarak IEC62305-1 yıldırımdan korunmanın için genel kuralları, ikinci olarak IEC62305-2 risk yönetimi, üçüncü olarak IEC62305-3 yapılarındaki fiziksel hasarı ve hayati tehlikeleri, son olarak IEC62305-4'de yapılarda bulunan elektrik ve elektronik sistemlerin yıldırıma karşı korunmasının tanımlar. Bu çalışmada sadece IEC62305-2 standardı kullanılarak risk analizi yapılmıştır ve koruyucu sistemler için bir öneride bulunulmuştur. Yıldırım riski, yapıların zarar görme olasılığı ve yıldırım çarpması sonucu oluşan kayıp oranının çarpılması ile hesaplanabilir. IEC62305-2'ye göre 4 çeşit risk ve risk tolerans tanımlaması yapmaktadır. Bunlar Tablo1'de verilmiştir.

Yıldırım risk çeşitleri: (a) yapı içinde bulunan insan kayıp riski (R1), (b) yapı içindeki topluma hizmet için yapılan hizmetlerin kayıp riski (R2), (c) yapı içindeki kültürel miras değer kayıp riski (R3), (d) yapı içindeki ekonomik kayıp riski (R4) olarak tanımlanır. Bu risklere karşılık gelen kayıp oranları da aşağıdaki gibi tanımlanmıştır: (e) insan kaybı (L1), (f) Topluma yapılan hizmet kaybı (L2), (g) Kültürel miras kaybı (L3), (h) Ekonomik kayıp (L4) şeklindedir. Yıldırım riskinin tanımlanması da aşağıda verilmiştir.

I. Yıldırım yapıya düştüğünde oluşan yıldırım riski (S1):

- (a) R_A : Yaşayan canlıların dokunması ve adım voltajlarından dolayı şoklanması
- (b) R_B : Yapı içindeki yangın veya patlama etkisi
- (c) R_C : Elektrik ve elektronik sistemdeki aksamalar

II. Yıldırımın yapının yanına düşmesi sonucu oluşan yıldırım riski (S2):

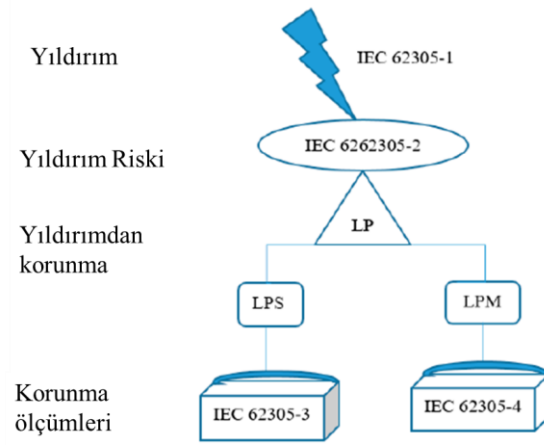
- (a) R_M : Elektrik ve elektronik sistemdeki aksamalar

III. Yıldırımın yapıyla bağlantılı bir noktaya düşmesi sonucu oluşan yıldırım riski (S3):

- (a) R_U : Canlıların dokunması sonucu yaralanması
- (b) R_V : Yapı içindeki yangın etkisi
- (c) R_W : Yapının içinde bulunan sistemlerin aksaması

IV. Yıldırımın yapıyla bağlantılı olan noktaya yakın düşmesi sonucu oluşan yıldırım riski (S4):

- (a) R_Z : Yüksek voltajdan dolayı elektrik ve elektronik sistemde oluşan aksamalar



Şekil 2. Iec62305 standardının tanımlanması

Tablo 1. Yıldırım risk değerlendirilmesi

Risk Türü	S1		S2		S3		S4		Tolerans
	R_A	R_B	R_C	R_M	R_U	R_V	R_W	R_Z	
R1	*	*	*	*	*	*	*	*	10^{-5}
R2		*	*	*		*	*	*	10^{-3}
R3		*		*		*			10^{-3}
R4	*	*	*	*	*	*	*	*	10^{-3}

Risk yönetim formülü de aşağıda tanımlandığı gibidir.

$$R_X = N_X \times P_X \times L_X$$

(1)

Burada R_x : yıldırım riskini, N_x : yıllık yıldırım risk sayısını, P_x : yapıda zarar oluşma olasılığını ve L_x : yıldırım çarpması sonucu oluşan kayıpların oranını tanımlar. Formülde verilen her bir katsayının altındaki x alt indisine ait detaylar IEC62305-2 standardında açıklanmıştır. Burada ilgili detaylar tekrara değinilmemiştir.

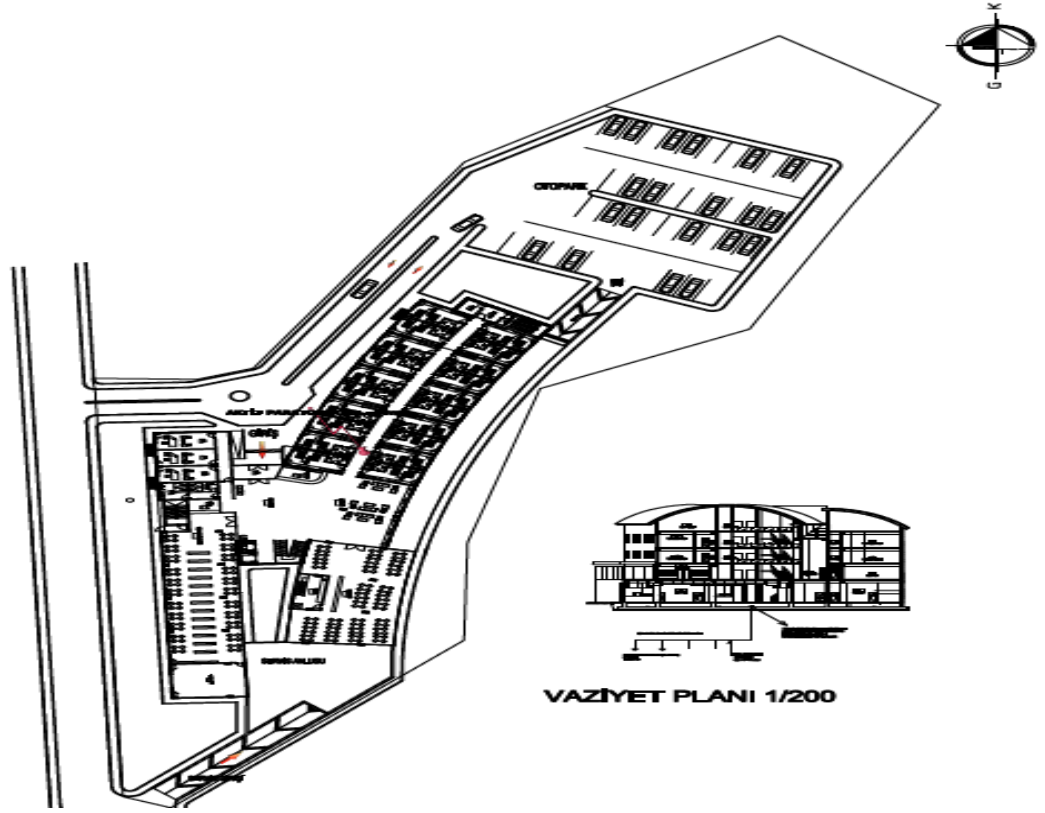
Çalışmada örnek model olarak alınmış olan Rektörlük (Şekil-3) ve Çölemerik Meslek Yüksekokulu (Şekil-4) binaları beş farklı bölgeye (Z1, Z2, Z3, Z4 ve Z5) ayrılmıştır. Risk değerlendirilmesi için kişi sayısı, binada bulunma süreleri, yapı bilgileri ve bölge bilgileri giriş parametresi olarak kabul edilmiştir. Bölge bilgilerine örnek olarak, Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün yayınladığı orajlı gün haritasındaki en yüksek yıldırım düşme yoğunluğu değeri 10 (1/km²/yıl) olarak kabul edilmiştir [17]. IEC62305-2 standartları altında risk değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu binalar ile ilgili gerekli bilgiler Tablo 2, Tablo 3, Tablo 4 ve Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 2. Rektörlük binası: kişilerin bölgelere göre dağılımı

Bölge	Tanımı	Kişi sayısı	Bulunma süresi (Saat/kişi)
Z1	Dış Giriş Alanı	4	8760
Z2	Dış Bahçe	2	8760
Z3	Arşiv	56	8760
Z4	Ofisler	110	2088
Z5	Bilgisayar Merkezi	0	8760

Tablo 3. Rektörlük binası bölge bilgileri

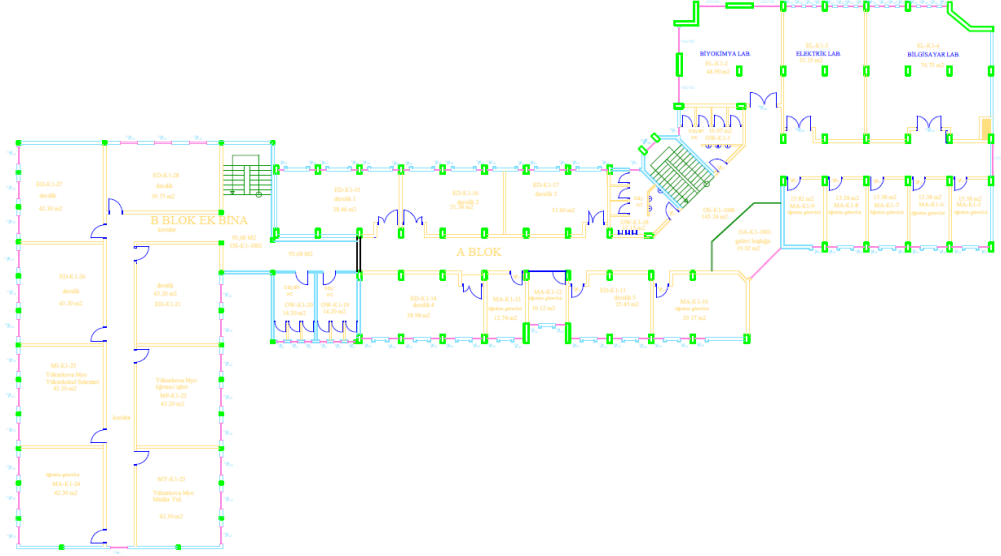
Yıldırım düşme yoğunluğu (Km ²) Ng (1/km ² /yıl)	10 (1/km ² /yıl)
Yapı Uzunluğu (L)	99,66 m
Yapı Genişliği (W)	34,5 m
Yapı Yüksekliği (H)	17,1 m
Yapının yerleşim faktörü (Cd)	Ayrık yapı: yakınında başka cisimler olmaması
LPS (Yıldırım koruma sistemi) (Pb)	Yapı LPS ile korunmuyor
(Pta)	Korunma tedbiri yok
Eş potansiyel kuşaklama (Peb)	SPD (Parafodur) yok
Dış uzaysal zırh (Ks1)	1
Zemin yüzeyi (rt)	Mermer
Yangın riski (rf)	Risk yok
Yangına karşı korunma(rp)	Otomatik sabit yangın söndürme tesisleri,
L1: İnsan hayatının kaybı (hz)	Özel tehlike yok
L1: İnsan hayatının kaybı (Lt)	D1 yaralanmalar (Lt)
L1: İnsan hayatının kaybı (Lf)	D2 fiziksel hasar (Hastane, otel, okul, kamu binası)
	D3 iç sistemlerin arızalanması
L1: İnsan hayatının kaybı (Lo)	(Hastanenin yoğun bakım ünitesi ve ameliyathane)



Şekil 3. Hakkari üniversitesi rektörlük vaziyet planı

Tablo 4. Çölemerik meslek yüksekokulu bölge bilgileri

Yıdırım düşme yoğunluğu (Km^2 Ng ($1/km^2/yıl$))	10 ($1/km^2/yıl$)
Yapı Uzunluğu (L)	71 m
Yapı Genişliği (W)	41 m
Yapı Yüksekliği (H)	16 m
Yapının yerleşim faktörü (Cd)	Tepe veya tepelik üzerinde ayrılc yapı
LPS (Pb)	Yapı LPS ile korunmuyor
(Pta)	Korunma tedbiri yok
Eş potansiyel kuşaklama (Peb)	SPD yok
Dış uzaysal zırh (Ks1)	1
Zemin yüzeyi (rt)	Tarımsal
Yangın riski (rf)	Yangın (Düşük)
Yangına karşı korunma(rp)	Tedbir yok
L1: İnsan hayatının kaybı (hz)	Özel tehlike yok
L1: İnsan hayatının kaybı (Lt)	D1 yaralanmalar (Lt)
L1: İnsan hayatının kaybı (Lf)	D2 fiziksel hasar (Hastane, otel, okul, kamu binası)
L1: İnsan hayatının kaybı (Lo)	D3 iç sistemlerin arızalanması (Hastanenin yoğun bakım ünitesi ve ameliyathane)



Şekil 4. Çölemerik meslek yüksekokulu vaziyet planı

Tablo 5. Çölemerik meslek yüksekokulu binası: kişilerin bölgelere dağılımı

Bölge	Tanımı	Kişi sayısı	Bulunma süresi (Saat/kişi)
Z1	Dış Giriş Alanı	1	2088
Z2	Dış Bahçe	7	8760
Z3	Arşiv	2	8760
Z4	Ofisler	1141	2088
Z5	Bilgisayar Merkezi	1	2088

III. BULGULARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Giriş parametreleri (kişi sayısı, bina bulunma süresi vb) IEC62305-2 standardında işlenerek sonuç bulgularına ulaşılmıştır. Gerekli standart hesaplamaları excell ortamında gerçekleştirilmiştir. Bu sayede herhangi bir parametre değişikliğinin risk analiz sonuçlarına nasıl etki ettiğini hızlıca değerlendirip yorum yapmamıza imkân sağlamıştır. Örnek model olarak kullanılan Hakkâri Üniversitesi rektörlük binası (Tablo 6) ve Çölemerik Meslek Yüksekokulu binasında (Tablo 7) herhangi bir yıldırım koruma sistemi (LPD) ve SPD (parafudr), mevcut değildir. Sınıf II tipi LPs ve SPD Kullanılması durumunda mevcut durumdaki risk değerleri Tablo-8'de gösterildiği gibi $0,0051 \times 10^{-5}$ değerine düşmüştür. Benzer olarak Tablo 9'da Çölemerik Meslek Yüksekokulu için gerekli LPS ve SPD sistemlerinin kurulması sayesinde R1 değeri 5,140 değerinden 0,0303 değerine düşürülebilmektedir. Bu değerler Tablo 1'de verilen tolerans değerlerinin altındadır ve standartlara uygundur.

Tablo 6. Rektörlük binası: koruma olmaması durumunda r1 değerinin hesaplanması (değerler $\times 10^{-5}$)

Hasar tipi	Sembol	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Yapı
D1 Elektrik çarpmasından dolayı yaralanma	Ra	0,006	0	0,008	0,039	0	0,053
	RU	0,000	0	0,082	0,000	0	0,082
D2 Fiziksel hasar	RB	0,000	0	0,166	0,155	0	0,321
	Rv	0,000	0	1,636	0,163	0	1,799
Toplam		0,006	0	1,892	0,358	0	2,255

Tablo 7. Çölemerik meslek yüksekokulu binası: koruma olmaması durumunda r1 değerinin hesaplanması (değerler x 10⁻⁵)

Hasar tipi	Sembol	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Yapı
D1 Elektrik çarpmasından dolayı yaralanma	Ra	0,001	0,000	0,001	0,098	0,005	0,104
	RU	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,002
D2 Fiziksel hasar	RB	0,001	0,000	0,007	4,878	0,100	4,987
	Rv	0,000	0,000	0,000	0,047	0,001	0,048
Toplam		0,002	0,000	0,009	5,024	0,106	5,140

Tablo 8. Rektörlük binası: koruma olması durumunda r1 değerinin hesaplanması (değerler x 10⁻⁵)

D1 Elektrik çarpmasından dolayı yaralanma	Ra	0,000	0	0,000	0,002	0	0,002
	RU	0,000	0	0,002	0,000	0	0,002
D2 Fiziksel hasar	RB	0,000	0	0,003	0,008	0	0,011
	Rv	0,000	0	0,033	0,003	0	0,036
Toplam		0,000	0	0,038	0,013	0	0,051

Tablo 9. Çölemerik meslek yüksekokulu binası: koruma olması durumunda r1 değerinin hesaplanması (değerler x 10⁻⁵)

D1 Elektrik çarpmasından dolayı yaralanma	Ra	0,000	0,000	0,000	0,005	0,000	0,005
	RU	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001
D2 Fiziksel hasar	RB	0,000	0,000	0,000	0,244	0,005	0,249
	Rv	0,000	0,000	0,000	0,047	0,001	0,048
Toplam		0,000	0,000	0,000	0,296	0,006	0,303

IV. SONUÇLAR

Hakkâri Üniversitesi rektörlük binası ve Çölemerik Meslek Yüksekokulu binaları için IEC62305-2 standartları altında risk değerlendirilmesi yapılmıştır. Örnek yapıların koruma sistemi bulunması ve bulunmaması durumundaki risk değerleri hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Rektörlük binasında koruma sistemleri kullanılması durumunda risk değerinin $2,225 \times 10^{-5}$ değerinden $0,051 \times 10^{-5}$ değerine kadar düştüğü görülmüştür. Benzer olarak Çölemerik Meslek Yüksekokulu binası içinde risk değerinin $5,140 \times 10^{-5}$ 'ten $0,303 \times 10^{-5}$ değerine düştüğü görülmüştür. Elde edilen sonuçlar altında yıldırım düşmesi sonucu korumasız bir yapının insan ve ekonomik kayıpları yüksek olabilmektedir. IEC62305-2 standardının uygulanması sonucunda risk değerinin azaldığı, önerilen korunma yöntemlerinin, insan ve maddi kayıpların azaltılmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Gan, C., Zeng, W., Yang, Y., Ji, Y., & Liu, G. (2010). Study on risk assessment of lightning disaster based on the lightning location information on campus. *Conference Record of IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 1–3. <https://doi.org/10.1109/ELINSL.2010.5549827>
- [2] Goh, H. H., Sim, S. Y., Shaari, J., Azali, N. A., Ling, C. W., Chua, Q. S., & Goh, K. C. (2017). A review of lightning protection system - Risk assessment and application. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 8(1), 221–229. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v8.i1.pp221-229>
- [3] Gomes, C., Gomes, A., Lubasi, F. C., & Doljinsuren, M. (2016). Concerns of the application of lightning protection risk assesment for small structures. *2016 33rd International Conference on Lightning Protection, ICLP 2016*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICLP.2016.7791384>
- [4] Gunay, D., & Gunay, A. (2011). Quantitative developments in turkish higher education since 1933. *Journal of Higher Education and Science*, 1(1), 1. <https://doi.org/10.5961/jhes.2011.001>
- [5] Holle, R. L. (2015). A Summary of Recent National-Scale Lightning Fatality Studies. *Weather, Climate, and Society*, 8(1), 35–42. <https://doi.org/10.1175/wcas-d-15-0032.1>
- [6] T.C Meteoroloji Genel Müdürlüğü (2019). <https://www.mgm.gov.tr/>. (n.d.).
- [7] Liu, C. H., Muna, Y. B., Chen, Y. T., Kuo, C. C., & Chang, H. Y. (2018). Risk analysis of lightning and surge protection devices for power energy structures. *Energies*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/en11081999>
- [8] Mamiş, M. S., Keleş, C., Arkan, M., & Kaya, R. (2016). Lightning surge analysis of Faraday cage using alternative transient program-electromagnetic transients program. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 10(4), 1016–1022. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2015.0794>
- [9] Mikdat Kadioğlu.(2019). *Türkiyede İklim Değişikliği Risk Yönetimi*. https://www.undp.org/content/dam/turkey/docs/projectdocuments/EnvSust/UNDP-TR-Iklim_Degisikligi_Risk_Yonetimi.pdf
- [10] Öztopal, A. (2017). Türkiye'nin Yıldırım ve Şimşek Gözlemlerinin İncelenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi-Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*. <https://doi.org/10.21205/deufmd>
- [11] Srivastava, A., & Mishra, M. (2015). Positioning of lightning rods using Monte Carlo technique. *Journal of Electrostatics*, 76, 201–207. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2015.05.029>
- [12] Tarimer, I., Kuca, B., & Kisielewicz, T. (2012). A case study to risk assessment for protecting airports against lightening. *Elektronika Ir Elektrotehnika*, 1(1), 49–52. <https://doi.org/10.5755/j01.eee.117.1.1052>
- [13] Tilev-Tanriover, Kahraman, A., Kadioğlu, M., & Schultz, D. M. (2015). Lightning fatalities and injuries in Turkey. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(8), 1881–1888. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-1881-2015>
- [14] Yüksek Öğretim Kurumu (2019). <https://www.yok.gov.tr/Documents/Yayinlar/Yayinlarimiz/buyume-kalite-uluslararasılaşma-türkiye-yuksekogretim-icin-bir-yol-haritasi.pdf>

Araştırma/Derleme Makalesi - Research/Review Article

Güneş Panellerinde Cuk Dönüştürücü Tabanlı Değişken Şartlar Altında D&G, BM ve YSA Algoritmalarının Karşılaştırmalı Performans Analizi

Through Cuk Converter in Solar Panels Comparative Performance Analysis of P&O, FL and ANN Algorithms under Variable Condition

Okan GÜNGÖR^{1*}

Geliş / Received: 24/04/2019

Revize / Revised: 25/05/2019

Kabul / Accepted: 26/05/2019

Öz- Güneş enerjisinden elektrik üretmekte kullanılan PV panellerin verim artırma çalışmaları devam etmektedir. Verimi etkileyen unsurların başında MGNT algoritmaları gelmektedir. Bu çalışmada sezgisel (BM, YSA) ve D&G tabanlı MGNT algoritmaları incelenmiştir. Sezgisel algoritmaların uygulanabilmesi için Cuk dönüştürücüye ait denetleç tasarımı Matlab aracılığıyla yapılmıştır. Yapılan benzetim çalışmaları sonucunda, üç farklı MGNT algoritmasının performans analizleri gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler - Maksimum Güç Noktası Takibi, Bulanık Mantık, Yapay Sinir Ağları, Cuk Dönüştürücü

Abstract- Efforts to increase the efficiency of PV panels used in electricity generation from solar energy continue. MPPT algorithms are at the forefront of the factors affecting efficiency. In this work, heuristic (FL, ANN) and P&O based MPPT algorithms have been investigated. In order to apply heuristic algorithms, controller design of Cuk converter have been done by using Matlab. As a result of the simulation studies, performance analyzes of three different MGNT algorithms have been shown.

Keywords - Maximum Power Point Tracking, Fuzzy Logic, Artificial Neural Networks, Cuk Converter

I. GİRİŞ

Güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik hücrelerin verim artırma çalışmaları güncel olarak devam etmektedir [1]. Verim, hücrelerden oluşan modül için dönüştürücü tercihinden, seçilen MGNT (Maksimum Güç Noktası Takibi) algoritmalarının değişken şartlardaki (radyasyon değişimi, yük değişimi, vs.) performansından etkilenmektedir. Bu sebeple literatürde, güneş panellerinden maksimum gücü elde etmek için pek çok dönüştürücü ve algoritma odaklı çalışma yapılmaktadır [2-4].

Güneş panellerinde MGNT uygulamaları için dönüştürücü odaklı çalışmalarda çeşitli türlerde dönüştürücüler kullanılmıştır [5-7]. Yapılan çalışmalarda Buck dönüştürücünün panel iç direncinden büyük bir resistif yük bağlanması durumunda MGN'yi (Maksimum Güç Noktası) bulamadığı ortaya koyulmuştur. Boost dönüştürücünün ise panel iç direncinden küçük bir resistif yük bağlanması durumunda MGN'yi takip edemediği gösterilmiştir [8]. Bu sebeplerden dolayı bu çalışmada panel ve bağlanan yükleri dikkate almaksızın MGN yapabildiği nedeniyle Cuk dönüştürücü tercih edilmiştir [9].

Güneş panellerinde MGNT uygulamaları için algoritmik olarak yapılan çalışmalar çevrim içi ve çevrim dışı olarak ikiye ayrılmaktadır [10]. Çevrim içi algoritmalar, panelin çıkışa aktardığı gücü eski panel çıkış gücüyle kıyaslayarak referans sinyali maksimum güç noktasına doğru yönlendirmektedir.

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: okangungor@bayburt.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-5258-1765>)
Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Bayburt Üniversitesi, Baberti Külliyesi, Bayburt, Türkiye

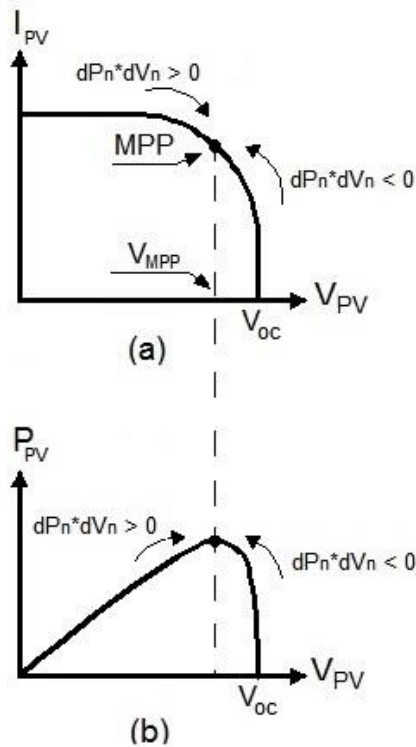
Bu teknikte yer alan D&G (Değiştir ve Gözle), Aİ (Artımsal İletkenlik) ve PSO (Parçacık Sürü Optimizasyonu) algoritmaları literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır. Çevrim dışı algoritmalar ise panellerin parametrelerinin (panel radyasyon seviyesi, panel sıcaklığı, panel kısa devre akımı ve panel açık devre gerilimi) detaylı bir şekilde önceden tespiti odaklı çalışır. Bazı yapay zekâ teknikleri de (YSA, BM, ANFİS) yaygın olarak bu başlık altında yer almaktadır.

Yapılan çalışmada algoritmik olarak ise maksimum gücü takip etmek için çevrim içi algoritmalarından D&G, çevrim dışı algoritmalarından BM (Bulanık Mantık) ve YSA (Yapay Sinir Ağları) tabanlı MGNT algoritmaları incelenmiştir. Yapılan bu çalışmanın odak noktası iki farklı sınıfta bulunan MGNT algoritmaların performansını farklı koşullar (radyasyon, yük) altında analiz etmektir. Bu sebeple dönüştürücülerin panel gücünü yüke aktarırken oluşan güç kaybını göz ardı ederek, sadece MGNT algoritmalarının performanslarını inceleyebilmek için güç ölçümü panel çıkışından yapılmıştır.

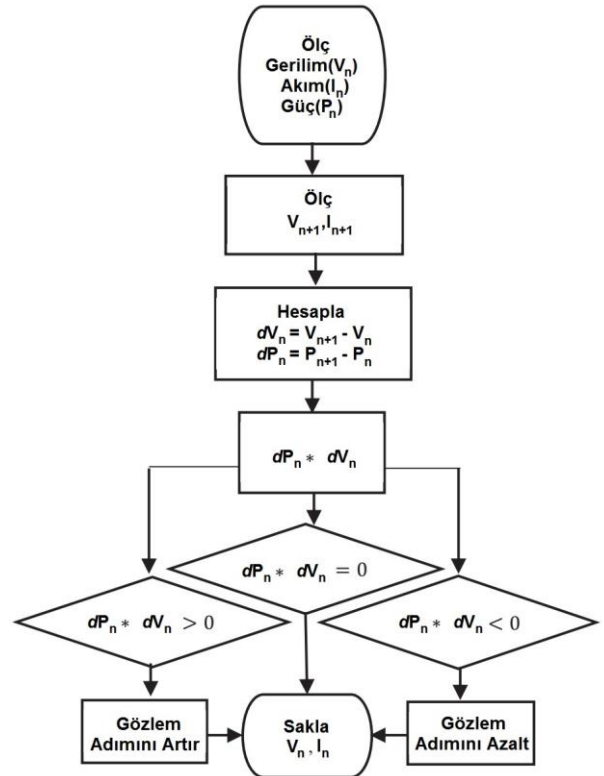
II. D&G YARDIMIYLA MGNT

Literatürde D&G algoritmasında referans olarak seçilecek denetim değişkeni gerilim, akım veya görev süresidir [10]. Eğer denetim değişkeni olarak görev süresi seçilirse matematiksel bir modelleme işlemi yapılmadan dönüştürücü doğrudan denetlenebilir [11, 12]. Denetim değişkeni olarak akım veya gerilim seçilirse denetleç tasarımına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu şekildeki denetime de dolaylı denetim denilmektedir [13].

Çalışmamızda gözlem değişkeni olarak görev süresi seçilmiştir. D&G algoritmasının çalışma prensibi: Panel çıkış gücünü ve panel çıkış gerilimini takip ederek görev süresini belirlemektir. Aşağıda akış tablosu (Şekil 2) ve panel karakteristik eğrilerinde (Şekil 1) bu durum görsel olarak anlatılmış olup, benzetim çalışmaları kısmında uygulanmıştır.



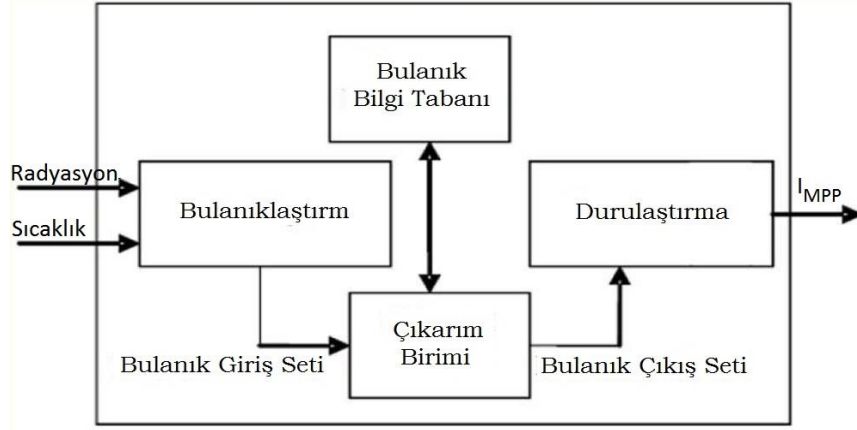
Şekil 1. PV panel P-V (a) ve I-V (b) karakteristik eğrileri



Şekil 2. D&G algoritması akış şeması [11]

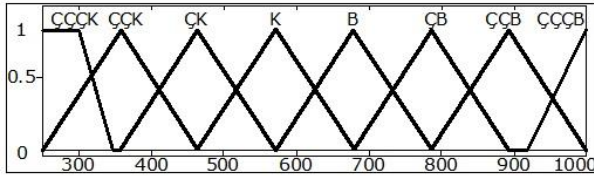
III. BM YARDIMIYLA MGNT

Bulanık mantık sözel ifadeler yardımıyla belirsizlikler üzerinden hedefe ulaşmaya çalışır. Kesinliklerin yerine belirsizlikleri kullanarak hedefe ulaşan bulanık mantık bu yönüyle diğer yapay zeka yöntemlerinden ayrışır. Bu çalışmada bulanık mantık yardımıyla maksimum güç noktasındaki akımı belirlenmektedir. Şekil 3'de bulanık mantık genel yapısı sunulmuştur.

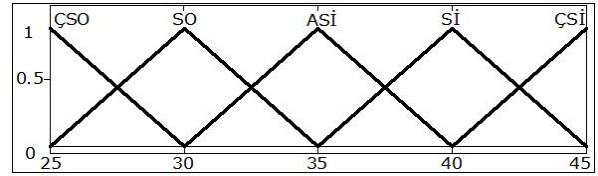


Şekil 3. Bulanık mantık genel şeması

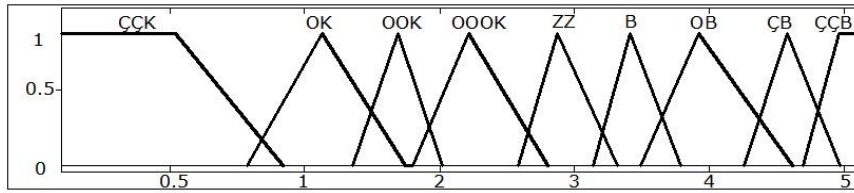
MGN'deki akım değerini, sıcaklık ve radyasyon değerlerini sözel ifadelerle dönüştürmek ve bu ifadeleri bulanıklaştırmak için üçgen üyelik fonksiyonları yardımıyla bulanıklaştırma işlemi yapılmıştır. Aşağıda bu çalışmada kullanılan bulanık mantık üyelik fonksiyonları sunulmuştur.



Şekil 4. Radyasyon giriş değişkeni üyelik fonksiyonları



Şekil 5. Sıcaklık giriş değişkeni üyelik fonksiyonları



Şekil 6. Akım referansı çıkış değişkeni üyelik fonksiyonları

Bulanık mantık denetleçine radyasyon ve sıcaklık giriş olarak alınmıştır. Çıkış olarak ise referans akım elde edilmiştir. Sekiz adete üyelik fonksiyonu ile radyasyon için bulanıklaştırma yapılmıştır (ÇÇÇK: Çok çok çok küçük radyasyon, ÇÇK:Çok çok küçük radyasyon, ÇK:Çok küçük radyasyon, K:Küçük radyasyon, B:Büyük radyasyon, ÇB: Çok büyük radyasyon, ÇÇB: Çok çok büyük radyasyon, ÇÇÇB: Çok çok çok büyük radyasyon). Beş adete üyelik fonksiyonu ile de sıcaklık için bulanıklaştırma yapılmıştır (ÇSO: Çok soğuk, SO: Soğuk, ASİ: Az sıcak, Sİ: Sıcak, ÇSİ: Çok sıcak). Çıkış olarak MGN'deki referans akım değeri için ise dokuz adet üyelik fonksiyonu seçilmiştir (ÇÇK:Çok çok küçük akım, OK:Ortalama küçük akım , OOK: Ortalama orta küçük akım ,OOOK: Orta orta ortalama küçük akım , ZZ:Ortalama akım ,B:Büyük akım,OB:Ortalama büyük akım, ÇB:Çok büyük akım,ÇÇB:Çok çok büyük akım).

Aşağıda verilen kural tablosu yardımıyla, Mamdani bulanık çıkarım yöntemi kullanılmıştır.

Tablo 1. Kural tablosu

Rad/Sic	ÇSO	SO	ASİ	Sİ	ÇSİ
ÇÇÇK	OK	ÇÇK	ÇÇK	ÇÇK	ÇÇK
ÇÇK	OOK	OOK	OK	OK	ÇÇK
ÇK	OOOK	OOOK	OOOK	OOK	OK
K	ZZ	ZZ	ZZ	OOOK	OOK
B	B	B	B	ZZ	ZZ
ÇB	OB	OB	OB	OB	B
ÇÇB	ÇB	ÇB	ÇB	ÇB	ÇB
ÇÇÇB	ÇÇB	ÇÇB	ÇÇB	ÇÇB	ÇB

Ağırlıklı ortalama yöntemi yardımıyla, bulanık ifadelerden oluşan sözel ifadeleri sayısal değerlere dönüştürerek durulaştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Matlab ortamında yapılan bu işlemler sonucunda MGN'de panele ait akım değeri elde edilmiştir.

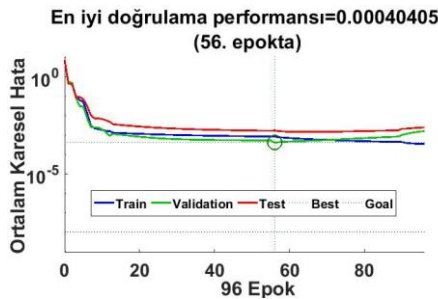
IV. YSA YARDIMIYLA MGNT

İnsan beyni milyarlarca birbiriyle bağlantılı nöronların oluşturduğu karmaşık bir ağ yapısından oluşur. Her bir nöron elektriksel sinyaller sayesinde birbiriyle haberleşerek gereken işlemleri yerine getirmektedir. YSA, insan beyninin bilgi işlem yapısından esinlenerek geliştirilmiş bir genel hesaplama yöntemidir.

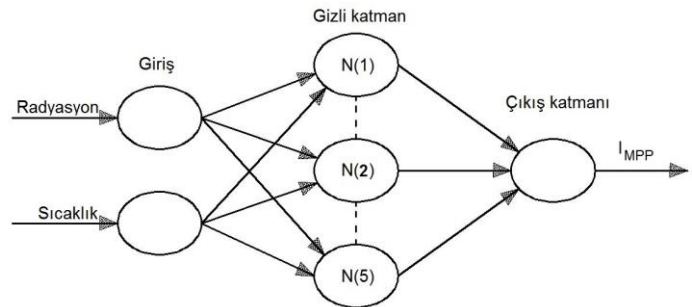
Bu çalışmada maksimum güç noktasındaki akım değerini tespit etmek amacıyla YSA kullanılmıştır. YSA ile MGNT için ilk olarak problemle ilgili KC85t-Kyocera marka panele ait katalog verileri (Tablo 2) Matlab ortamında hazırlanmış olan arayüz yardımıyla elde edilmiştir. Çalışmada radyasyon, sıcaklık ve bu değerlerde panele ait maksimum güç noktasındaki akım değeri ağı eğitmek için seçilmiştir.

Tablo 2. Ağı eğitmek için kullanılan veri seti

Veri NO	GİRİDİ		ÇIKTI(GERÇEK)	AĞIN ÇIKTISI	ÇIKTI-AĞIN ÇIKTISI
	Radyasyon(W/m ²)	Sıcaklık(C°)	MGN'de akım (A)	MGN'de akım (A)	Ağın hatası (e)
1	50	25	0,244719592	0,242011348	0,002708244
25	250	45	0,038616251	0,086159906	-0,047543655
57	600	30	2,805988771	2,801526469	0,004462302
100	1000	45	4,876340243	4,864291692	0,012048551



Şekil 7. YSA eğitim seyri



Şekil 8. MGNT için çalışılan ağ yapısı

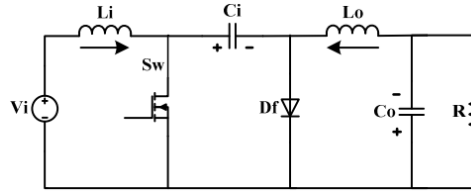
Hangi eğitim algoritmasının kullanılacağı ve kaç katmanlı bir ağ oluşturulacağı tecrübe ile belirlenmektedir. Toplanan verilerin bir kısmı eğitim için bir kısmı ağın testi için ayrılmaktadır. Çalışmada toplanan verilerin %70 eğitim için %30 test ve doğrulama için ayrılmıştır. Bu veriler, sıra dışında rastgele olarak ağ eğitiminde kullanılmıştır. Ortalama karesel hata belirlenen hatanın altında oluncaya kadar ağırlık ve biasların

güncellenmesiyle ağ eğitilmektedir. Bu işlemler sonucunda, eğitilmiş ağ yardımıyla farklı ortam şartları için MGN’deki akım değerleri elde edilmektedir.

V. CUK DÖNÜŞTÜRÜCÜ MATEMATİKSEL MODELİ

Bu bölümde PV uygulamalarında çok sık kullanılan Cuk dönüştürücünün matematiksel modeli çıkartılmaktadır. Sonrasında modelle dayalı sürekli durum için PID denetleç tasarımı yapılmıştır. Cuk dönüştürücü, çıkış gerilimini giriş geriliminin polaritesine göre ters çevirerek çıkışa iletir. Devre şeması aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.

$$V_{C_0} = -\left(\frac{D}{1-D}\right)V_g \quad (1)$$



Şekil 9. Cuk dönüştürücülerin devre şeması

Cuk dönüştürücüler temel olarak ikişer adet bobin ve kondansatör, bir adet diyot ve bir anahtarlama elemanının bir araya gelmesiyle oluşmaktadır. Bobin, kondansatör ve direnç akımı, uygulanan gerilim ile orantılı bir şekilde değiştiği için lineer elemanlardır. Ancak devrede doğrusal olmayan devre elemanları diyot ve anahtar olması sebebiyle, dönüştürücünün denetlenebilmesi için lineerleştirme yapılmak zorundadır.

Sırasıyla Cuk dönüştürücünün iki farklı anahtarlama durumuna göre diferansiyel denklemleri yazılır. Sürekli hal ortalama değer yaklaşımı kullanılarak Cuk dönüştürücü matematiksel modeli elde edilir [14]. Son aşamada da elde edilen denetleç tasarımında kullanılacak olan Cuk dönüştürücünün küçük işaret modeli denklem 2’de verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{i}}_{L_i} \\ \dot{\hat{i}}_{L_o} \\ \dot{\hat{v}}_{C_i} \\ \dot{\hat{v}}_{C_o} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{D-1}{L_i} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{D}{L_o} & -\frac{1}{L_o} \\ \frac{1-D}{C_i} & \frac{D}{C_i} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_o} & 0 & -\frac{1}{RC_o} \end{bmatrix}}_{\hat{A}x} \begin{bmatrix} \hat{i}_{L_i} \\ \hat{i}_{L_o} \\ \hat{v}_{C_i} \\ \hat{v}_{C_o} \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{V_{C_i}}{L_i} \\ -\frac{V_{C_i}}{L_o} \\ -\frac{I_{L_i} + I_{L_o}}{C_i} \\ 0 \end{bmatrix}}_{B_1 \hat{u}} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{1}{L_i} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_{B_2 \hat{u}} \begin{bmatrix} \hat{v}_g \\ \hat{v}_g \\ \hat{v}_g \\ \hat{v}_g \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{RC_o} \end{bmatrix}}_{B_3 \hat{u}} \begin{bmatrix} \hat{i}_z \\ \hat{i}_z \\ \hat{i}_z \\ \hat{i}_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

Cuk dönüştürücüye ait model $\dot{\hat{x}} = \hat{A}\hat{x} + \hat{B}\hat{u}$ formunda elde edildi. Görev süresi panel çıkış gerilimi, bozucu yük akımı olmak üzere üç adet giriş işareti vardır. Denetleç tasarımında çalışma noktası için panel çıkış gerilimi ve yük akım değişimleri sıfır alınır.

Çıkış denklemi:

$$\hat{y} = \hat{C}\hat{x} + \hat{D}\hat{u} \quad (3)$$

Giriş işaretinin doğrudan çıkışa etkisi olmaması nedeniyle: $D=0$

$$\begin{bmatrix} \hat{i}_i \\ \hat{i}_r \\ \hat{y} \end{bmatrix} = \underbrace{[1 \ 0 \ 0 \ 0]}_{\hat{c}\hat{x}} \begin{bmatrix} \hat{i}_{Li} \\ \hat{i}_{L0} \\ \hat{v}_{Ci} \\ \hat{v}_{C0} \end{bmatrix} + [0] \hat{D}\hat{u} \quad (4)$$

PID denetleç tasarımı transfer fonksiyonuna dayalı yapılacağından Cuk dönüştürücünün transfer fonksiyonu durum denklemlerinin katsayılar matrisleri kullanılarak elde edilmiştir.

$$\frac{\hat{i}_i}{\hat{d}} = C[sI - A]^{-1}[B] = \frac{9200s^3 + 9.232e08s^2 + 2.185e12s + 3.103e15}{s^4 + 1e05s^3 + 2.023e08s^2 + 2.269e11s + 1.171e14} \quad (5)$$

PID tasarımı yöntemleri bu çalışmanın kapsamı dışında olduğundan Matlab ara yüz tasarımları kullanılarak PID katsayıları elde edilmiş ve aşağıda verilmiştir.

$$K_p = 0.074, K_i = 39.9, K_d = 4.19e-06 \quad (6)$$

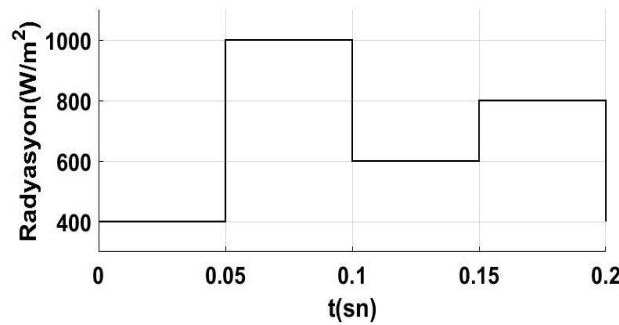
Panelden maksimum gücün çekilebilmesi için önerilen yöntemlerin benzetim çalışması aşağıda sunulmuştur.

VI. BENZETİM ÇALIŞMASI

Bu bölümde KC85t-Kyocera marka fotovoltaik modül kullanılarak, YSA, BM ve D&G tabanlı MGNT algoritmalarının değişken radyasyon (400W/m²-1000W/m²- 600W/m²-800W/m²-400W/m²), farklı yükler (20ohm - 50ohm) altında ve sabit sıcaklıkta (25C°) karşılaştırmalı benzetim çalışmaları yapılmıştır. PV panel çıkışından alınan güç ölçümleri de aşağıda sunulmuştur. Şekil 10' da çalışmadaki radyasyon değişimi ve Tablo 3, Tablo 4'de kullanılan PV panel karakteristiği gösterilmektedir.

Tablo 3. Kullanılan PV panel karakteristiği

Standart şartlarda fotovoltaik modülün elektriksel performansı (KC85T)	Değer
Maksimum Güç(Pmax)	87.35 W
MGN'deki gerilim(Vmgn)	17.4 V
MGN'deki akım(Imgn)	5.02 A
Açık devre gerilim(Voc)	21.7 V
Kısa devre akımı(Isc)	5.35 A
Modül başına hücre sayısı	36

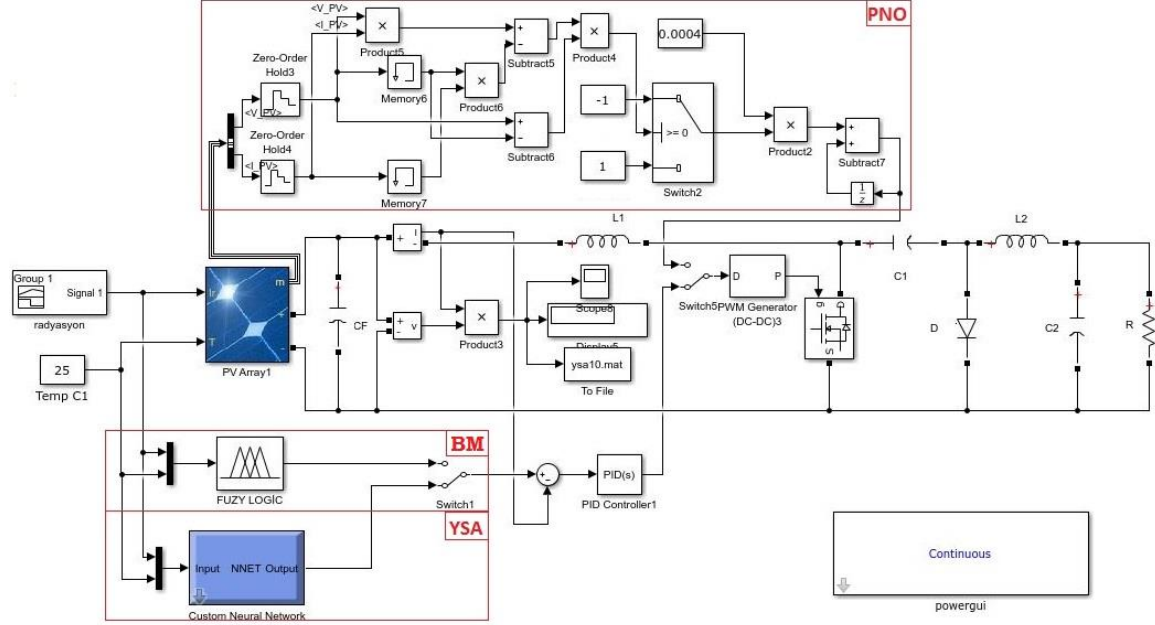


Şekil 10. Basamak radyasyon değişimi

Tablo 4. Kullanılan PV panelin farklı radyasyonlar için MGN'deki güç değerleri (25C°)

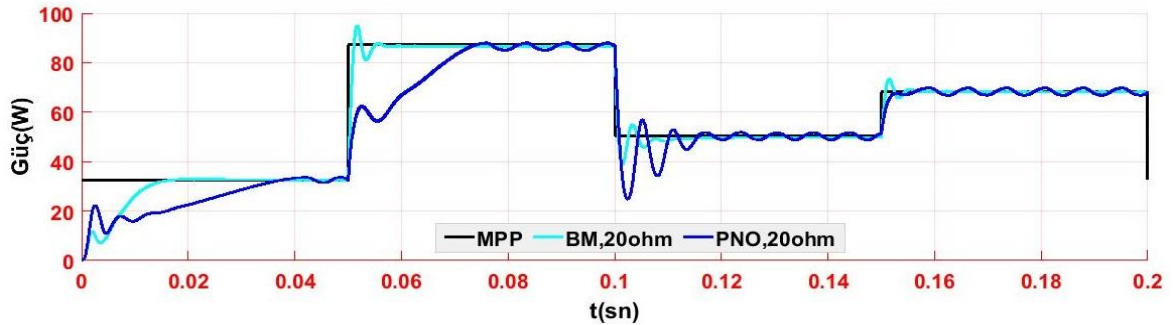
T=25C°	Radyasyon (W/m ²)	400	1000	600	800
	MPP'de Güç (W)		32.59	87.35	50.36

Bu çalışmada kullanılan D&G, BM ve YSA tabanlı MGNT uygulamalarının benzetim şeması aşağıda sunulmuştur.



Şekil 11. MGNT benzetim şeması

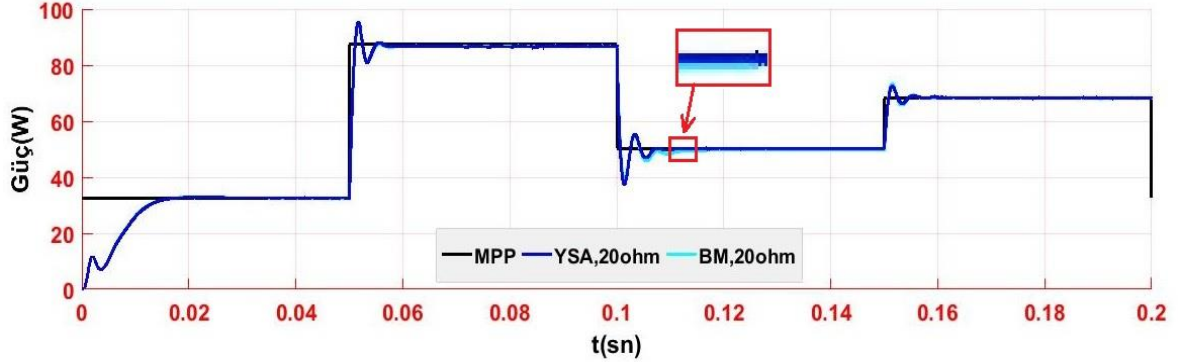
Şekil 12'de sabit sıcaklık (25C°),değişken radyasyonda (400W/m²-1000W/m²-600W/m²-800W/m²-400W/m²) ve sabit yük (20ohm) altında, Cuk dönüştürücü kullanılarak BM ve 4e-4 adım aralığına sahip olan D&G tabanlı takip algoritmalarıyla panel çıkışındaki güç eğrisi görülmektedir. Şekil 13' de ise sabit sıcaklık (25C°),değişken radyasyonda (400W/m²-1000W/m²- 600W/m²-800W/m²-400W/m²) ve sabit yük (20ohm) altında, Cuk dönüştürücü kullanılarak BM ve YSA tabanlı takip algoritmalarıyla panel çıkışındaki güç eğrisi görülmektedir.



Şekil 12. BM ve D&G algoritmalarının MGN takibi

Tablo 5. BM ve D&G algoritmalarının MGN performansları

Radyasyon	Yük=20 Ω	D&G(4e-4)	BM	Radyasyon	Yük=20 Ω	D&G(4e-4)	BM
400 W/m ²	MPP (W)	32.55	32.57	600 W/m ²	MPP (W)	50.35	49.81
	Y.Zamanı (sn)	0.042	0.017		Y.Zamanı (sn)	0.1117	0.1265
	Salınım (W)	2.15	0.69		Salınım (W)	2.9	0.69
1000 W/m ²	MPP (W)	86.26	86.62	800 W/m ²	MPP (W)	68.255	68.18
	Y.Zamanı (sn)	0.075	0.06		Y.Zamanı (sn)	0.1583	0.1575
	Salınım (W)	2.89	0.88		Salınım (W)	2.83	0.74

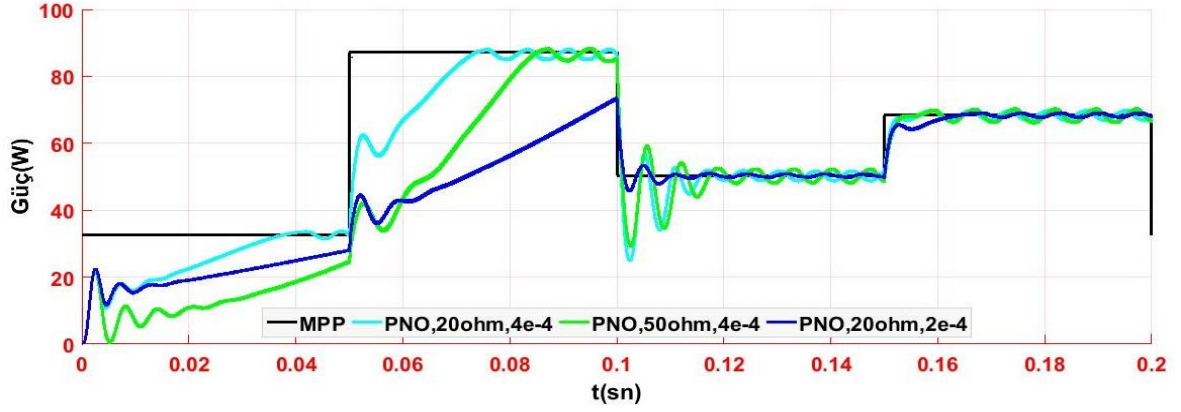


Şekil 13. BM ve YSA algoritmaları ile MGNT

Tablo 6. BM ve YSA algoritmaları ile MGNT performansları

Radyasyon	Yük=20 Ω	YSA	BM	Radyasyon	Yük=20 Ω	YSA	BM
400 W/m ²	MPP (W)	32.57	32.57	600 W/m ²	MPP (W)	50.33	49.81
	Y.Zamanı (sn)	0.017	0.017		Y.Zamanı (sn)	0.107	0.1265
	Salınım (W)	0.65	0.69		Salınım (W)	0.75	0.69
1000 W/m ²	MPP (W)	86.66	86.62	800 W/m ²	MPP (W)	68.42	68.18
	Y.Zamanı (sn)	0.05	0.06		Y.Zamanı (sn)	0.1555	0.1575
	Salınım (W)	0.7	0.88		Salınım (W)	0.77	0.74

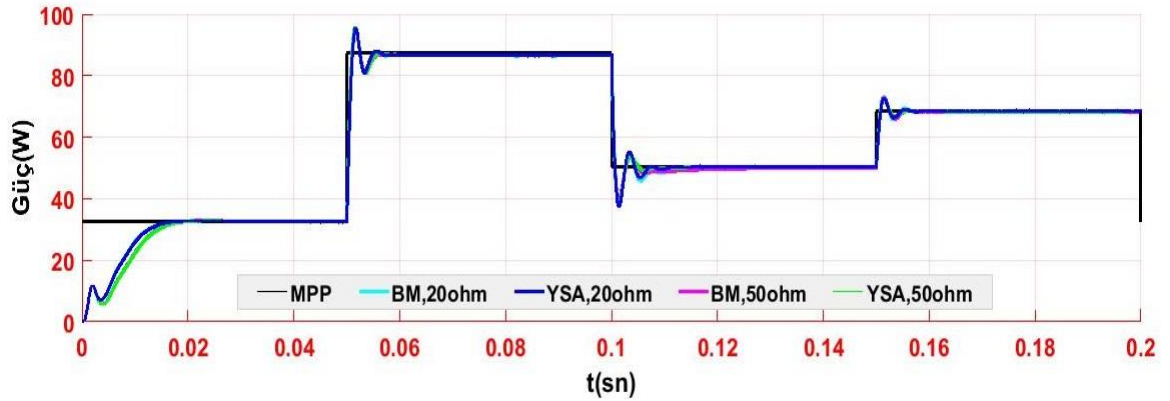
Şekil 14' de sabit sıcaklık (25C°) , değişken radyasyonda (400W/m²-1000W/m²- 600W/m²-800W/m²-400W/m²) ve farklı yükler (20ohm-50ohm) altında, Cuk dönüştürücü kullanılarak 4e-4 ve 2e-4 adım aralıklarına sahip olan D&G tabanlı takip algoritmalarıyla panel çıkışındaki güç eğrisi görülmektedir. Şekil 15' de ise sabit sıcaklık (25C°) , değişken radyasyonda (400W/m²-1000W/m²-600W/m²-800W/m²-400W/m²) ve farklı yükler (20ohm-50ohm) altında, Cuk dönüştürücü kullanılarak BM ve YSA tabanlı takip algoritmalarıyla panel çıkışındaki güç eğrisi görülmektedir.



Şekil 14. D&G algoritmasının MGN takibi

Tablo 7. D&G algoritmasının MGNT performansları

Radyasyon	Yük=20 Ω	D&G(4e-4)	D&G(2e-4)	Radyasyon	Yük=20 Ω	D&G(4e-4)	D&G(2e-4)
400 W/m ²	MPP(W)	32.55	-	600 W/m ²	MPP(W)	50.35	50.36
	Y.Zamanı(sn)	0.042	-		Y.Zamanı(sn)	0.1117	0.1108
	Salınım(W)	2.15	-		Salınım(W)	2.9	1.09
1000 W/m ²	MPP(W)	86.26	-	800 W/m ²	MPP(W)	68.255	68.37
	Y.Zamanı(sn)	0.075	-		Y.Zamanı(sn)	0.1583	0.1683
	Salınım(W)	2.89	-		Salınım(W)	2.83	1.43
	Yük=50 Ω	D&G(4e-4)		Radyasyon	Yük=50 Ω	D&G(4e-4)	
400 W/m ²	MPP(W)	-	-	600 W/m ²	MPP(W)	50.33	-
	Y.Zamanı(sn)	-	-		Y.Zamanı(sn)	0.1188	-
	Salınım(W)	-	-		Salınım(W)	4.04	-
1000 W/m ²	MPP(W)	86.4	-	800 W/m ²	MPP(W)	68.18	-
	Y.Zamanı(sn)	0.087	-		Y.Zamanı(sn)	0.1592	-
	Salınım(W)	3.62	-		Salınım(W)	3.71	-



Şekil 15. BM ve YSA algoritmalarının MGN takibi

Tablo 8. BM ve YSA algoritmalarının MGNT performansları

Radyasyon	Yük=50 Ω	BM	YSA	Radyasyon	Yük=50 Ω	BM	YSA
400 W/m ²	MPP(W)	32.56	32.58	600 W/m ²	MPP(W)	49.84	50.42
	Y.Zamanı(sn)	0.019	0.018		Y.Zamanı(sn)	0.1271	0.108
	Salınım(W)	0.75	0.78		Salınım(W)	0.79	0.72
1000 W/m ²	MPP(W)	86.41	86.62	800 W/m ²	MPP(W)	68.11	68.42
	Y.Zamanı(sn)	0.055	0.055		Y.Zamanı(sn)	0.1561	0.1557
	Salınım(W)	0.61	0.81		Salınım(W)	0.87	0.73

Karşılaştırmalı olarak yapılan benzetim çalışmalarında yük değişiminin D&G tabanlı güç takip algoritmasını etkilediği ve yüksek adım aralıklarında D&G'nin MGN'ye çabuk ulaşırken, sürekli durumda salınım yaptığı görülmüştür (Tablo 7). D&G algoritmasında küçük adım aralıkları kullanılır ise, MGN'ye ulaşmada gecikildiği ancak MGN'de az salınım yapıldığı Şekil 14'de görülmektedir (Tablo 7). Bu nedenle D&G algoritmasında gözlem değişkeninin adım aralığının belirlenmesi çok önemlidir.

Bulanık mantık tabanlı yapılan güç takibinin D&G ile yapılan güç takibinden daha başarılı olduğu Şekil 12 ve Tablo 5'de görülmektedir. Ancak BM tabanlı MGNT algoritmasının uygulanabilmesi için, Cuk dönüştürücünün matematiksel modelinin çıkartılarak bir denetleç tasarlanması gerektiği için BM tabanlı MGNT algoritması D&G tabanlı MGNT algoritmasından daha karmaşıktır.

YSA tabanlı yapılan güç takibi ise diğer iki uygulanan algoritmadan daha başarılıdır (Tablo 6,8). Ancak YSA tabanlı güç takibi yapılabilmesi için dönüştürücünün modellenmesine ilave olarak panele ait eski verilere de ihtiyaç duyulmaktadır. Çalışmamızda panele ait veriler Matlab ortamında elde edilmiştir. Ancak gerçek uygulamalarda panel kirlenmesi, kısmi gölgeleme ve panellerin yıllar içerisindeki verimlerinin azalması gibi bozucu etmenlerde var olacaktır. Gerçek uygulamalarda MGNT'nin performansını artırmak için, YSA'ya veri seti oluştururken bu durumlarda göz önüne alınmalıdır.

VII. SONUÇLAR

Yapılan benzetim çalışmalarında panel iç direncinin altında ve üstünde olabilecek bütün dirençlerde MGN takibi yapabilen Cuk dönüştürücü kullanarak, sadece MGNT algoritmalarının MGNT'ye etkisi sunulmuştur. Yukarıda yapılan çalışmalar ışığında D&G algoritmasının adım aralığının belirlenmesinin çok önemli olduğu ve de yük değişiminin D&G tabanlı yapılan MGNT performansını etkilediği görülmüştür (Şekil 14,Tablo 7). YSA ve BM tabanlı yapılan MGNT'nin yük değişiminden etkilenmediği ortaya koyulmuştur (Şekil 15,Tablo 8). Ancak BM uygulamalarında ilgili parametrelerin belirlenmesinde uzman bilgisine aşırı gereksinim duyulmasından dolayı sistem veriminin düşük olabileceği gösterilmiştir (Şekil 13,Tablo 6). YSA tabanlı yapılan güç takibinde ise eski verilerin toplanması nedeni ile maliyetli ve denetleç tasarımı gerektirmesinden dolayı karmaşık bir yapıda olsa da, en iyi performansı sergilediği görülmüştür. Ancak sezgisel yöntemleri kullanarak yapmış olduğumuz MGNT uygulamalarını gerçek uygulamalara aktarılırken ortam şartları gözetilerek (panel kirlenmesi ve verim kaybı vb.) veri seti ve üyelik fonksiyonları yeniden oluşturulması gerekecektir. Klasik D&G tabanlı MGNT algoritması gibi akım ve gerilim girişli MGNT algoritmaları çevre şartlarından daha az etkilenecek MGNT yapabilmektedir.

Bu çalışma, dönüştürücü katmanının etkisi göz ardı edilerek (PV panel çıkışından güç ölçümü yapılarak) doğrudan (D&G) ve dolaylı (BM, YSA) MGNT algoritmalarının performans analizlerini yaparak, gelecek çalışmalarda araştırmacıların MGNT algoritmalarını seçmelerine yardımcı olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Shirguppi, R. N., Kulkarni, S. G., Joshi, A. N. (2018). A survey on the evolution of solar cell materials. International Journal Of Advance Research, Ideas And Innovations In Technology, 4(4), 116-121.
- [2] Radjai, T., Rahmani, L., GAUBERT, J., & Gassab, S. (2014). Fuzzy Logic Variable Step of P&O MPPT with Direct Control Method Using Cuk Converter. In Proc. 11th International Conference On Modeling and Simulation of Electric Machines, Converters and Systems, Valencia, Spain, ELECTRIMACS-2014 (pp. 324-329).

- [3] Macaulay, J., & Zhou, Z. (2018). A Fuzzy Logical-Based Variable Step Size P&O MPPT Algorithm for Photovoltaic System. *Energies*, 11(6), 1340.
- [4] Chung, T. M., Daniyal, H., Sulaiman, M. H., & Bakar, M. S. (2016). Comparative study of P&O and modified incremental conductance algorithm in solar maximum power point tracking. 4th IET Clean Energy and Technology Conference (CEAT 2016), 36-43.
- [5] Özdemir, A., & Güngör, O. Güneş Panellerinde Hibrit ve YSA Tabanlı Algoritmalar ile Güç Takibi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(3), 258-266.
- [6] Güngör, O., Özdemir, A., & Elektrik-Elektronik, S. Ü. M. F. (2018). Güneş Panellerinde IC Ve ANFIS Tabanlı MPPT Algoritmalarının Karşılaştırmalı Performans Analizi. *Journal of Institute Of ScienceandTechnology*, 34 (2), 50-59.
- [7] Güngör, O., & Hussaini, M. Uyarlamalı Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi ve Bulanık Mantık Tabanlı MPPT Tasarımı ve Kıyaslanması. *EMO BİLİMSEL DERGİ*, 7(14), 13-20.
- [8] Kotak, V. C., & Tyagi, P. (2013). DC to DC Converter in maximum power point tracker. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 2(12), 6115-6125.
- [9] Safari, A., & Mekhilef, S. (2011). Simulation and hardware implementation of incremental conductance MPPT with direct control method using cuk converter. *IEEE transactions on industrial electronics*, 58(4), 1154-1161.
- [10] Liu, X. (2004). An improved perturbation and observation maximum power point tracking algorithm for PV panels (Doctoral dissertation, Concordia University).
- [11] Rahman, M. W., Bathina, C., Karthikeyan, V., & Prasanth, R. (2016, January). Comparative analysis of developed incremental conductance (IC) and Perturb & Observe (P&O) MPPT Algorithm for Photovoltaic Applications. In 2016 10th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO) IEEE. (pp. 1-6).
- [12] Radjai, T., Rahmani, L., GAUBERT, J., & Gassab, S. (2014). Fuzzy Logic Variable Step of P&O MPPT with Direct Control Method Using Cuk Converter. In Proc. 11th International Conference On Modeling and Simulation of Electric Machines, Converters and Systems, Valencia, Spain, ELECTRIMACS-2014 (pp. 324-329).
- [13] Kasbi, S., Rijanto, E., Nugroho, A., & Ghani, R. A. (2017). Comparison of Fuzzy Logic and PI MPPT Algorithm with Indirect Controller for PV Systems. *International Journal of Innovative Studies in Sciences and Engineering Technology*, 3(8), 25-31.
- [14] Middlebrook, R. D., & Čuk, S. (1977). A general unified approach to modelling switching-converter power stages. *International Journal of Electronics Theoretical and Experimental*, 42(6), 521-550.

Araştırma Makalesi - Research Article

Silindir Etrafındaki Kararsız Akışın Farklı Türbülans Modelleri ile Sayısal Olarak İncelenmesi

Numerical Investigation of Unsteady Flow around the Circular Cylinder with Different Turbulence Models

İlyas KARASU^{1*}

Geliş / Received: 06/05/2019

Revize / Revised: 24/05/2019

Kabul / Accepted: 28/05/2019

Öz- Bu çalışmada, kritik altı olan 5000 Reynolds sayısında silindir etrafındaki kararsız akış farklı türbülans modelleri ile sayısal olarak incelenmiş ve bu modellerin performansları test edilmiştir. Çalışmada, aynı şartlarda aynı ağ yapısında türbülans modelleri olarak LES, $k-\omega$ tabanlı DES, $k-\epsilon$ Realizable ve $k-k_L-\omega$ transition modelleri kullanılmıştır. Benzeşimlerden elde edilen sayısal ortalama akış yapısı, sürüklenme kuvvet katsayısı ve Strouhal sayısı sonuçları, literatürden benzer şartlarda yapılan bir deneysel çalışmanın sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. İncelenen parametreleri LES ve DES modelleri düşük hata ile tahmin etmiştir. Diğer modellerden $k-k_L-\omega$ transition modeli sadece Strouhal sayısını iyi sonuç verirken, $k-\epsilon$ Realizable modeli akış yapısını $k-k_L-\omega$ transition modeline göre daha iyi verse de Strouhal sayısı ve sürüklenme katsayısı değerini daha yüksek hata ile vermiştir.

Anahtar Kelimeler- Kararsız Akış; Küt Cisim; Kritik altı Reynolds Sayısı; Türbülans Modeli

Abstract- In this study, a numerical investigation on the unsteady flow over a circular cylinder using various turbulence models at a sub-critical Reynolds number 5000 were conducted and performances of those models were assessed. The LES, $k-\omega$ based DES, $k-\epsilon$ Realizable and $k-k_L-\omega$ transition models were used as the same grid structure and turbulence models under the same flow conditions. Numerical results on the mean flow structures, drag force coefficients, Strouhal numbers were compared with an experimental study in the literature which performed at similar flow conditions. The LES and DES models were predicted these parameters with very low errors. While the prediction of $k-k_L-\omega$ transition model on the Strouhal number agrees well with experiments, predictions on the other parameters do not agree well. However, prediction of the $k-\epsilon$ Realizable model on the mean flow structure is better than $k-k_L-\omega$ transition model, this model predicted drag coefficient and Strouhal number with high error.

Keywords- Unsteady Flow; Bluff Body; Subcritical Reynolds Number, Turbulence Model

I.GİRİŞ

Küt cisim aerodinamiği araştırmaları için en çok kullanılan geometri silindirdir ve birçok mühendislik uygulamasında da silindir etrafındaki akışla karşılaşılır [1]. Çalışılan Reynolds sayısında deneysel olarak silindir etrafındaki akış birçok araştırmacı tarafından çalışılmış ve fiziği ortaya konulmuştur. Silindir etrafındaki anlık akış yapısı incelendiğinde silindir üzerinde akış ayrıldıktan sonra girdap kopmalarının olduğu ve çalkantılı bir akış yapısının olduğu gösterilmiştir. Periyodik girdaplı akış yapısı ve ölü akış bölgesindeki yüksek çalkantılar gürültü veya titreşime neden olabilir [2,3]. Silindir etrafındaki ortalama akış yapısı, ters akış bölgesinde birbirine ters yönde dönen bir çift girdap, bir adet ayrılma noktasından oluşur. Najafi vd. [4] tarafından belirtildiği gibi literatürde aynı Reynolds sayısında sürüklenme katsayısı ve ters akış bölgesinin uzunluğu gibi değerler, blokaj oranı, serbest akışın türbülans seviyesi, yüzey pürüzlülüğü gibi etkenlerden dolayı çalışmalarda farklılıklar göstermektedir.

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: ikarasu@atu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-3138-6236>)

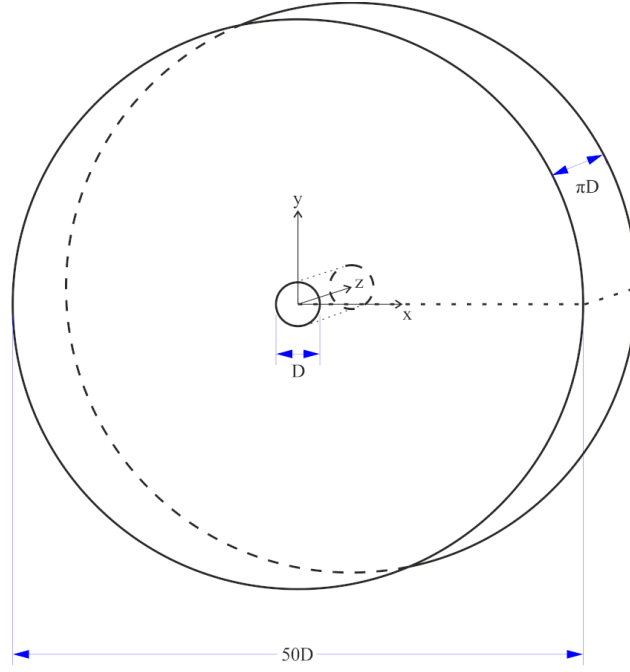
Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Adana, Türkiye

DeneySEL çalışmaların yanı sıra küt cisimler etrafındaki akışı inceleyen sayısal çalışmalar artmaktadır. Young ve Ooi [5], 3900 Reynolds sayısında iki boyutlu (2D) ve üç boyutlu (3D) URANS (Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes-Kararsız Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes) sonuçlarını LES (Large Eddy Simulation-Büyük Girdap Simülasyonu) ile kıyaslamıştır. 3D URANS sonuçları 2D'ye nazaran daha tutarlı olmasına rağmen, LES sonuçları hem 2D hem de 3D URANS sonuçlarından daha iyi çıkmıştır. Palkin vd. [6] LEVM (linear eddy-viscosity model- lineer girdap-viskozite model) ve RSM (Reynolds Stress Model-Reynolds Stress Modeli) yaklaşımlarıyla $Re=3900$ ve $Re=140000$ için URAN çözümleri yapmıştır. 140000 Reynolds sayısında, sınır tabaka içerisinde türbülansa geçişin kısa olmasından dolayı akış daha kararlı olduğundan daha tutarlı sonuçlar elde edilmiştir. Prsic vd. [7] silindir etrafındaki akışı 3900 ve 13100 Reynolds sayısında çözmüş ve DNS (Direct Numerical Simulation- Doğrudan Sayısal Simülasyon) sonuçları ile kıyaslamıştır ve LES sonuçlarının DNS ile oldukça uyumlu olduğunu göstermişlerdir. Rosetti vd. [8] 2D URANS modellerinin Reynolds gerilmelerini doğru tahmin etmesinden kaynaklı olarak ölü akış bölgesini daha kısa ve sürüklenme kuvvetini ise yüksek tahmin ettiğini göstermişlerdir. Mannini [9] $Re= 21600$ 'de dikdörtgen ve köprü kesiti etrafındaki akışı URANS ve DES ile kıyaslamışlardır. DES her zaman deneye daha yakın sonuçlar vermiş ve dikdörtgenin kenar oranları 5:1 oranında iken 2D URANS kısmen iyi sonuç verse de 1:5 oranında ne 2D ne de 3D URANS 3D DES kadar iyi sonuç verebilmiştir. Kim vd. [10] silindir etrafındaki akışı 5500 ve 41300 Reynolds sayılarında LES kullanarak analiz etmiştir. Düşük olan Reynolds sayısında SGS (Sub Grid Scale-Alt Grid) modeli kullanılırken yüksek Reynolds sayısında hem ağ sayısı artırılmış hem de k-SGS modeli kullanılmıştır. Her iki Reynolds sayısında da deneysel verilere yakın sonuçlar elde edilmiştir. Sidebottom vd. [11], 3900 Reynolds sayısında alt grid ölçeği (SGS) türbülans modeli, duvar modeli, ayrıklaştırma metodu ve ağ çözünürlüğünün etkisini araştırmıştır. Merkezi ayrıklaştırma yukarı yönlü şemadan daha iyi sonuç vermiştir. Smagorinsky modeli ile tek denklemlilik girdap viskozite modeli arasında çok küçük farklar bulunmuştur. Kullanılan duvar modelinin özellikle silindirin arkasındaki akış yapısı üzerinde oldukça etkili olduğu görülmüştür. You ve Kwon [12] 3000000 Reynolds sayısında silindir etrafındaki akışı RANS modeli olan Spalarat-Allmaras (S-A) modeli, S-A tabanlı DES (Dettached Eddy Simulation-Bağımsız Girdap Simülasyonu) ve $k-\omega$ SST tabanlı SAS (Scale-Adaptive Simulation-Ölçek Adaptif Simülasyon) modelleri ile akış yapısını incelemiş ve DES yaklaşımında yıkım terimini aktive edildiğinde ve SAS yaklaşımında da özgül dağılıma hızı arttırıldığında RANS sonuçlarına göre daha iyi sonuçlar elde etmişlerdir. Tian vd. [13] farklı açıklık oranlarında dikdörtgen etrafındaki akışı 21400 Reynolds sayısında $k-\omega$ SST türbülans modeli kullanarak incelemişlerdir. Ortalama sürüklenme katsayısı C_D , açıklık oranı ile 1 ile 0.6 arasında deneysel çalışmaya yakın olarak tahmin edilmişken daha düşük açıklık oranlarında daha yüksek hata ile tahmin edilmiştir. Taşıma katsayısındaki RMS değeri C_{Lrms} 1 açıklık oranında deneysel sonuçlara yakın çıkarken diğerlerinde yakın sonuç vermemiştir. Fakat bazı durumlar farklı LES ve DES çalışmalarına da benzerlik göstermiştir. Açıklık oranına bağlı St sayısı genel olarak deneysel çalışmalarla benzerlik göstermiştir. Soydan vd [14] silindirik köprü ayakları etrafındaki akışı k- ϵ modelinin 3 farklı türünü de kullanarak LDA (Lazer Doppler Anemometer-Lazer Doppler Anemometresi) sonuçları ile kıyaslamışlardır. Hız profili tahmini konusunda Realizable k- ϵ modeli daha başarılı olmuş ve akışın 3D olarak değerlendirilmesinin daha doğru olacağı sonucuna varılmıştır.

Sonuç olarak, literatürdeki çalışmalardan da görüldüğü gibi kritik altı Reynolds sayılarında ters basınç gradyanları, türbülansa geçiş süreci etkisi ile akışın kararlı bir rejimde olmamasından dolayı küt cisim etrafındaki daimi olmayan (kararsız) akışı sayısal olarak analiz etmek zordur. Bu çalışmada, kritik altı Reynolds sayısındaki (5000) bu kararsız akışı farklı modellerle benzeşimler yapılarak performansları deneysel çalışma ile kıyaslanması amaçlanmıştır. Bu performans kıyaslaması deneysel ve sayısal zaman ortalamalı akım çizgileri, zaman ortalamalı sürüklenme katsayısı (C_D) ve Strouhal sayısı (St) değerleri ile yapılmıştır.

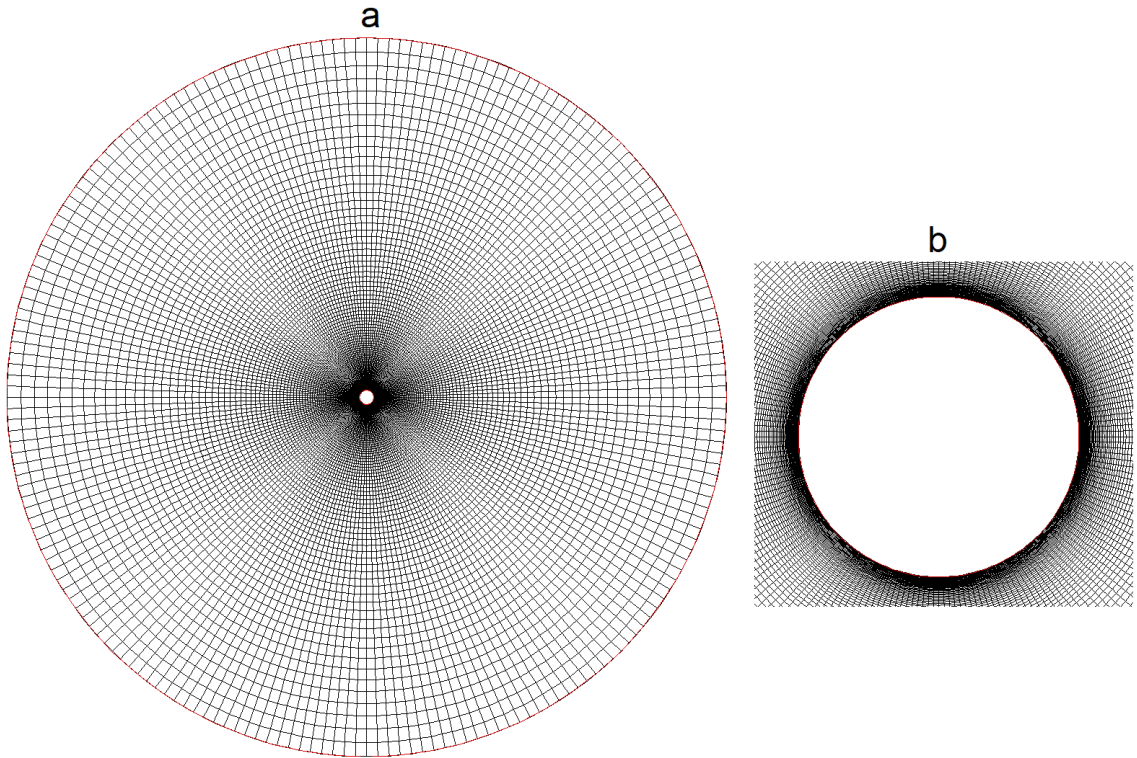
II.MATERYAL VE METOT

Tüm sayısal çözümlerde, GAMBIT yazılımı kullanılarak oluşturulmuş O tipi yapısal ağ kullanılmıştır. Şekil 1 çalışma alanın ölçülerini silindirin çapı D cinsinden (ölçeksiz) göstermektedir. Tüm akış alanını oluşturan dış silindirin çapı 50D, akış alanın kalınlığı z eksenini boyunca πD olarak verilmiştir. Şekil 2a ağ yapısının genel görünümü ve Şekil 2b silindir etrafındaki ağ yapısını göstermektedir. Silindirin çapı 200, silindir dışındaki bölgede y eksenini 150 parçaya bölünmüştür, silindir etrafındaki ağ daha da sıklaşmış daha sonra düzenli olarak giriş ve çıkışa doğru giderek açılmıştır. Silindire verilen πD kadar kalınlık oluşturulurken 48 eşit parçaya bölünmüştür. Sidebottom vd [11] tarafından da belirtildiği gibi tarafından da belirtildiği gibi z ekseninde bu kalınlık ve düğüm noktası akışı modellemek için yeterlidir.



Şekil 1. Akış alanının silindirin çapı cinsinden ölçüleri

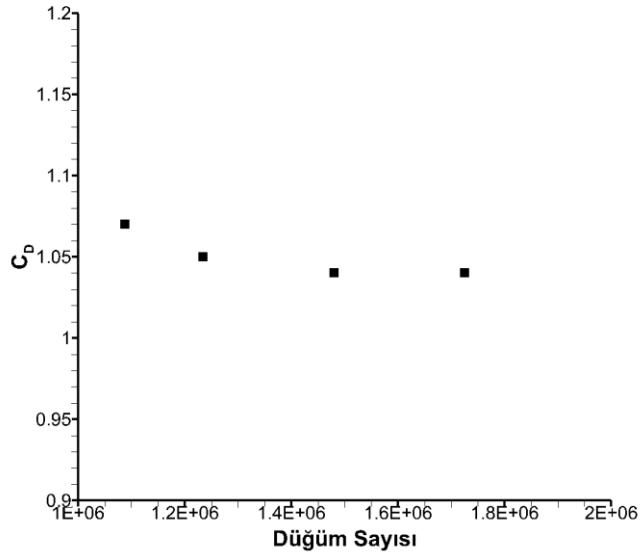
Ağda toplam 1479800 adet düğüm noktası bulunmaktadır. Dıştaki silindirin ilk yarısındaki yüzey hızı girişi, diğer yarısındaki yüzey basınç çıkışı ve dıştaki silindirin iki yüzeyi de simetri olarak seçilmiştir. Çözümlerin ağdan bağımsızlığını göstermek için 4 farklı düğüm noktasına sahip ağlarda çözümler yapılmıştır. Şekil 3 farklı düğüm noktasına sahip ağlardaki C_D değerlerini göstermektedir. Şekilden de görüldüğü üzere 4 farklı düğüm noktasına sahip ağ yapısında C_D arasındaki fark gayet düşüktür. Yaklaşık 1.200.000 olan düğüm noktasından sonra C_D değeri neredeyse hiç değişmediğinden dolayı 1479800 düğüm yapılı ağ seçilmiştir.



Şekil 2. Ağ yapısının genel görünümü (a) ve silindir etrafındaki ağ yapısı detayı (b)

Çözümler sonlu hacimler metodunu kullanan ANSYS FLUENT 18.1 yazılımı kullanılarak 2 adet E3-1240 v5 işlemcili 32 GB RAM'e sahip bir bilgisayar ile yapılmıştır. Tüm türbülans modellerinde hız ve basınç eşleştirmesi için PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators), basınç ayrıklaştırması için PRESTO! basınç ayrıklaştırması için sınırlandırılmış merkezi farklar ve daimi olmayan formülasyon için de ikinci dereceden açık formülasyon kullanılmıştır.

LES için Smagorinsky-Lilly alt ağ modellemesi kullanılmıştır. DES için RANS tabanı olarak k-w SST modeli seçilmiştir, k-ε modeli içinse ayrılmalı akışlar için daha uygun olan Reliazable modeli seçilmiştir. Realizable k-ε modeli, türbülans kinetik enerjisi k, dağılma (dissipation) oranı ε değerini ele alarak hesaplayan bir model olup özellikle ayrılmalı akışlarda başarısı daha yüksektir. Türbülans viskozitesini hesaplama yöntemindeki farklılıktan dolayı diğer k-ε modellerinden ayrılır [15]. Türbülansa geçiş modeli olan üç denklemlilik k-k_L-ω Transition modelinde ise k türbülans kinetik enerjisi, k_L laminer kinetik enerjisi, ω ise ters türbülans zaman ölçeğini göstermekte olup sınır tabakanın türbülansa geçişinin olduğu durumları modellemek üzere geliştirilmiştir. LES modelinde büyük girdaplar doğrudan çözülürken küçük girdaplar modellenir, bu modellemede alt ağ (subgrid) girdap viskozitesini modellemek oldukça önemlidir. Mevcut çalışmada Smagorinsky-Lilly modeli kullanılmıştır. DES yaklaşımı hibrid RANS/LES yaklaşımı olarak da bilinen bu modelde sınır tabaka içerisinde seçilen RANS yaklaşımına göre, ayrılmış bölgede ise LES yaklaşımına göre modelleme yapar. Bu çalışmada k-ω tabanlı DES kullanılmıştır, k türbülans kinetik enerjisi, ω ise özgün dağılma hızını ele alarak modelleme yapar. Türbülans modellerinin detayları ve formülasyonları için ANSYS Fluent yazılımının teori rehberine [15] başvurulabilir.



Şekil 3. Farklı düğüm noktası sayısına sahip ağlarda ortalama sürüklenme katsayıları

Tüm çözümler Reynolds sayısı $Re=5000$ 'de gerçekleştirilmiştir. Zaman adımı $\Delta t=5 \times 10^{-5}$ s olarak ayarlanmıştır ve böylece CFL sayısı 1'in altında tutulmuştur. Akış rejime oturduktan sonra, 200D/V olacak şekilde örnekleme alınmış ortalama için bu örneklemede alınan değerler kullanılmıştır, bu örnekleme süresi Zhang vd. [16] tarafından da belirtildiği ortalama akış yapısını çıkarmak için bu süre yeterlidir. Silindir üzerindeki akış karakteristikleri ve kuvvet katsayıları, Reynolds sayısı yanında blokaj oranı, serbest akış türbülans şiddeti, silindir yüzey pürüzlülüğü gibi bir çok parametreye bağlıdır. Dolayısıyla bu çalışmada elde edilen sonuçlar, aynı Reynolds sayısında yapılan deneysel çalışma [17] ile kıyaslanmıştır. Bu çalışmada akış yapısı su kanalında PIV (*Particle Image Velocimetry*-Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçümü) ile çıkarılmış, sürüklenme kuvveti ise rüzgâr tüneline ölçülmüştür.

Reynolds sayısı, sürüklenme katsayısı ve Strouhal sayısı aşağıdaki formüllere göre hesaplanmıştır.

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (1)$$

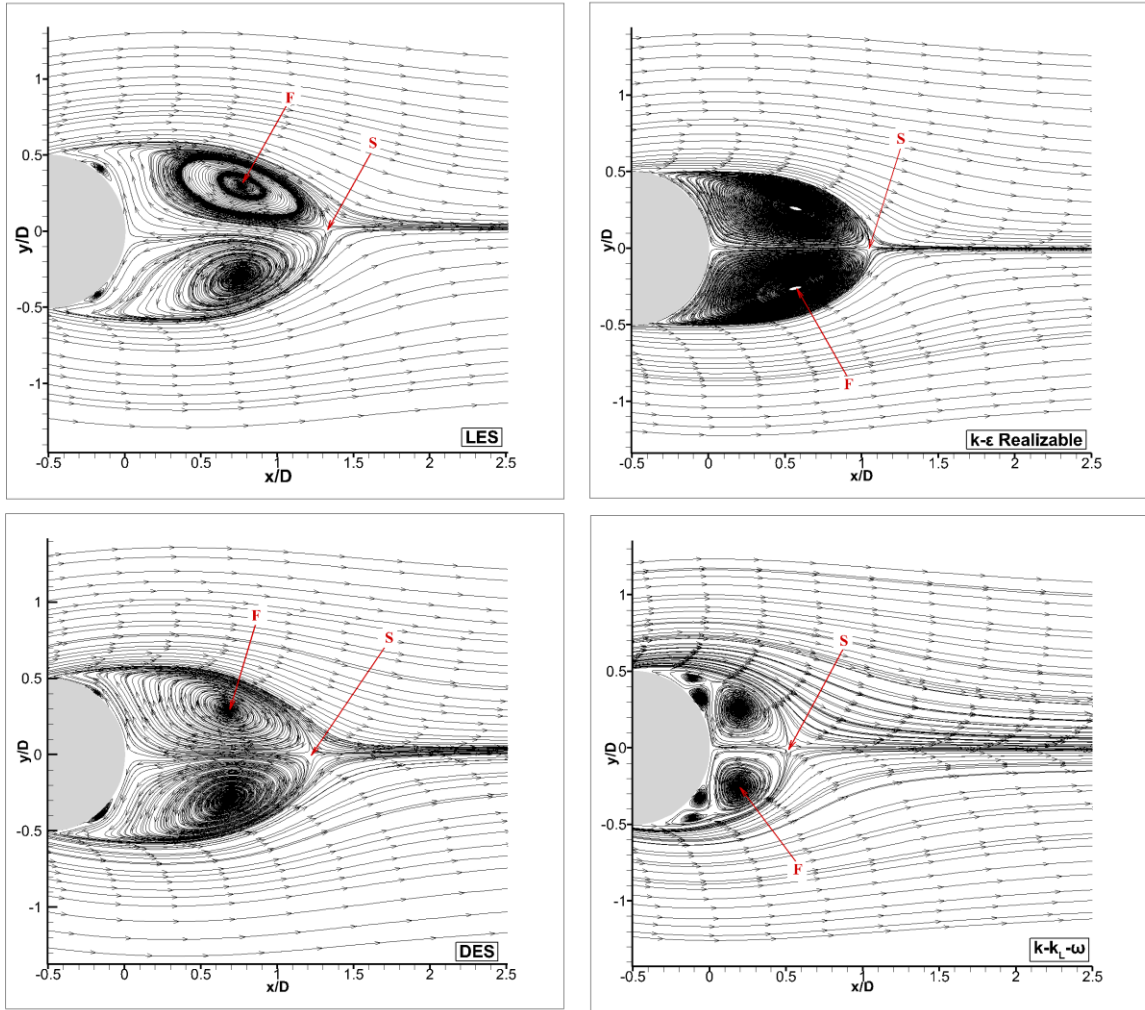
$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (2)$$

$$St = \frac{fD}{V} \quad (3)$$

Bu formüllerde, ρ akışkanın yoğunluğunu, V serbest akış hızını, D silindirin çapını, μ akışkanın dinamik viskozitesini, F_D sürüklenme kuvvetini hızını, A silindirin ön görünüş alanı olan çap ve boyunun çarpımını (DL), f ise C_L değerlerinden alınan baskın frekansı simgelemektedir.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Silindir arkasında art izindeki zaman ortalamalı akış yapısı incelendiğinde ters akış oluşum bölgesinde odak noktaları F ile gösterilen birbirine ters dönen iki girdap ve bir adet de ayrılma noktası S olduğu görülür. F ve S noktaları silindir etrafındaki akışın topolojinin belirlenmesinde kullanılan en önemli parametrelerdendir. Şekil 4’de sayısal zaman ortalamalı akım çizgileri verilmiştir. Kıyaslanmanın doğru yapılabilmesi için deneysel çalışmanın koordinatları silindir çapı D ile boyutsuzlaştırılarak verilmiş ve silindir merkezi $x/D = -0.5$ ’de olacak şekilde konumlandırılmıştır. Deneysel çalışmada S noktası silindirin arka yüzeyinden yaklaşık $1.4D$ mesafede oluşmuş ve bu mesafe LES modelinde $1.35D$, DES modelinde $1.25D$ olarak tahmin edilmiştir. RANS modellerinde ise fark çok fazla çıkmış ve $k-k_L-\omega$ Transition modelinde $0.52D$, $k-\varepsilon$ Realizable modelinde ise $1.05D$ olarak elde edilmiştir. Deneysel $0.8D$ olan F değeri ise LES modeli ile $0.76D$, DES ile $0.68D$, $k-k_L-\omega$ Transition modeli ile $0.2D$, $k-\varepsilon$ Realizable modeli ile de $0.57D$ olarak tahmin edilmiştir. Deneysel ve sayısal F ve S noktaları silindirin çapı D cinsinden Tablo 1’de özetlenmiştir. Şekil 4’deki zaman ortalamalı akım çizgileri detaylı incelendiğinde LES ve DES modellerinde küçük ayrılma kabarcıklarının oluştuğunu görmek mümkündür. Silindir etrafındaki akışın PIV deneylerinde lazerde parlamadan kaynaklı olarak genelde deneylerde görülemese de bu kabarcıkların oluşması beklenen bir durumdur. Eğer $k-k_L-\omega$ Transition modelinde bu kabarcık çok büyük ve iki parçalı şekilde tahmin edilmişken $k-\varepsilon$ Realizable modelinde ise kabarcık hiç görülememiştir.



Şekil 4. Sayısal zaman ortalamalı akım çizgileri

Tablo 1. Deneysel ve sayısal ortalama sürüklenme katsayısı (C_D) değerleri

Model	F	S
Deneysel [17]	0.8	1.4
LES	0.76	1.35
DES	0.68	1.25
k- k_L - ω Transition	0.2	0.52
k- ϵ Realizable	0.57	1.05

Ortalama sürüklenme katsayısı C_D değerleri için elde edilen sonuçlar Tablo 2’de verilmiştir. Deneysel olarak elde edilen 1.07 olan C_D değeri; LES modelinde %3 fark ile 1.04, DES modelinde %4 fark ile 1.03 olarak tahmin edilmiştir. URANS modellerinde ise k- k_L - ω modeli yaklaşık %26 fark ile 1.30 değeriyle daha yüksek, k- ϵ Realizable modelinde ise %18 fark ile 0.84 değeriyle daha düşük olarak tahmin etmiştir.

Tablo 2. Deneysel ve sayısal ortalama sürüklenme katsayısı (C_D) değerleri

Model	C_D	Fark (%)
Deneysel [17]	1.07	0
LES	1.04	-3.12
DES	1.03	-4.11
k- k_L - ω Transition	1.30	25.81
k- ϵ Realizable	0.84	-18.13

Kararsız akış için önemli olan bir diğer parametre de St sayısı olup bu sayı tüm modeller için incelenmiştir. Tablo 3 elde edilen St sayılarını göstermektedir. Sayısal çalışmalar için baskın frekans, literatürde de belirtildiği gibi anlık olarak kaydedilen taşıma kuvveti katsayısı C_L üzerinden FFT değeri yapılarak hesaplanmıştır. Deneysel çalışmada 0.20 olan St sayısı LES, DES ve k- k_L - ω modelleri için çok iyi tahmin edilmişken, k- ϵ Realizable modeli 0.25 ile deneyselle en uzak tahmini yapmıştır. Her ne kadar akış yapısı LES ve DES modellerinden oldukça farklı çıksa bile St sayısının aynı çıkması şunu göstermiştir ki akışta girdap kopma frekansı veya C_D ortalama akış yapısına bağlı değildir.

Tablo 3. Deneysel ve sayısal St Sayıları

Model	St
Deneysel [17]	0.20
LES	0.20
DES	0.20
k- k_L - ω	0.20
k- ϵ Realizable	0.25

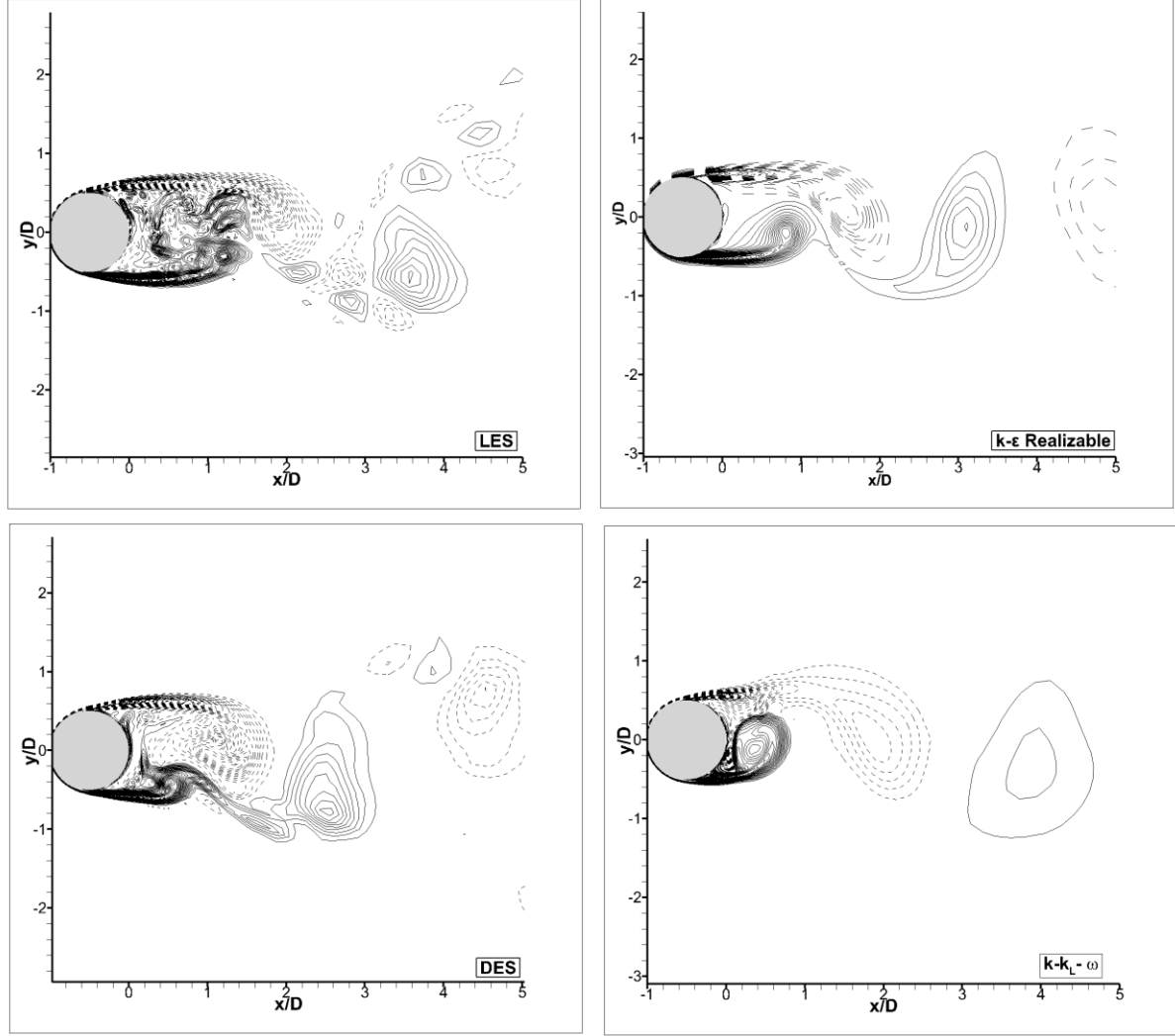
Sonuçların bazılarının farklı olmasının en temel sebebi RANS modellerinin oluşan küçük girdapçıkları modelleyememesidir. Eğer anlık değerleri incelenirse girdap yapısının oldukça farklı olduğu görülecektir. Anlık çevrinti ($w = \frac{\delta v}{\delta x} - \frac{\delta u}{\delta y}$) kontürleri Şekil 5’de incelenen tüm modeller için gösterilmiştir. Kesik çizgiler negatif, düz çizgiler ise pozitif çevrinti değerlerini vermektedir. Anlık değerlerden görüleceği üzere RANS modelleri girdapları daha büyük kümeler halinde tahmin ederken, LES çok daha küçük parçalar halinde karmaşık şekilde sunmuştur ki bu gerçek akışta olan durumdur.

Norberg [18] tarafından da belirtildiği gibi $Re=5000$ ’de silindir etrafındaki akışın türbülansa geçişi art iz bölgesinde gerçekleşmektedir. Bu da akış modellemesini daha da karışık hale getiren bir durumdur. Özellikle tam türbülanslı akışlar için geliştirilen RANS modellerinin tahmin konusundaki başarısızlığını arttıran bir faktördür. Bunun yanında, bu çalışmada kullanılan k- k_L - ω türbülansa geçiş modeli de silindir etrafındaki düşük Reynolds sayılı akış yapısını tahmin konusunda başarısız olmuş ve bu başarısızlığın sebebi türbülansa geçiş işleminin sınır tabakada gerçekleşmemesidir. Sonuç olarak, bu çalışmada silindir gibi önemli akış olayları yüzey dışında gelişen sistemlerde modelleme için LES veya DES modellerini kullanmanın daha uygun olduğu görülmüştür.

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada silindir etrafındaki kararsız akış LES, DES, k- ϵ Realizable ve k- k_L - ω modelleriyle 5000 Reynolds sayısında incelenmiş ve literatürdeki bir deneysel çalışma ile kıyaslanmıştır. Daimi akış için önemli olan zaman ortalamalı akım çizgileri, sürüklenme katsayısı, Strouhal sayısı değerleri deneysel çalışma ile

kıyaslanmıştır. Her 3 parametre için de LES modeli en iyi sonucu vermiştir, DES de LES kadar başarılı olamasa da URANS modellerine göre daha iyi performans göstermiştir. URANS modellerinden $k-\epsilon$ Realizable akış yapısını LES ve DES kadar başarılı olamasa da $k-k_L-\omega$ modelinden daha iyi tahmin etmiştir. Ancak ortalama sürüklenme katsayısını deneyselle göre yaklaşık %18 düşük bulmuş aynı zamanda St sayısı konusunda deneyselle göre farklı sonuç veren tek model olmuştur. Anlık akış yapısını çok büyük farkla tahmin eden $k-k_L-\omega$ modeli sürüklenme katsayısını deneyselden % 25 daha fazla bulmasına rağmen St sayısında deneyselle gayet iyi bir uyum göstermiştir. Sonuç olarak, bu çalışmada silindir gibi küt cisimlerde dış akışın modellenmesinde için doğrudan akış yapısını çözümüne yoluna giden LES veya DES türbülans modellerinin kullanılmasının daha uygun olduğu görülmüştür.



Şekil 5. Anlık çevrinti konturları

KAYNAKLAR

- [1] Pinar, E., Ozkan, G. M., Durhasan, T., Aksoy, M. M., Akilli, H., & Sahin, B. (2015). Flow structure around perforated cylinders in shallow water. *Journal of Fluids and Structures*, 55, 52-63.
- [2] Ozgoren, M., Pinar, E., Sahin, B., & Akilli, H. (2011). Comparison of flow structures in the downstream region of a cylinder and sphere. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 32(6), 1138-1146.
- [3] Rashidi, S., Hayatdavoodi, M., & Esfahani, J. A. (2016). Vortex shedding suppression and wake control: A review. *Ocean Engineering*, 126, 57-80

- [4] Najafi, L., Firat, E., & Akilli, H. (2016). Time-averaged near-wake of a yawed cylinder. *Ocean Engineering*, 113, 335-349
- [5] Young M. E. & Ooi A. (2007). Comparative Assessment of LES and URANS for Flow Over a Cylinder at a Reynolds Number of 3900. 16th Australasian Fluid Mechanics Conference. 2-7 December, Gold Coast, Australia, 1063-1070.
- [6] Palkin, E., Mullyadzhannov, R., Hadžiabdić, M., & Hanjalić, K. (2016). Scrutinizing URANS in shedding flows: the case of cylinder in cross-flow in the subcritical regime. *Flow, Turbulence and Combustion*, 97(4), 1017-1046.
- [7] Prsic, M. A., Ong, M. C., Pettersen, B., & Myrhaug, D. (2014). Large Eddy Simulations of flow around a smooth circular cylinder in a uniform current in the subcritical flow regime. *Ocean Engineering*, 77, 61-73.
- [8] Rosetti, G. F., Vaz, G., & Fajarra, A. L. (2012). URANS calculations for smooth circular cylinder flow in a wide range of Reynolds numbers: solution verification and validation. *Journal of Fluids Engineering*, 134(12), 121103.
- [9] Mannini, C. (2015). Applicability of URANS and DES simulations of flow past rectangular cylinders and bridge sections. *Computation*, 3(3), 479-508.
- [10] Kim, S., Wilson, P. A., & Chen, Z. M. (2015). Large-eddy simulation of the turbulent near wake behind a circular cylinder: Reynolds number effect. *Applied Ocean Research*, 49, 1-8.
- [11] Sidebottom, W., Ooi, A., & Jones, D. (2015). A parametric study of turbulent flow past a circular cylinder using large eddy simulation. *Journal of Fluids Engineering*, 137(9), 091202.
- [12] You, J. Y., & Kwon, O. J. (2010). Numerical comparisons between URANS and hybrid RANS/LES at a high Reynolds number flow using unstructured meshes. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 11(1), 41-48.
- [13] Tian, X., Ong, M. C., Yang, J., & Myrhaug, D. (2013). Unsteady RANS simulations of flow around rectangular cylinders with different aspect ratios. *Ocean Engineering*, 58, 208-216.
- [14] Soydan, N. G., Şimşek, O., & Aköz, M. S. Köprü Ayağı Etrafındaki Türbülanslı Akımın Sayısal ve Deneysel Analizi. *Politeknik Dergisi*, 21(1), 137-147
- [15] Fluent, A. N. S. Y. S. (2018). Ansys Fluent Theory Guide. ANSYS Inc., USA.
- [16] Zhang, H., Yang, J. M., Xiao, L. F., & Lu, H. N. (2015). Large-eddy simulation of the flow past both finite and infinite circular cylinders at $Re=3900$. *Journal of Hydrodynamics*, 27(2), 195-203. Zhang, H., Yang, J. M., Xiao, L. F., and Lü, H. N., 2015
- [17] Ozkan, G. M., Firat, E., & Akilli, H. (2017). Passive flow control in the near wake of a circular cylinder using attached permeable and inclined short plates. *Ocean Engineering*, 134, 35-49.
- [18] Norberg C. (1998). LDV-measurements in the near wake of a circular cylinder. Advances in Understanding of Bluff Body Wakes and Vortex-Induced Vibration. 21-25 June, Washington DC, USA, 1-1

Performance Analysis of Combined Cycle Power Plant Using Multi-Effect Distillation (MED) Desalination Process

Oğuzhan ERBAŞ^{1*}

Geliş / Received: 12/05/2019

Reviz / Revised: 29/05/2019

Kabul / Accepted: 30/05/2019

Abstract- Water is the most important substance on earth. Seawater distillation processes have a considerable technique suitable for producing large scale quantities of potable water. This process involves a wide range of technologies that yield access to different sources of water such as seawater, ground and surface water, and wastewater. Because of the reduction in access to fresh water in recent decades and the uncertainty in availability effected by climate change, desalination is the critical process that ensure the future of humanity for fresh water requirement. Multi effect distillation process employs the same principles with multi-stage flash distillation but in contrasts, it occurs in a series of vessels (effects) and uses the principles of evaporation and condensation at reduced ambient pressure. A dual-purpose desalination plant has a process that produces both power and fresh water using optimum thermal energy. It offers a considerable saving in energy usage. This paper focuses on the modelling and thermodynamic analysis of the "Multi-Effect Distillation" (MED) desalination installed in combined cycle power plant and moreover the expected performance characteristics of the designed MED desalination plant has been determined.

Keywords- MED Desalination Process, Combined Cycle Power Plant, Performance Analysis

I. INTRODUCTION

The fact that the use of water resources has become increasingly limited has led to the use of alternative sources such as sea water for water supply. The rapid growth of the world population and the industrialization of societies continuously increase water consumption. Previously sufficient clean water resources have become insufficient. Especially in countries with dry climate, water shortage is larger. Processes aiming at obtaining water intended for drinking, watering and using by eliminating the salt, minerals and other impurities present in the water are generally called desalination processes [1,3].

Desalination plants are processes that produce fresh water from salt water. Thermal or membrane processes are generally used in these facilities. Thermal processes are based on the evaporation and condensation of salt water. Desalination, suitable for industrial or domestic use, for the purpose of producing clean water from salty groundwater or sea water from the process of removal of water and other minerals. In 1978, the first seawater desalination plant was established in Jeddah, Saudi Arabia. As the type of desalination technology affects the amount and quality of the required feed water as well as the intense salty sea water (discharged seawater) components and discharge rate, it is important that the marine and coastal engineers understand the different desalination technologies [2].

Today, there are two main technologies used in desalination processes. These are thermal and membrane technologies. Thermal methods include heating the sea water to produce water vapor which will then condense and produce fresh water. During this process, intense saline sea water flow is produced which must be discharged. Membrane technologies enable the membranes to be used in two commercial desalination processes such as electro dialysis and reverse osmosis to remove salt from sea water. The membrane is a flat surface with selective permeability separating salt and other impurities from seawater.

^{1*}Corresponding Author: oguzhan.eras@dpu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-9424-4273>)
Department of Mechanical Engineering, Kutahya Dumlupınar Univ. Evliya Celebi Campus, Kutahya, Turkey.

Hybrid desalination methods are the facilities where the desalinate water requirement is operated by providing thermal and membrane facilities together. Combined heat and power plant installations are used to generate power, and the energy source is then used to desalinate seawater through thermal processes in general. In addition to the cooling water, the inlet port also provides the supply of feed water for the desalination process. These systems have enormous economic benefits because of the fact that energy is the largest operating cost in any desalination process and the fuel consumption is significantly lower in these dual-purpose plants compared to two separate facilities. However, the units are permanently connected and therefore cannot display the desalination plant function if the turbine is not running for maintenance or similar reasons [5].

The most used membrane process in desalination plants is reverse osmosis. With reverse osmosis process operated desalination systems consist of three stages. These are pre-treatment, membrane system and final refining. Water taken with suitable water intake structure first they are being treated. Reverse osmosis membranes are operated at high pressure and cost high materials are pre-treatment of raw water for passing provides the long-term use of reverse osmosis membranes and hinders potential operating problems. It can be used for human consumption purposes because it provides 99% ion removal. In order to be absolutely conditioned and with free chlorine they must be disinfected. Water intake structures are an important element of reverse osmosis desalination systems. Water should be supplied at stable flow and quality throughout the life of a membrane plant. Water intake structures from sea water are in two forms. The first one is the surface water intake structures, and the second one is the water intake structures. Submersible dewatering structures are used especially in small and medium sized seawater treatment plants. Large capacity reverse seawater purifier osmosis systems use more open water intake structures [6].

Power plants, cooling water purpose use sea water. The reverse osmosis plant is used as cooling water and used as water as raw water and used to be discharged. Hence, the reverse osmosis plant anchorage pipe is connected to the cooling water discharge line and there is no need to construct a separate line. The concentrate flow from desalination is connected to the cooling water discharge line from the bottom of the dewatering line taken to the desalination system. In reverse osmosis desalination systems, pre-treatment systems come after water intake structure. Prior to the reverse osmosis membrane, cartridge filters are used to prevent blockages of the membranes by particulate matter. Material selection in reverse osmosis systems so that the selected material is not damaged by corrosion it is important. In sea water reverse osmosis systems, they usually use duplex stainless steel for high pressure piping. Some inhibitors of reverse osmosis-treated water may also be added to prevent water corrosion. Phosphate and silica inhibitors can shrink tubing and reduce corrosion. Control and automation units are very important units in water treatment systems and especially in advanced treatment systems such as membrane processes. When deciding on reverse osmosis system, other water supply systems (inter-water transfer, wastewater recovery, etc.) should be compared with the long-term plan to work and according to the appropriate method should be preferred [4, 6].

II. MULTI-EFFECT DISTILLATION (MED) METHOD

A thermal method encountered in practice is a Multi-Effect Distillation (MED) method. In this method, the steam produced by a unit is concentrated at a lower temperature and pressure in the next unit; this also provides additional heat for evaporation. Compared to the MSF technology, the MED technology does not require additional heat for evaporation at all levels and is operated at lower temperatures ($\sim 70^\circ\text{C}$) than MSF.

In a MED plant, seawater taken into the system is first processed and sprayed on the tubes where the pre-heated water vapor passes. That is, it is distributed over the surface of the evaporator tubes in a thin film to support sudden evaporation. The resulting water vapor passes to the second process and is concentrated by heat transfer. Evaporators are placed in series. Feed water is pumped and evaporated in the first section. The steam is then transported and used as thermal energy for evaporation in the next section where some of the remaining feed water is evaporated. This event continues as a sequential process. In the first process, only a portion of the seawater coming into the tubes is evaporated and the remaining seawater is fed into the second process. Fig. 1 shows Simplified scheme of a MED process [7].

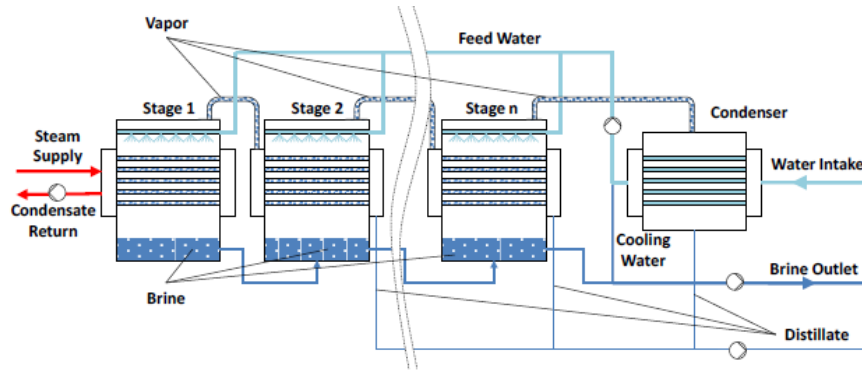


Figure 1. Simplified scheme of a MED process

These tubes are heated by the vapors created in the first process, respectively. This steam is used to vaporize a portion of the seawater supply remaining in the next process, while the other part is condensed for fresh water production and this process continues sequentially. Three arrangements have evolved for MED processes. They are based primarily on the arrangement of the heat exchanger tubing; horizontal tube arrangement, vertical tube arrangement and vertically stacked tube bundles. If the feed water is taken from an offshore inlet, the feed water is transferred to the land via a tunnel or pipeline from the seawater inlet port. The sea water flow is transferred through the main discharge line through the emitter. The development of marine environment life in the sea water inlet can have a great impact on the hydraulics and operation of the desalination plant. Therefore, pipe material should be considered as durable as HDPE against marine environment life [5,7].

However, the most optimal model was chosen; the pipeline's project life, pipeline cost, special financial requirements and local support, financial issues, design flow, hydraulic losses and appropriate reduction (pump or gravity) based on the necessary internal diameter, pipeline installation, international acceptance, long-term external and internal criteria such as protection requirements, maintenance, testing methods should be considered. During the desalination process, heavy metals such as copper, lead and iron may also be mixed into the dense salt water. This may be due to the corrosion of the desalination equipment or the can be welded. The environmental impact of dense salt seawater removal can be reduced by hand-made or natural filtration processes, reducing the amount of chemicals applied during pre-treatment. For example, ultrafiltration, which removes silt and organic matter from feed water, can replace coagulants. In all these areas, it is considered to be a good economic alternative by hybrid desalting, which combines thermal and membrane desalination processes. Hybrid configurations are available in operation with ease, convenience, flexibility, low energy consumption, remote construction work, high plant area, better power and convenient water.

III. ANALYSIS OF COMBINED CYCLE POWER PLANT WITH MULTI-EFFECT DISTILLATION (MED)

The main purpose of the combined cycle power plants is to generate electricity using the waste heat gases and to increase the efficiency. Gas plants alone their yields are low but their yields are increased when combined cycle. Contribution to national economy it is provided. Gas turbines and steam turbines are used together in combined cycle power plants. In addition to the electrical energy obtained from gas turbines using natural gas as fuel, the steam obtained from the steam turbines and the steam obtained from the steam turbines which are produced by transferring the waste heat of the exhaust gases with high temperature from the turbine exhaust. Combined cycle power plants offer high efficiency and power as well as adaptable to flexible operating conditions, quick commissioning and easy adaptation to full load and variable load situations. They also have high efficiency in variable load conditions [4].

A co-generation plant, which produces both electricity and good quality water, is often called a dual-purpose plant. A dual-purpose desalination plant is a process that produces both power and desalted water with the optimum use of thermal energy in producing the two products. It offers a considerable saving in energy usage. For example a single-purpose power plant producing electrical production of water and power [8]. In particular, it is desirable to operate a power plant near base load to be most economic. In parallel co-generation, electricity is produced as co-product along with desalted water by diverting part of the steam to the turbine to produce electricity and part of the steam to the desalination plant. This configuration allows increased flexibility in energy usage [7].

This study demonstrates coupling of a combined cycle plant and an MED desalination plant (Figure 2). The desalination plant (12 MIGD) is modelled by a Thermoflow (Thermal Engineering Software). In this study, HRSG is sized at 33 °C degree ambient, MED desalination plant is sized at 28 °C degree seawater. In order to run the desalination plant at variable load and maintained LPT at the same extraction pressure, LPT is sized at the maximum through flow.

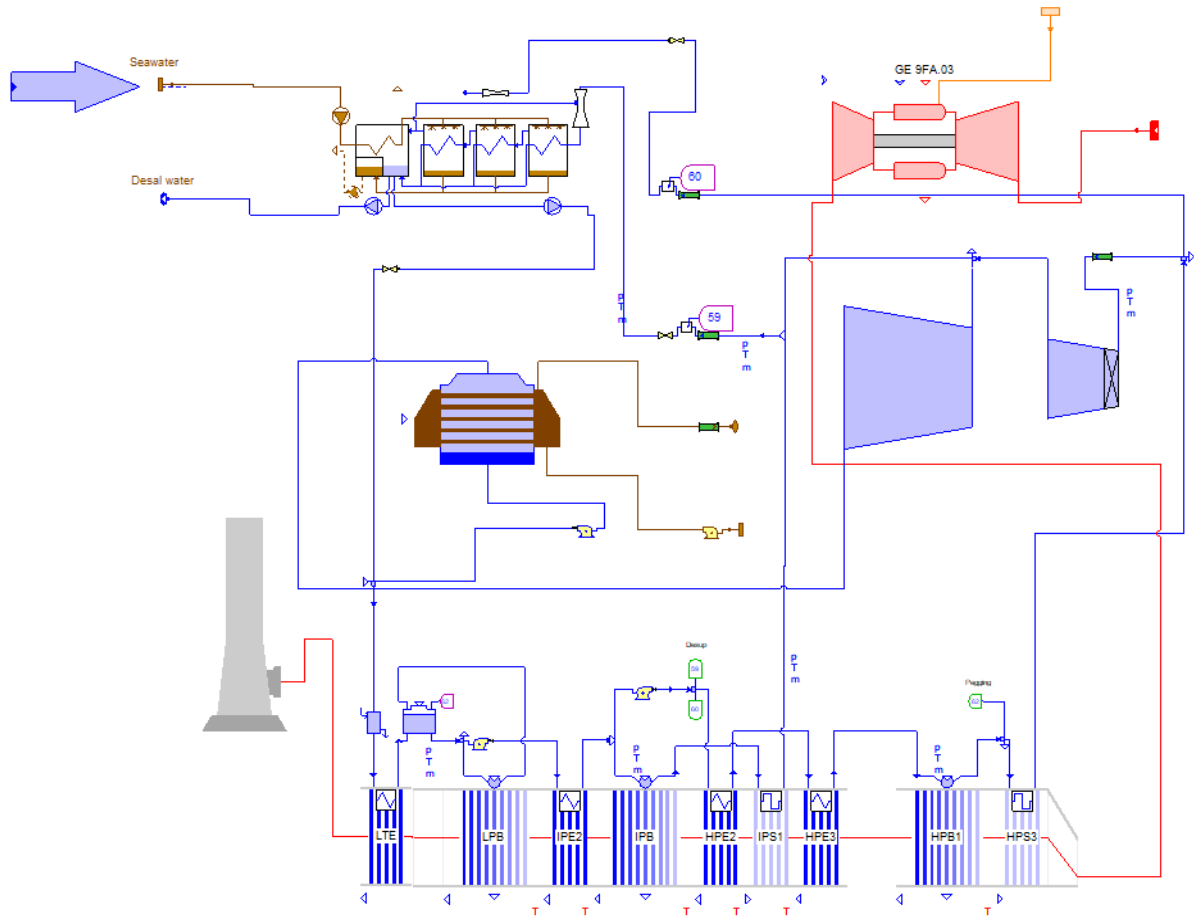


Figure 2. Combined cycle power plant with distillation process

In the MED process, sea water is sprayed onto horizontal tubes passing the water vapour in the form of a thin film to form a spray. The thin film layer outside the tube condenses into the vapour inside the tube as the water evaporates. The non-volatile portion of the seawater in the first process is fed into the second process in such a way that a thin film layer is formed again. The process usually has 8-16 processors. The process is operated between 65-70 °C. In the desalination plant, energy, membrane, wear, chemicals and maintenance are the main costs. For the real scale design of membrane processes, input water quality values, target effluent quality values, percentage of retention of the pollutants in the membrane (rejection), water recovery rate, water flux, and drive power (pressure difference) values should be known. Figure 3. shows Multi-Effect Distillation (MED) desalination cycle schematic.

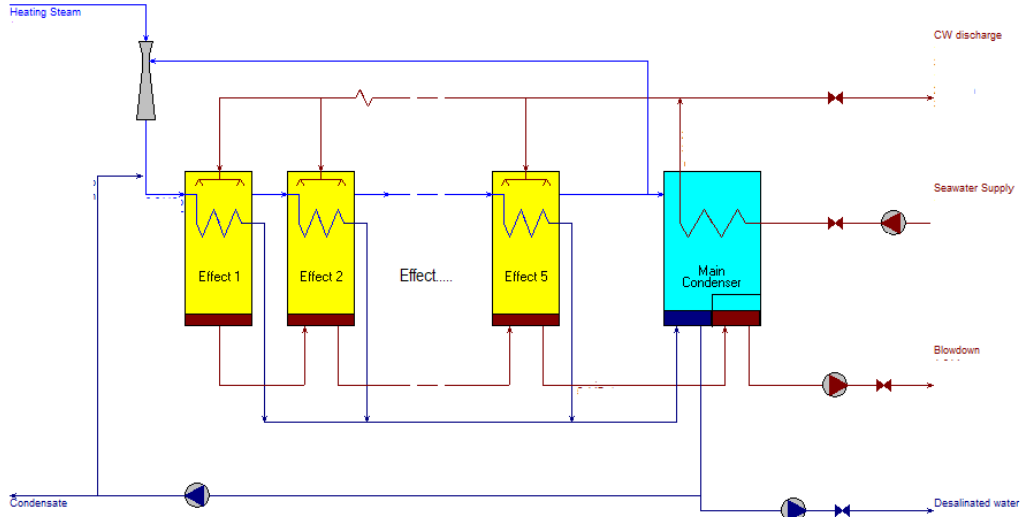


Figure 3. Multi-effect distillation (MED) desalination cycle schematic

IV. CONCLUSIONS

Water quality is a serious concern for a number of reasons. Due to unplanned and rapid urbanization, excessive use of natural resources, untreated industrial and domestic wastewater discharge into fresh water sources and into the sea, inadequate wastewater treatment plants and non-point agricultural pollution are among these reasons. Significant efforts are made to increase the wastewater collection and treatment capacity for people living in large cities. In the world and in our country, the depletion of water resources and the availability of existing water resources make the issue of water supply more prominent. The salt content from the sea to the sea varies greatly. Salinity generally increases as the depth increases in seas, but this increase is not much. Density of sea water changes depending on pressure, salinity and water temperature.

Depending on the flow of fresh water to the sea, the salt content may be high or low. The main salts of sea water are salt, chlorine, sodium, sulphates, magnesium, calcium, potassium, bicarbonate and bromine. Desulfurization involves the removal of salts and biological materials from sea water to obtain fresh water. Multi-process distillation has long been used for industrial distillation. In the MED process, high heat transfer rates can be obtained depending on the thin film boiling and condensation conditions. At the same time evaporation occurs at a uniform temperature at each effect. MED facilities that use polymer doped sediment control are usually made for low temperature operation. Table 1. shows plant summary and heat balance results.

Table 1. Combined cycle plant design results

Plant Summary (Heat Balance Results)		
Ambient pressure	bar	1,038
Ambient temperature	°C	33
Ambient RH	%	74
Gross electric efficiency(LHV)	%	45,15
Gross heat rate(LHV)	kJ/kWh	6895
Net electric efficiency(LHV)	%	43,88
Net heat rate(LHV)	kJ/kWh	7180
Net electric efficiency(HHV)	%	38,96
Net heat rate(HHV)	kJ/kWh	8186
Desalinated Water		
Mass flow (per unit)	kg/s	189,8
Volume flow (total, MIGD)	MIGD	12
Volume flow (m ³ /day per unit)	m ³ /day	51156
Seawater Discharge		
Salinity	%	3,22
Mass flow (per unit)	kg/s	2482

As spongy particle cleaning cannot be performed, acid cleaning should be done more frequently than MSF process. In large capacity plants, it is seen that thermal methods are more economical in terms of operation and investment, especially in regions where energy is cheap, large capacity desalination plants are more economical. Small-capacity membrane filtration methods are more economical in terms of operating and investment costs from thermal systems in terms of both economic and flexible use. In the desalination plant, investment, operating costs and plant capacity are important for process selection. The first object in the process design is to minimize investment costs and thus reduce the amount of thermal and mechanical energy need, equipment and materials required for construction. Modules and other parts of the plant must have structural requirements. Pre-treatment of seawater is essential for this method to be used without any obstacles.

REFERENCES

- [1] Mohamed, E.S., Boutikos, P., Mathioulakis, E., Belessiotis, V., (2017). Experimental evaluation of the performance and energy efficiency of a Vacuum Multi-Effect Membrane Distillation system, *Desalination*, 408, pp. 70-80
- [2] Chacartegui, R., Sanchez, D., Di Gregorio, N., Jiménez-Espadafor, F. J., Munoz, A., & Sanchez, T., (2009). Feasibility analysis of a MED desalination plant in a combined cycle based cogeneration facility, *Applied thermal engineering*, 29(2-3), 412-417.
- [3] Almutairi, A., Pilidis, P., Al-Mutawa, N., & Al-Weshahi, M. (2016). Energetic and exergetic analysis of cogeneration power combined cycle and ME-TVC-MED water desalination plant: Part-1 operation and performance, *Applied Thermal Engineering*, 103, 77-91.
- [4] Sayyaadi, H., & Saffari, A. (2010). Thermoeconomic optimization of multi effect distillation desalination systems, *Applied Energy*, 87(4), 1122-1133.
- [5] Hosseini, S. R., Amidpour, M., & Shakib, S. E., (2012). Cost optimization of a combined power and water desalination plant with exergetic, environment and reliability consideration, *Desalination*, 285, 123-130.
- [6] Voutchkov, N., (2013). *Desalination Engineering: Planning and Design 1st Edition*, McGraw-Hill Education, 1 edition, New York.
- [7] Sommariva, C., (2010). *Desalination and Advanced Water Treatment Economics and Financing*, Balaban Desalination Publications, Rome - Italy.
- [8] Al-Mutaz, I., Al-Namlah, A., (2004). Characteristics of dual purpose MSF desalination plants, *Desalination*, 166, 287-294.

Araştırma Makalesi - Research Article

Investigation of Lauric Acid Conversion with the STA Incorporated Heterogeneous Catalysts in the Liquid Phase Reaction

Veli ŞİMŞEK^{1*}, Kırali MÜRTEZAOĞLU²

Geliş / Received: 15/04/2019

Reviz / Revised: 29/05/2019

Kabul / Accepted: 30/05/2019

Abstract- In this study, firstly the synthesis of acidic catalysts was carried out by loading the active compound silicotungstic acid(STA) with dry (W/Si:10-50%) and wet (W/Si:10%) impregnation methods into MCM-41 support material. These synthesized catalysts were used in the production of mono-di and tri laurin. The amount of active substance in the synthesized catalysts was determined by the ratios of tungsten in STA and silicon in MCM-41 structure. Moreover, W/Si: 10% by weight of STA was applied to the support material after the calcination process was loaded by dry impregnation method. Bronsted acid (BA) and Lewis acid (LA) regions of synthesized catalysts were determined by DRIFT analysis. The catalytic activities of the catalysts were determined by a glycerol-lauric acid esterification reaction in a batch reactor. The effect of calcination and active compound ratio with reaction temperature on the lauric acid conversion and mono-di and tri laurin selectivity was investigated. Furthermore, the esterification reaction of glycerol with lauric acid was carried out under the same conditions in the presence of a commercial catalyst Amberlyst-21. The experimental results of the synthesized catalysts and Amberlyst-21catalyst were compared. The synthesized catalysts after comparison were observed that have high catalytic activity. Lauric acid conversion and monolaurin selectivity have been obtained with W/Si: 10% catalyst (dry impregnation method) 3/3/1 molar ratio at383K after 6 hours 95% and 88%, respectively. XRD analysis was conducted on calcined-uncalcined MCM-41support material. Moreover, the structural properties of synthesized catalysts after the esterification reaction were determined by SEM-MAPPING analysis methods.

Key Words- STA, Mono-Di And Tri Laurin, Lauric Acid, MCM-41, Dry-Wet Impregnation

I. INTRODUCTION

Biodiesel is known as an important fuel alternative due to the use of renewable resources in its production. As biodiesel production has become widespread in recent years, researches have focused on the evaluation of glycerol as a byproduct during production. Glycerol is a byproduct occurs as 10% of biodiesel produced. In order to make biodiesel production economical and sustainable, it has become inevitable to evaluate the glycerol obtained [1]. When the studies about the evaluation of glycerol are examined, it is seen that glycerol has been used as a raw material in the etherification and esterification reactions in recent years [2]. Esters are formed by the change of the OR group in place of the OH group of carboxylic acids [3]. Homogeneous or heterogeneous acidic catalysts are used in industrial scale ester production. The acid catalysts used in the reactions catalyze the reaction by protonating to the carboxylic acid [4]. Homogeneous catalysts are generally used in esterification reactions [5]. Mineral acids such as H₂SO₄, NaOH, HCl, and HI are conventional homogeneous catalysts [5-8]. The interest in heterogeneous catalysts has recently increased due to the rapid dissolution of homogeneous catalysts in the reaction medium, corrosion, environmental pollution and the need for a separation process [5, 8, 9]. DVB (divinylbenzene), amberlyst groups [8, 10], acidic zeolites and heteropoly acid catalysts are frequently used as solid acid(heterogeneous)catalyst [10].

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: veli.simsek@bilecik.edu.tr, (<https://orcid.org/0000-0002-3518-1572>)

Department of Chemical Engineering, Bilecik Şeyh Edebali Univ., Bilecik, Turkey

²İletişim: kirali@gazi.edu.tr, (<https://orcid.org/0000-0002-0810-2816>)

Department of Chemical Engineering, Gazi Univ., Ankara /Turkey

Glycerol, a wide constituent of all animal and vegetable fats, is trivalent alcohol, in which oils are esterified with fatty acids, mostly in the form of glycerides. It is also produced in biodiesel and today plays an important role in meeting the industrial need. In addition to the different applications for technical purposes, especially in the processing of food materials and in the production of drugs, fat-derived glycerol is preferred [11]. Furthermore, glycerol is a very hygroscopic (moisture-absorbing) material, it prevents drying in the environment where it is used, especially in the cosmetic industry has become widespread usage. The most important feature sought in glycerol, which must be of very high purity, is that it contains absolutely no water [11]. And, glycerol esters have a common different of applications such as solvents, emulsifying, etc. The monoglyceride obtained as the desired product has applications as oiling agents in the food industry, as lubricants for plastics, pharmaceutical, and cosmetics industries and as emulsifiers in food [12, 13]. Monoglyceride selectivity has been obtained higher than 75% by esterification of glycerol with lauric acid and oleic acids [14].

There are several studies of glycerol esterification using different catalysts. Glycerol conversion and triacylglycerol selectivity reached 97% and 13% with Amberlyst-15 at 383 K after 30 min. [15]. Another study, on the other hand, found a glycerol conversion of 97.1% with the highest triacylglycerol selectivity (43.2%) over acidic Amberlyst-15, after 6 hours of at 383 K and using 9:1 acetic acid to glycerol molar ratio [16].

Lauric acid (dodecanoic acid) is a solid powdered fatty acid, which is saturated with 12 carbon atoms chain, is white in color, weakly laurel oil or soap smells. Lauric acid is a component of triglyceride, and about half of the lauric acid in the industry is derived from coconut oil and laurel oil [17].

In this study, it was aimed to evaluate the high acidic silicotungstic acid (STA)based catalysts synthesized by dry and wet impregnation method in the esterification reaction of the biodiesel by-product glycerol with lauric acid. The impregnation synthesis method is the fast, cheap and controlled method to prepare catalysts [18]. STA is an HPAs. Solid catalysts such as HPAs [19], metal oxides [20], zeolites [21] and ion-exchange resins [22], and have been used in liquid phase esterification reactions. Furthermore, HPAs have high Brønsted acid sites, which allow their use in etherification and esterification reactions [23]. HPAs are known for their high activity for esterification, etherification, etc. reactions. Although they have several disadvantages such as low surface area and high solubility in polar solvents such as alcohol, they are preferred in esterification reactions due to their chemical properties and their high catalytic activity [17, 24]. The STA needs support to increase its thermal stability in liquid phase reactions. The MCM-41, is selected as a support material in this study, since it has a large surface area, thermal stability, and very narrow pore size distribution and pore diameter can be adjusted between 15 and 100 Å. MCM-41 mesoporous, nano-structured catalysts were first synthesized by Mobil research group in 1992 [14]. The pore shapes of MCM-41 are two-dimensional hexagonal [17, 25, 26]. Therefore, mesoporous support materials can be utilized as a catalyst carrier [27] in various applications such as drug delivery systems[28]. However, pure MCM-41 mesoporous molecular sieves have disadvantages such as low hydrothermal stability, low catalytic activity and poor surface acidity in oil processing. For these reasons, researches have focus on MCM-41 modification in last two decades [16, 29].

Many catalysts with different properties are widely used to obtain industrial products. Catalysts are used to increase the efficiency of the reactants as well as to reduce the time required to complete the reaction and to ensure that processes are more economical and applicable. Studies with the catalysts in the literature are generally directed to the synthesis of catalysts which exhibit high catalytic activity, and also physically and thermally stable and reusable. Esterification reactions with equilibrium limitation are slow. Homogeneous or heterogeneous catalysts are used to improve esterification reactions and increase productivity. Recently, heterogeneous catalysts are preferred due to their easier removal from the reaction media and their corrosion free nature [9, 30].

In this study, the catalytic activities of the synthesized catalysts were investigated by esterification reaction of lauric acid with glycerol (glycerol/ lauric acid/ ethanol) in a batch reactor. The effect of temperature on the conversion of lauric acid to mono-di and trilaurin selectivity in esterification reactions was investigated. One of the important aims of this study is to investigate the effect of calcined and un-calcined MCM-41 support material porosity and surface area on lauric acid conversion and mono-di- tri laurine selectivity. Another purpose of this paper was to determine whether the catalysts synthesized by using in the same reaction conditions, since the commercially available Amberlyst-21 catalyst has an industrial field of usage. In addition, the effect of esterification reaction on synthesized catalysts was investigated by SEM and MAPPING analysis methods.

II. MATERIAL AND METHOD

A. Synthesis of MCM-41 Support Material

In this study, MCM-41 support material was first synthesized by hydrothermal method. 13.2 g of cetyltrimethylammonium bromide (CTMABR; $C_{19}H_{42}BrN$ -Merck) are dissolved in 87 ml of deionized water and the temperature of the resulting solution is kept constant at 30°C and stirred continuously. This process is continued until a clear solution is obtained. The silica source (Sodium silicate- Merck, Na_2SiO_3 ; containing 27% SiO_2) is then added drop wise to the solution. After adjusting the pH of the solution to around 11 (H_2SO_4 -Merck), it is stirred for an hour. The mixture is then placed in steel autoclave with a Teflon container and left in the oven at a temperature of 120 °C for 96 hours. After 96 hours, filtration is performed to separate the sample from the gel. The solid sample obtained after the filtration is washed with distilled water by vacuum filtration until the pH value is stabilized at about 7. Then the sample is dried at 30 °C for 18 hours. In the final step of the synthesis, the calcination is carried out in a quartz reactor in a dry air environment, at 550 °C during 6 hours [30]. The STA was loaded with dry and wet impregnation methods before and after calcination into support material.

B. Synthesis of STA/MCM-41 Catalysts

The STA/MCM-41 catalysts were synthesized by modification of the procedures of Varışlı (2007). The schematic presentation of the synthesis of STA/MCM-41 catalysts is shown in Figure 1. The active compound ratio in the STA/MCM-41 catalysts was the mass ratio of the tungsten in the STA structure to the silicon in the sodium silicate structure. Within the scope of the study, the active compound ratios for the STA/MCM-41 catalyst were determined as W/Si: 10, 50%. Synthesis steps are given as follows:

Synthesis Steps:

1. Calcined or non-calcined MCM-41 support material is mixed with 12 ml deionized water at 200rpm and at 30°C.
2. Wet impregnation: STA was dissolved in distilled water before it was added to the support solution. Then, the solution of STA was added drop wise to the support material solution.
3. Dry impregnation: STA was added directly to the support solution.
4. The solidified sample is allowed to dry for 24 hours at 70°C, 21 hours at 96°C and then at 120°C for 2 hours (to remove water in the structure of synthesis catalysts).
5. Calcination of the sample is carried out at 350°C (heat rate, 1°C/a minute) for 6 hours using a quartz glass tube with a membrane filter [32].

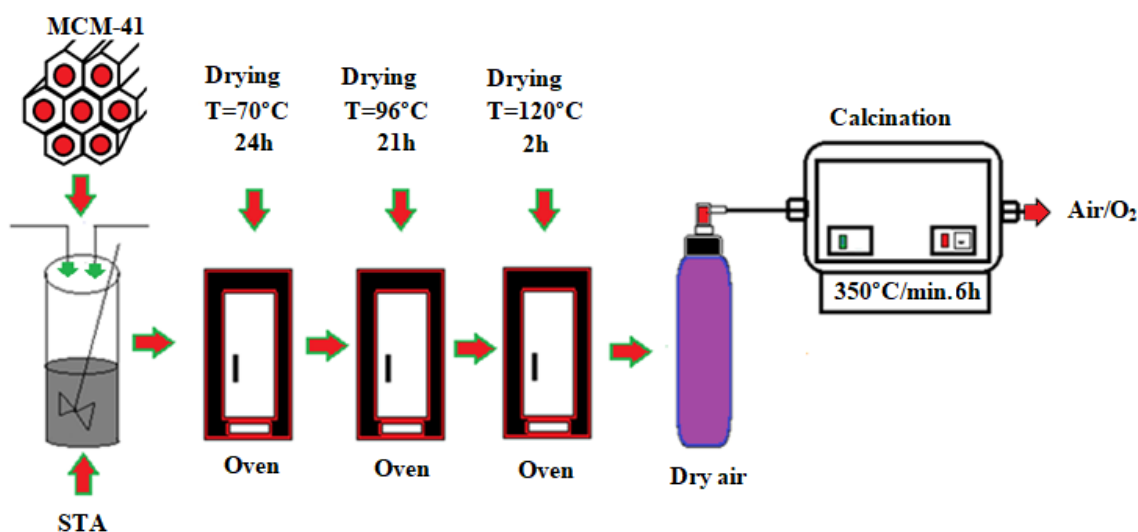


Figure 1. The synthesis procedure of catalyst STA/MCM-41 (W/Si: 10, 50% un-calcined dry impregnation, W/Si: 10% calcined dry impregnation, W/Si: 10% un-calcined wet impregnation)

C. Characterization Studies

Surface structures characterization of the support material and catalysts, and elemental analysis of the were carried out using the Zeiss Supra V40 SEM instrument after platinum coating, by "SEM and MAPPING" analysis methods. In addition, BA acid and LA sites of the catalysts were investigated by using DRIFT analysis method after catalyst loading XRD samples of calcined and un-calcined of MCM-41 support materials were obtained by using Panalytical Empryan HT-XRD instrument. The analysis conditions of XRD were CuK α radiation ($\lambda=1.540\text{\AA}$) with 40 kV (current), 30V(tension), 0.066 step size and scanning angle (2θ) from 0° to 50° .

D. Catalytic Activity Measurement

The catalytic activities of the synthesized catalysts and the commercial catalyst Amberlyst-21 were investigated in the esterification reaction with glycerol and lauric acid reactants. The reaction experiments were carried out in a batch reactor system operating at autogenic pressure. The reaction time was determined to be 6 hours for glyceride production. The experimental conditions of the reactions are given in Table1.

Table 1. Experimental conditions used in the production of glycerides.

Catalyst	Amount of catalyst(g)	Temperature (K)	Feed molar ratio	Run
Amberlyst-21	0.4	383	3/3/1	1
% 10*	0.4	383	3/3/1	1
% 10**	0.4	383	3/3/1	1
% 50*	0.4	383	3/3/1	1
% 10***	0.4	383	3/3/1	1
% 10*	0.4	413	3/3/1	1

Un-calcined dry impregnation*, Calcined dry impregnation**, Un-calcined wet impregnation***

Analysis of the product and reactant mixture taken at certain time intervals during the reaction experiments were injected into the Shimadzu GC-2010 Gas Chromatograph and the conversion and selectivity values were determined (the operating conditions of the GC device are given in Table 2.). The esterification reaction with lauric acid by glycerol (Eq.1-3) is affected by 3 parallel reactions.



The conversion factor was calculated for the conversion of lauric acid and mono, di, and trilaurin selectivity and the calibration factors are based on this factor. The obtained factors were used to calculate lauric acid conversion and mono, di and trilaurin selectivity. The following equations were used for the conversion and product selectivity calculations. (Eq.4-7) [17].

$$\text{Conversion \%} = [(C_M + 2C_D + 3C_T)/(C_M + 2C_D + 3C_T + C_A)] \times 100 \quad (4)$$

$$\text{Monolaurin selectivity \%} = \left[\frac{C_M}{(C_M + 2C_D + 3C_T)} \right] \times 100 \quad (5)$$

$$\text{Dilaurin selectivity \%} = \left[\frac{(2C_D)}{(C_M + 2C_D + 3C_T)} \right] \times 100 \quad (6)$$

$$\text{Trilaurin selectivity \%} = \left[\frac{(3C_T)}{(C_M + 2C_D + 3C_T)} \right] \times 100 \quad (7)$$

Here, C_M , C_D , C_T , and C_A correspond to mono-laurin, di-laurin, tri-laurin, and lauric acid concentrations, respectively [17]. Concentrations were calculated separately with "response factors (RF)" for each product and reactant. In the calculation of the response factor (Eq.8) was used [17]:

$$RF = \left(\left(\frac{A_X}{C_{IS}} \right) \times \left(\frac{A_{IS}}{C_X} \right) \right) \quad (8)$$

Where:

A_x = Peak area of the component

C_x = concentration of the component

A_{is} = Peak area of internal standard

C_{is} = Concentration of internal standard

The reactants and product mixture were tested using Shimadzu GC-2010 gas chromatograph. Hydrogen (99.9%) and dry air (99.9%) were fed for the temperature adjustment (temperature program: 353K-603K) of flame ionization detector (FID; 653K) and the column (Restek Rtx-1, 30mx0.32mmx0.1 μ m capillary column). Nitrogen (99.9%) was used as the carrier gas at constant pressure (58, 0 KPa). The liquid reactant was injected manually (sample volume; 0.2 μ l) at a split ratio of 100% and column flow rate of 1.5 mL/ min.

III. RESULTS AND DISCUSSION

XRD analyses were performed on the synthesized support material before and after calcination. The low-angle and high-angle XRD samples of MCM-41 (calcined- un-calcined) are given in Figure 2. The main Bragg peaks of MCM-41 obtained at (100), (110), (200) and (210) reflections. According to the results, it was observed that the support materials had a regular hexagonal structure before and after calcination (Figure 2 and Figure 5(a,b) [32]. However, the low angle XRD analyses showed that shifts and intensity increase of some main Bragg peaks of MCM-41 were observed after calcination (Figure 2 b, c).

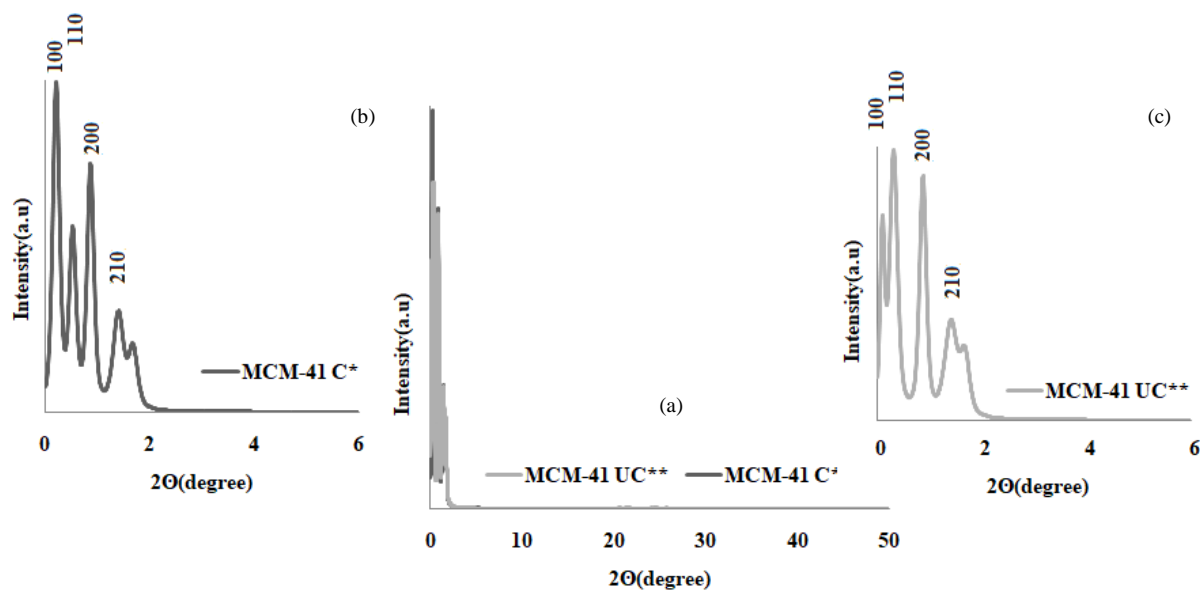


Figure 2. Low angle(b, c) and high angle(a)XRD samples of calcined and un-calcined of MCM-41 support material

In order to determine the acidic properties of the catalysts, the DRIFT analyses were performed before esterification reactions. DRIFT analyzes of the samples covered with pyridine were carried out by FT-IR (Perkin Elmer instrument in the range of 1000-2000 cm^{-1}) after an hour. The DRIFT analysis method was used to determine the BA and LA sites of the catalyst. When the DRIFT analysis results were examined, increases in acidic parts were observed due to the loading rates of the synthesized catalysts. Three distinct peaks were observed at 1485, 1540 and 1612 cm^{-1} . The peaks at wavelengths 1612 and 1478 cm^{-1} correspond to the BA and LA sites in the catalyst structure (Figure 3). The peak obtained at a wavelength of 1540 cm^{-1} shows the adsorbed pyridine in the catalyst structure [17, 24-26, 29, 33, 34].

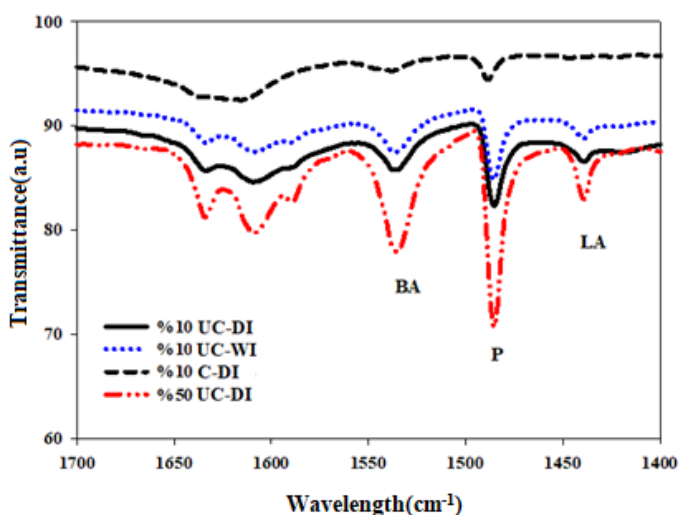


Figure3. Drift analyses of STA/MCM-41 catalysts (10% C-DI, UC-DI, Calcined and un-calcined dry impregnation, 10% UC-WI: Un-calcined wet impregnation, 50% UC-DI: un-calcined dry impregnation)

The results of SEM analyses of MCM-41 and STA /MCM-41 materials, which were synthesized before and after calcination were examined. Although the changes in the hexagonal structure of the MCM-41 support after the active compound loading were limited, an increase in these changes was observed after the esterification reaction of glycerol and lauric acid (Figure 4).

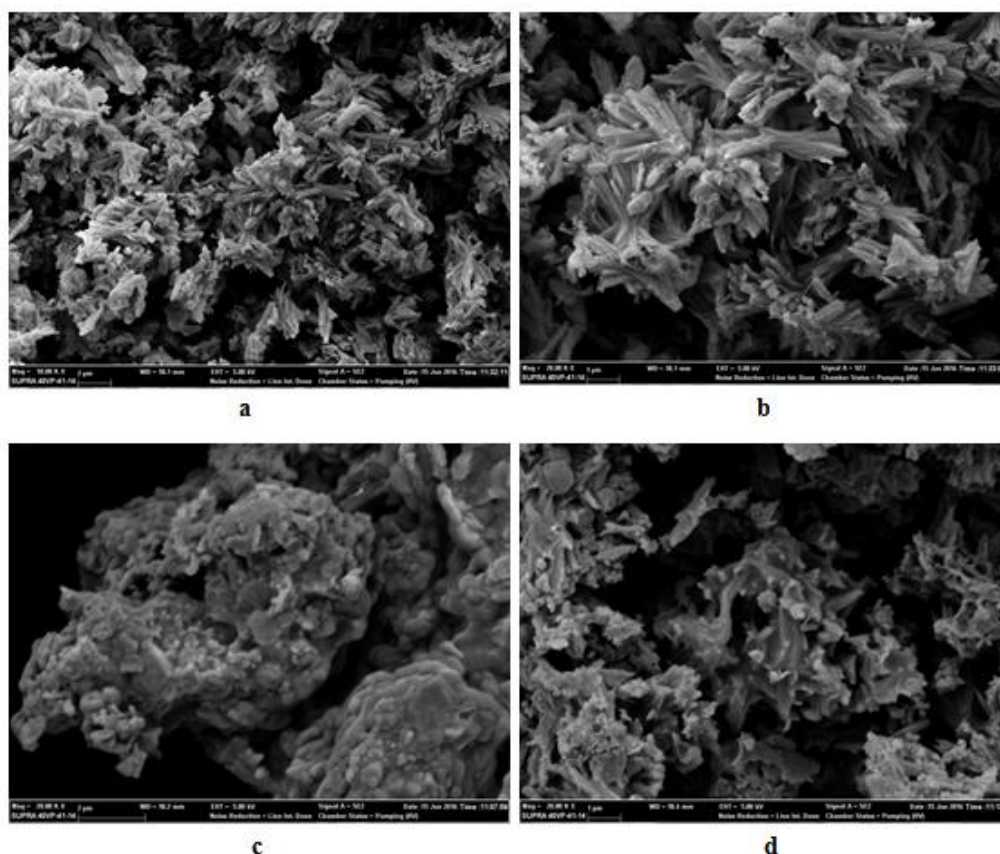


Figure4. SEM images of before un-calcined MCM-41 support material (a), (b); 10-20kx) and after glycerol/lauric acid esterification reaction of 10% STA/MCM-41 (UC-DI; un-calcined dry - impregnation) ;(c) 383K, 6 h, (d)413K, 6h).

MAPPING analyses were performed on samples obtained after glycerol/ lauric acid esterification reactions of STA/MCM-41 (W/Si: 10%, UC-DI). The reaction temperatures are 383, 413K and the reaction time is 6 hours. After the reaction, the samples were washed with 300 ml of distilled water, then dried at 6 hours at

reaction temperatures. According to the results of MAPPING analysis, it was observed that the silicon (Si) contained in support material (MCM-41) and tungsten (W) in the active compound (STA) maintained their homogeneous distribution (Figure 5).

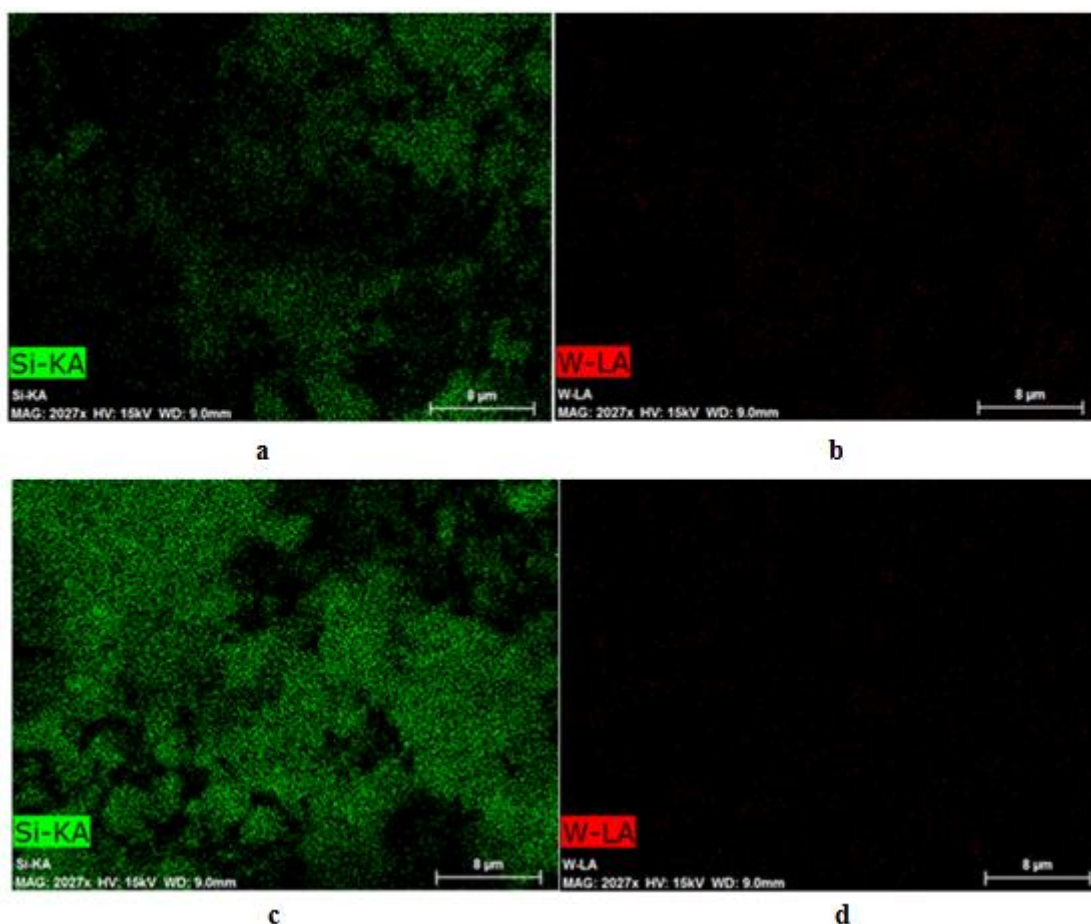


Figure 5. MAPPING images of 10% STA/MCM-41(UC-DI) after glycerol/lauric acid esterification reaction. a, b) 383K, 6 h, c, d) 413K, 6h).

The catalytic activities of the commercial catalyst Amberlyst-21 and synthesized catalysts (STA/MCM-41, W/Si: 10, 50% DI and 10% WI) were investigated in the glycerol/ lauric acid/ethanol esterification reaction. Moreover, the esterification reactions of glycerol/ lauric acid/ethanol were performed in a batch reactor at autogenic pressure. Firstly, glycerol-lauric acid esterification reaction experiments of synthesized catalysts and a commercial catalyst Amberlyst- 21 were carried out at 383K, in presence of 0.4g catalyst and molar ratios 3/3/1(glycerol/ lauric acid/ethanol). Conversion of the lauric acid and selectivity of mono-di and tri laurin after 6 hours were calculated as 93%, 88-4-8%, respectively (Figure 6-8).

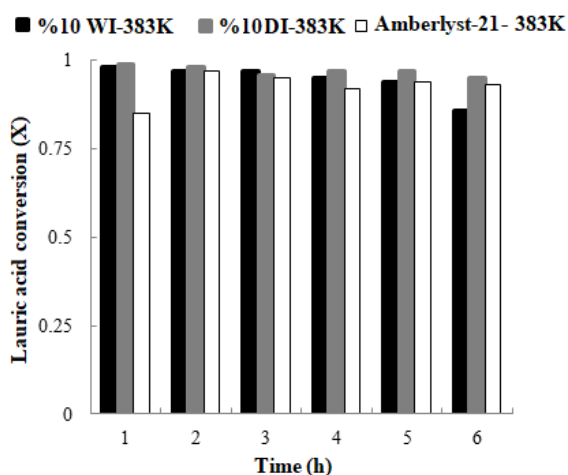


Figure6. Lauric acid conversion of synthesized catalysts and Amberlyst-21 (WI; Wet-impregnation, DI; Dry-impregnation, amount of catalyst: 0.4 g, Molar feed ratio; 3/3/1).

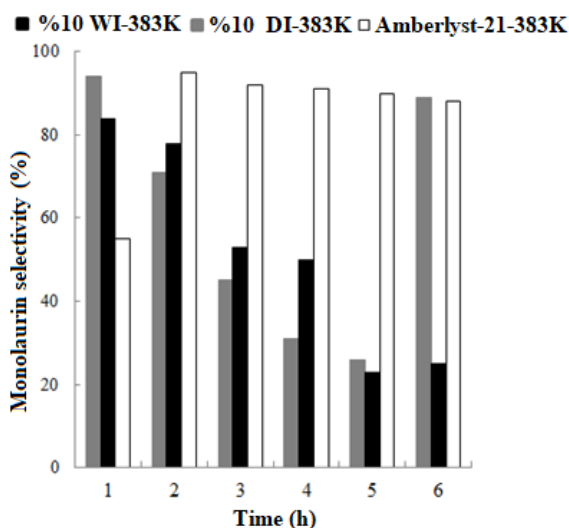


Figure7. Monolaurin of selectivity synthesized catalysts and Amberlyst-21(WI; Wet- impregnation, DI; Dry-impregnation, amount of catalyst: 0.4 g, Molar feed ratio; 3/3/1).

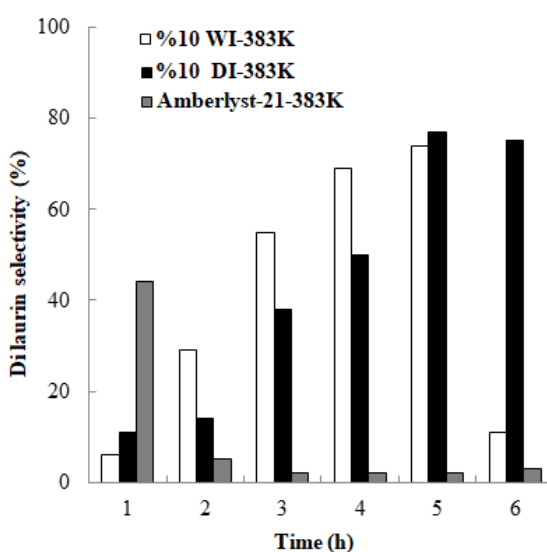


Figure8. Dilaurin selectivity of synthesized catalysts and Amberlyst-21(WI; Wet- impregnation, DI; Dry-impregnation, amount of catalyst: 0.4 g, Molar feed ratio; 3/3/1).

The effect of active compound loading ratio and calcination temperature on the conversion of lauric acid and mono-di and trilaurin selectivity were investigated. Lauric acid esterification reactions were carried out with synthesized catalysts before calcination (10%, 50% load, 383K, 0.4g catalyst, and 3/3/1 feed rate, during 6 hours). It was observed that the amount of active compound did not cause significant differences in conversion end of the 6 hours. However, significant changes in mono-di and tri laurin selectivity have been calculated (Figure 9, 10).

On the other hand, the effect of temperature on lauric acid conversion and mono-di and trilaurin selectivity was investigated in esterification reactions performed at 383 and 413K (0.4g catalyst and 3/3/1 feed rate, during 6 hours). Analysis results showed no significant change in-terms of conversion. But, significant decreases in the di-laurin selectivity have been determined. It was interesting to observe that mono-laurin selectivity increased (Figure 11, 12). However, the increase in the selectivity of tri-laurin was limited. The reason for this is the removal of water vapors formed in the reaction medium due to increasing temperature [12, 17, 30, 35]. Water in the reaction medium is an unavoidable, since it is a by-product in glycerol esterification. However, unless removed from the reaction medium, the increase in water amount as reaction proceeds results in leaching of active compounds into reaction medium and the decrease in triglyceride selectivity [36]. Its presence in the reaction medium helps to increase the rate of reverse reaction because of decreasing the selectivity of the end product. Competitive adsorption of water on active sites during reaction results in H_3O^+ formation leading to deactivation of the catalyst which is the main problem [37]. Activity decrease associated with water presence was also reported for palm oil hydrolysis [38].

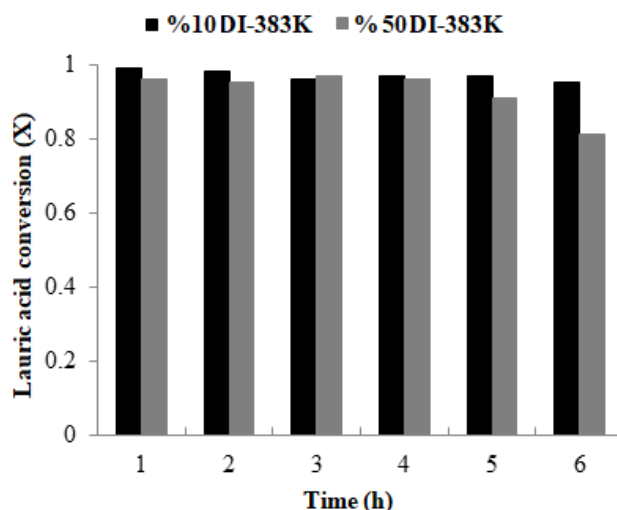


Figure9. Effect of the amount of active compound on the glycerol / lauric acid esterification reaction (DI; Dry -impregnation, amount of catalyst 0.4 g, molar feed ratio 3/3/1).

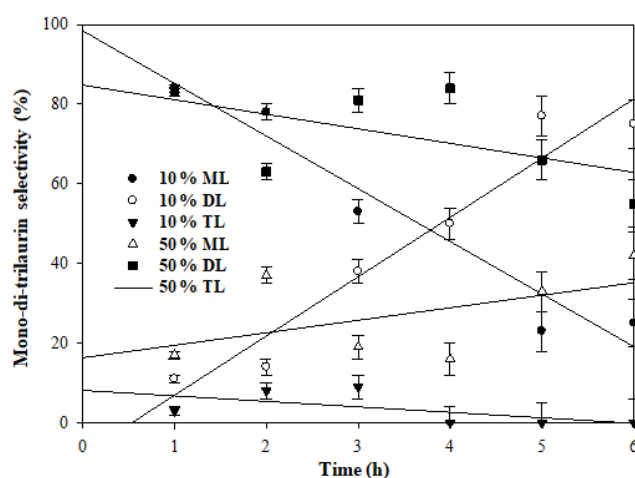


Figure10. Effect of the amount of active compound on mono-di and trilaurin selectivity (amount of catalyst: 0.4g, reaction temperature, 383K, dry impregnation before calcination).

As a result, the effect of calcination temperature on lauric acid conversion was limited. Before calcination under the same conditions, lauric acid conversions for calcined and un-calcined catalysts were 95% and 88%, respectively. There were no significant differences in lauric acid conversion in terms of active compound loading rates. Finally, there was no significant change in lauric acid conversion compared to the Amberlyst-21 catalyst, whereas the decrease in mono-laurin and an increase in di and tri laurin selectivity were observed.

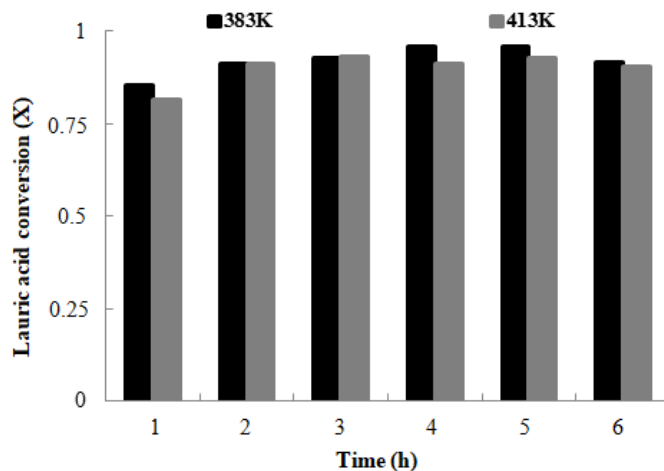


Figure 11. Effect of the reaction temperature on mono-di and trilaurin selectivity (amount of catalyst: 0.4g, reaction temperature, 383-413K, dry impregnation before calcination).

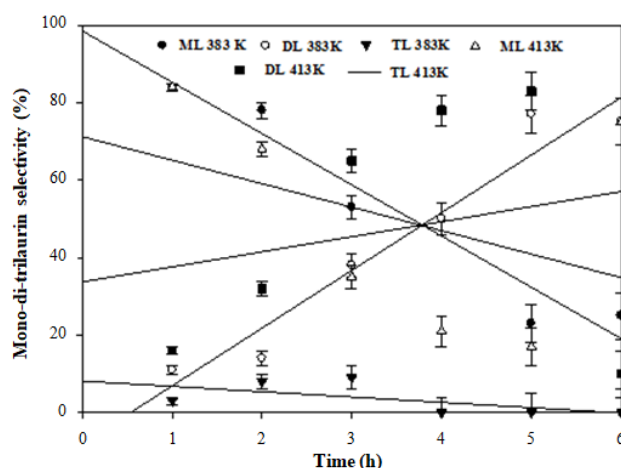


Figure 12. Effect of reaction temperature on mono-di and trilaurin selectivity (amount of catalyst: 0.4g, reaction temperature, 383-413K, dry impregnation before calcination).

IV. CONCLUSIONS

In this study, the catalytic activities of the commercial catalyst (Amberlyst-21) and synthesized catalysts were investigated in the glycerol/lauric acid/ethanol esterification reaction. According to the experimental results obtained catalytic activity was high. When the glycerol/lauric acid esterification reaction was carried out at the temperature above the decomposition temperature of the Amberlyst-21 catalyst (413K), STA/MCM-41 (10%, DI before calcination) catalyst showed significant effect on the mono-di and trilaurin product selectivity.

As a result, the effect of synthesized catalysts by different (wet-dry impregnation) methods on lauric acid conversion and mono-di and tri laurin selectivity was determined to be limited. Similarly, the effect of the calcination temperature applied to the support material was limited to the lauric acid conversion and the mono-di and trilaurin selectivity (88% after calcination 95% before calcination). When the esterification reactions of synthesized catalysts and Amberlyst-21 catalyst were compared, no significant change was observed in lauric acid conversion, whereas mono-laurin selectivity decreased and di and tri laurin selectivity increased.

ACKNOWLEDGMENTS

We would like to thank Dr. Zerrin PAT for her help. We would also like to thanks BAP (Scientific Research Council of Bilecik Seyh Edebali University), Project no. 2015-02.BSEU.03-06, for partial financial support.

LIST OF ABBREVIATION

BA	: Brønsted acid	LA	: Lewis acid
SEM	: Scanning electron microscope spectroscopy	FT-IR	: Fourier transform infrared
HT-XRD	: High-temperature X-ray diffraction	DRIFT	: Diffuse Reflectance
C _M	: Concentration of Mono-laurin	C _D	: Concentration of Di-laurin
C _T	: Concentration of Tri-laurin	C _A	: Lauric acid concentration
RF	: Response factor	W	: Tungsten
Si	: Silica	STA	: Silicotungtic acid
DI	: Dry impregnation	WI	: Wet impregnation
UC	: Un-calcined	C	: Calcined
°C	: Degree celcius		

REFERENCES

- [1] Goyal, H. B, Seal D., Saxena R. C. (2008). Bio-Fuels from Thermo Chemical Conversion of Renewable Resource, A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 504-517.
- [2] Melero, J. A., Grieken, R., Morales, G., Panioguna, M.(2007) Acidic Mesoporous Silica for the Acetylation of Glycerol Synthesis Bioadditives to Petrol Fuel, *Energy and Fuels*,21, 1782- 1791.
- [3] Hart, H., Hart, D. J., Craine, L., E. (2008). *Organic Chemistry*, 8th ed., Palme Publication, Ankara, 164-170,300-310.
- [4] Maki-Arvela, P., Salmi, T., Sundell, M., Ekman, K., Peltonen, R., Lehtonen, J. (1999). Comparison of Polyvinylbenzen and Polyolefin Supported Sulphonic Acid Catalysts in the Esterification of Acetic Acid, *Applied Catalysis A: General*, 184, 25-32.
- [5] Yin, W.L.P., Liu, X., Chen, W., Chen, H., Liu, C., Qu, R., Xu, Q. (2013). Microwave Assisted Esterification of Free Fatty Acid over a Heterogeneous Catalyst for Biodiesel Production, *Energy Conversion and Management*, 76, 1009-1014.
- [6] Helminen, J., Leppamaki, M., Paatero, E., Minkkinen, P. (1998). Monitoring the Kinetics of the Ion – Exchange Resin Catalysed Esterification of Acetic Acid with Ethanol Using Near Infrared Spectroscopy with PLS Model,*Chem. Int. Lab. Sys.*, 44, 341-352.
- [7] Poonjarersilp, C., Sano, N., Tamon, H. (2014). Hydrothermally Sulfonated Single-Walled Carbon Nano Horns for Use as Solid Catalysts in Biodiesel Production by Esterification of Palmitic acid, *Applied Catalysis B: Environmental*, 147, 726-732.
- [8] Oliviera, C., F., Dezaneti, L. M., Garcia, F. A. C., DeMacedo, J. L. Dias, J. A., Dias, S. C. L., Alvim, K. S. P. (2010). Esterification of Oleic Acid with Ethanol by 12-Tungstophosphoric Acid Supported on Zirconia, *Applied Catalysis A: General*, 372, 153-161.
- [9] Şimşek, V., Şahin, S. (2019). Characterization and catalytic performance evaluation of a novel heterogeneous mesoporous catalyst for methanol-acetic acid esterification. *Journal of Porous Materials*. May (2019) <https://doi.org/10.1007/s10934-019-00764-4>

- [10] Lilja, J., Murzin, D., Salmi, T., Aumo, J., Makü-Arvela, P., Sundels, M. (2002). Esterification of Different Acids over Heterogeneous and Homogeneous Catalysts and Correlation with the Teft Equation, *Journal of Molecular Catalysis A.Chemical*, 182-183:555-563.
- [11] Saldamlı, İ. (2007). *General Chemistry*, 3th ed, Hacettepe University Publications Ankara, 133-175.
- [12] Sakthivel, A., Nakamura, R., Komura, K., Sugi, Y. (2007). Esterification of Glycerol by Lauric Acid over Aluminium and Zirconium Containing Mesoporous Molecular Sieves in Supercritical Carbon Dioxide Medium. *J. Supercrit. Fluids*, 42, 219–225.
- [13] Diaz, I., Mohino, F., Blasco, T., Sastre, E., Perez-Pariente, J. (2005). Influence of the Alkyl Chain Length of HSO₃-R-MCM-41 on the Esterification of Glycerol with Fatty Acids. *Microporous Mesoporous Mater.*, 80, 33-42.
- [14] Diaz, I., Mohino, F., Perez-Pariente, J., Sastre, E. (2003). Synthesis of MCM-41 Materials Functionalized with Dialkylsilane Groups and Their Catalytic Activity in the Esterification of Glycerol with Fatty Acids. *Appl.Catal., A.*, 242, 161-169.
- [15] Gonçalves Valter L.C., Pinto Bianca P., Silva Joao C., Mota Claudio J.A. (2008). Acetylation of Glycerol Catalyzed by Different Solid Acids. *Catalysis Today*, 133–135, 673–677.
- [16] Zhou, L., Al-Zaini, E., Adesina A. A. (2013). Catalytic characteristics and parameters optimization of the glycerol acetylation over solid acid catalysts. *Fuel*, 103, 617–625.
- [17] Simsek, V. (2015). *Synthesis, Characterization and Investigation Catalytic Activity in the Glycerol Esterification Reaction of Acidic Catalyst*, Ph.D. Thesis, Gazi university graduate school of natural and applied sciences january, Ankara.
- [18] Deraz, N. (2018). The Comparative Jurisprudence of Catalysts Preparation Methods: I. Precipitation and Impregnation Methods. *J. Ind. Environ. Chem.* 2(1), 19-21.
- [19] Şimşek, V., Avcı, P. (2018). Characterization and Catalytic Performance of Modified SBA-16 in Liquid Phase Reaction, in *International Journal of Chemical Reactor Engineering*. 16(8): DOI: <https://doi.org/10.1515/ijcre-2017-0246>
- [20] Mutlu, V., N., Yilmaz, S. (2016). Esterification of Cetyl Alcohol with Palmitic Acid over WO₃/Zr-SBA-15 and Zr-SBA-15 Catalysts. *Applied Catalysis A: General*, 522, 194-200.
- [21] Bedard, J., Chiang, H., Bhan, A. (2012). Kinetics and Mechanism of Acetic Acid Esterification with Ethanol on Zeolites. *Journal of Catalysis*. 290, 210-219.
- [22] Hykkerud, A., Marchetti, J., M. (2016). Esterification of Oleic Acid with Ethanol in the Presence of Amberlyst 15. *Biomass and Bioenergy*. 95, 340-343.
- [23] Torabi, B., Ameri, E. (2016). Methyl Acetate Production by Coupled Esterification-Reaction Process Using Synthesized Cross-Linked PVA/Silica Nanocomposite Membranes. *Chemical Engineering Journal*. 288, 461-472.
- [24] Simsek, V., Mürtezoğlu, K. (2018). Characterizations and Catalytic Activities Investigation of Synthesized Solid-Based Heterogeneous Catalysts in the Esterification. *Anadolu Univ. J. Sci. Technol. A .Appl. Sci. Eng.*, 19, 2422-432.
- [25] Øye, G., Sjöblom, J., Stöcker, M. (2001). Synthesis, Characterization and Potential Applications of New Materials in the Mesoporous Range, *Advances in colloid and interface science*, 89-90: 439-466.
- [26] Kresge, C. T., Leonowicz, M. E., Roth, W. J., Vartuli, J. C., & Beck, J. S. (1992). Ordered Mesoporous Molecular Sieves Synthesized by a Liquid-Crystal Template Mechanism, *Nature*, 359, 710-712.
- [27] Zhang, S., Muratsugu, S., Ishiguro, N., Tada, M. (2013). Ceria-doped Ni/SBA-16 Catalysts for Dry Reforming of Methane. *ACS Catalysis*. 3(8), 1855-1864.

- [28] Boukoussa, B., Hamacha, R., Morsli, A., Bengueddach, A. (2017). Adsorption of Yellow Dye on Calcined or Uncalcined Al-MCM-41 Mesoporous Materials. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, S2160-S2169.
- [29] Zhao, O., Zhou, X., Li, Y., Li, M., Jiang, T., Yin, H., Li, C. (2009). Effect of the Thermal and Hydrothermal Treatment on Textural Properties of Zr-MCM-41 Mesoporous Molecular Sieve, *Applied Surface Science*, 255, 6397-6403.
- [30] Şimşek, V., "Investigation of catalytic Sustainability of Silica-Based Mesoporous Acidic Catalysts and Ion-Exchange Resins in Methyl Acetate Synthesis and Characterizations of Synthesized Catalysts, *Arabian Journal for Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s13369-018-3570-y> (2018).
- [31] Varışlı, D. (2007). Kinetics Studies for Dimethyl Ether and Diethyl Ether Production, Ph.D. Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, Ankara.
- [32] Şimşek, V., Pat, Z., Mürtezaoğlu, K. (2016). Synthesis and Characterization of Silica-Based Acidic Catalysts with the Impregnation Method, 1st International Black Sea Congress on Environmental Sciences. Full paper book, 1, 247-256.
- [33] Varışlı, D., Dogu, T., Dogu, G. (2010). Petrochemicals from Ethanol over a W-Si Based Nanocomposite Bidisperse Solid Acid Catalyst, *Chemical Engineering Science*, 65, 153-159.
- [34] Shanmugam, S., Viswanathan, B., Varadarajan, T.K. (2006). Synthesis and Characterization of Silicotungstic Acid Based Organic-Inorganic Nanocomposite Membrane, *Journal of Membrane Science*, 275, 105-109.
- [35] Şimşek, V., Değirmenci, L., Mürtezaoğlu, K. (2016). Synthesis of Silicotungstic Acid SBA-15 Catalyst for Selective Monoglyceride Production, *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*. Vol. 116 No: 2.
- [36] Zhu, S., Zhu, Y., Gao, X., Mo, T., Zhu, Y., Li, Y. (2013). Production of Bioadditives from Glycerol Esterification over Zirconia Supported Heteropolyacids. *Bioresource Technol.*, 130, 45-51.
- [37] Oliviera, J.F.G., Lucena, I.L., Saboya, R.M.A., Rodrigues, M.L., Torres, A.R.E.B., Fernandes, F.A.N., C.L. Cavalcante, Jr. (2010). Biodiesel Production from Waste Coconut Oil by Esterification with Ethanol: The Effect of Water Removal by Adsorption. *Renewable Energy*, 35, 2581-2584.
- [38] Gofferje, G., Stabler, A., Herfellner, T., Schweiggert-Weishz, U., Flöter, E. (2014). Kinetics of Enzymatic Esterification of Glycerol and Free Fatty Acids in Crude *Jatropha* Oil by Immobilized Lipase From *Rhizomucor Miehei*. *J. Mol. Catal. B Enzym.* 107, 1-7.

Araştırma Makalesi - Research Article

Bilecik İli Hayvansal Atıklarının Biyogaz Potansiyelinin İncelenmesi

Investigation of Biogas Potential of Animal Wastes in Bilecik

Süheyla YEREL KANDEMİR^{1*}, Emin AÇIKKALP²

Geliş / Received: 20/05/2019

Reviz / Revised: 21/06/2019

Kabul / Accepted: 24/06/2019

Öz- Ülkemizde kaynak bakımından önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından bir tanesi de biyogazdır. Bilecik ili hayvancılığın yaygın olarak yapıldığı illerden bir tanesidir. Bu çalışmada ilk olarak, Bilecik ilindeki hayvanların sayısı ve atıklarının 2011- 2017 yılları arasındaki değişimi tespit edilmiştir. Bu veriler göz önüne alınarak hayvansal atıklardan elde edilebilecek biyogaz ve biyogazdan üretililecek elektrik enerjisi eşdeğeri belirlenmiştir. Bilecik'in 2011 yılında 1,017,522 tane ile en az hayvan sayısına sahip olduğu yıl, 2017'nin ise 4,609,707 tane ile en fazla hayvan sayısına sahip yıl olduğu görülmüştür. Veriler analiz edildiğinde, Bilecik ilinin 2017 yılında en fazla biyogaz potansiyeli ve en fazla elektrik enerjisi eşdeğerine sahip olduğu görülmüştür. Daha sonra yıllık elektrik enerjisi eşdeğerleri yıllık elektrik tüketimi değerleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak biyogazdan elde edilen yıllık elektrik enerjisi eşdeğerlerinin Bilecik ilindeki toplam yıllık elektrik tüketimini karşıladığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler- Biyogaz, Yenilenebilir Enerji, Hayvansal Atık, Bilecik

Abstract- One of the important renewable energy sources in our country is biogas. Bilecik is one of the provinces where animal husbandry is widespread. In this study, firstly the number of animals in Bilecik province and the change of their wastes between 2011- 2017 were determined. Based on these data, biogas obtained from animal wastes and electrical energy equivalent produced from biogas were determined. Bilecik had the least number of animals in 2011 with 1,017,522 and 2017 had the highest number of animals with 4,609,707. When the data is analyzed, it is seen that Bilecik has the highest biogas potential and the highest electrical energy equivalent in 2017. Then, annual electrical energy equivalents are compared with annual consumed electrical energy values. As a result, it is seen that the annual electrical energy equivalents obtained from biogas meet the total annual electricity consumption in Bilecik.

Keywords- Biogas, Renewable Energy, Animal Waste, Bilecik

I. GİRİŞ

Dünya nüfusunun artması ve buna bağlı olarak sanayinin gelişmesi enerji kaynaklarına olan talebi artırmıştır. Ancak günümüzdeki enerji üretiminin bu enerji talebini sağlayamamasından dolayı enerji fiyatları gittikçe artmaktadır. Bu da enerjinin gittikçe daha pahalı olması anlamına gelmektedir [1-2].

Dünya nüfusu, küresel ısınmayla mücadele, enerji açığını kapatmak ve çevre sorunlarının çözümü için yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarına ihtiyaç duymaktadır. Günümüzde tüm ülkeler bu sorunların en aza indirgenmesi için çalışmalar yapmakta ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmektedirler [3].

Yenilenebilir enerji kaynakları içerisindeki enerji kaynaklarından biri de biyokütledir. Biyokütle ürünlerinden bir tanesi biyogazdır. Çevresel ve sağlık sorunları meydana getiren organik atıkların belirli işlemlerden geçerek zararsız hale getirilmesi ve enerjiye dönüştürülmesini sağlayan biyogaz teknolojisi yenilenebilir enerji sektöründe önemli bir yere sahiptir [4].

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: suheyla.yerel@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-5356-1467>)

Endüstri Mühendisliği Bölümü, Bilecik Şeyh Edebali Üniv, Gülümbe Kampüsü, Merkez, Bilecik

²İletişim: emin.acikkalp@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-4056-5383>)

Makine Mühendisliği Bölümü, Bilecik Şeyh Edebali Üniv, Gülümbe Kampüsü, Merkez, Bilecik

Araştırmalar biyogaz üretiminin, M.Ö. 10. yüzyılda Asurlulara ve M.S. 16. yüzyılda İranlılar'a kadar geri gittiğini bildirmektedir. Günümüzde ise, biyogaz üretimi tarımsal atıklar, hayvansal atıklar gibi organik atıkları yok etmek amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır [5-6].

Bu çalışmada, 2011-2017 yılları arasındaki Bilecik iline ait hayvansal kaynaklı atıklardan elde edilebilecek biyogaz potansiyelleri ve elektrik enerjisi eşdeğerleri incelenmiştir. Daha sonra elektrik enerjisi eşdeğerleri Bilecik ilindeki yıllık elektrik tüketim miktarları ile karşılaştırılmıştır.

II. BİYOGAZ KAYNAKLARI VE ÖZELLİKLERİ

Biyogaz üretimi için kullanılan malzemeler, hayvansal atıklar, bitkisel atıklar ve endüstriyel atıklar olmak üzere üç başlık altında incelenebilir [7]. Bunlar; hayvansal atıklar (hayvancılık yapılarak elde edilen atıklar ve hayvan gübreleri), bitkisel atıklar (bahçe ve yemek atıkları) ve endüstriyel atıklardır (zirai faaliyetler sonucu oluşan atıklar, orman ve kağıt endüstrisinden meydana gelen atıklar, deri ve tekstil endüstrisinden oluşan atıklar, gıda ve yağ endüstrisinden elde edilen atıklar, evsel katı atıklar, atık su arıtma tesisi atıkları).

Biyogaz üretiminin birçok amacı olmakla birlikte bunlardan bazıları aşağıda verilmiştir. Bunlar; enerji elde edilmesi, patojen giderimi sağlanması, toprak şartlandırıcının korozif etkisinin azalmasını sağlanması, atmosferdeki metan ve amonyak miktarının azaltılmasını sağlanması, organik maddelerin değerlendirilmesini ve dezenfeksiyonunu sağlanması olarak verilmektedir [8-10].

Hayvanlardan elde edilen gübre miktarları hayvanların cinsine göre değişmektedir. Hayvan atıklarından elde edilen biyogazın potansiyelinin belirlenmesi için çeşitli yöntemler mevcuttur. Bu çalışmada, biyogaz potansiyelini belirlemek için Akbulut ve ark. [11] ve Akdeniz [12]'deki yöntemler kullanılmıştır. Bu çalışmalara bağlı olarak, 1 adet büyükbaş hayvandan 35 kg/gün, 1 adet küçükbaş hayvandan 2 kg/gün ve 1 adet kanatlı hayvandan 0.16 kg/gün yaş gübre elde edildiği kabul edilmiştir. Biyogazın elektrik enerjisi olarak eşdeğerinin belirlenmesi için 1m³ biyogazın elektrik enerjisi cinsinden değeri kullanılmaktadır. 1m³ biyogaz 4.70 kWh elektrik enerjisine eşdeğerdir [6, 13].

III. BİLECİK İLİ BİYOGAZ POTANSİYELİ

Bilecik ilindeki 2011-2017 yıllarındaki büyükbaş, küçükbaş ve kanatlı hayvan sayıları Tablo 1'de verilmiştir. Çalışmada kullanılan 2011-2017 yıllarına ait veriler Türkiye İstatistik Kurumu resmi web sitesinden alınmıştır [14]. Tablo 1'e göre Bilecik iline ait belirlenen yıllar içerisinde en fazla toplam hayvan sayısı 4609707 ile 2017 yılındayken en az hayvan sayısı 1017522 ile 2011 yılında olduğu belirlenmiştir. İncelenen tüm yıllarda kümes hayvanı sayılarının diğer büyük ve küçükbaş hayvan sayılarına göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

Tablo 1. Bilecik ilinin büyükbaş, küçükbaş ve kanatlı hayvanlarının sayısı (adet)

HAYVAN GRUPLARI	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Büyükbaş	40,358	41,956	42,240	40,181	39,198	32,499	36,071
Küçükbaş	107,449	117,350	120,280	136,363	117,520	126,810	140,137
Kümes hayvanları	869,715	1,108,221	1,249,082	1,254,876	1,796,283	2,179,332	4,433,499
Genel toplam	1,017,522	1,267,527	1,411,602	1,431,420	1,953,001	2,338,641	4,609,707

Bilecik ilindeki 2011- 2017 yılları arasındaki hayvan mevcuduna (büyükbaş, küçükbaş ve kanatlı) bağlı olarak toplam hayvan verileri yıllara göre analiz edilmiş ve biyogaz potansiyeli hesaplanmıştır. Daha sonra biyogaz potansiyeline ait hesaplama sonuçları Tablo 2'de sunulmuştur. Tablo incelendiğinde; büyükbaş, küçükbaş ve kanatlı hayvan miktarına ait gübre miktarı kullanılarak biyogaz üretilecek olursa en yüksek potansiyele sahip olan yıl 2017 olarak belirlenmiştir.

Bilecik ilinde yaşayan büyükbaş, küçükbaş ve kanatlı hayvanların, atıklarından üretilebilecek biyogaz potansiyelini belirlemek için yapılan bu çalışma göstermiştir ki son yıllarda il genelinde kanatlı hayvan sayısında ciddi bir artış meydana gelmiştir. Bilecik ilinin son yıllardaki kanatlı hayvan sayısındaki artışa bağlı olarak,

hayvan atıkları bakımından önemli bir biyogaz potansiyeline sahip olduğu görülmektedir. Tablo 2 incelendiğinde kanatlı hayvan gübrelerinden üretilebilecek biyogazın en fazla 2017 yılında ve 30,381,761 m³/yıl olduğu görülmektedir.

Tablo 2. Bilecik ilinde hayvansal atıklardan elde edilebilecek biyogaz potansiyeli

Yıl	Hayvan Cinsi	Hayvan Sayısı	Gübre miktarı (ton/yıl)	Yıllık biyogaz miktarı (m ³ /yıl)	Yıllık üretilen biyogaz (m ³ /yıl)
2011	Büyükbaş	40,358	515,574	1,4972,253	17,966,704
	Küçükbaş	107,449	78,438	8,471,279	10,165,535
	Kanatlı	869,715	52,061	4,966,633	5,959,959
2012	Büyükbaş	41,956	535,988	15,565,089	18,678,106
	Küçükbaş	117,350	85,666	9,251,874	11,102,249
	Kanatlı	1,108,221	66,338	6,328,656	7,594,387
2013	Büyükbaş	42,240	539,616	15,670,449	18,804,538
	Küçükbaş	120,280	87,804	9,482,875	11,379,450
	Kanatlı	1,249,082	74,770	7,133,063	8,559,675
2014	Büyükbaş	40,181	513,312	14,906,589	17,887,906
	Küçükbaş	136,363	99,545	10,750,859	12,901,031
	Kanatlı	1,254,876	75,117	7,166,150	8,599,380
2015	Büyükbaş	39,198	500,755	14,541,909	17,450,291
	Küçükbaş	117,520	857,89,6	9,265,277	11,118,332
	Kanatlı	1,796,283	107,525	10,257,933	12,309,519
2016	Büyükbaş	32,499	415,175	1,2056,674	14,468,009
	Küçükbaş	126,810	92,571	9,997,700	11,997,240
	Kanatlı	2,179,332	130,455	12,445,389	14,934,467
2017	Büyükbaş	36,071	460,807	13,381,836	16,058,203
	Küçükbaş	140,137	102,300	11,048,401	13,258,081
	Kanatlı	4,433,499	265,389	25,318,135	30,381,761

Bilecik ili yıllık üretilen biyogaz değerleri kullanılarak elektrik enerjisi eşdeğeri incelenmiştir. Buna ait hesaplamalar Tablo 3'de sunulmuştur. Daha sonra elektrik enerjisi eşdeğerleri Bilecik ili yıllık elektrik tüketimi değerleri ile karşılaştırılmıştır. Bilecik ili yıllık elektrik tüketimi değerleri Türkiye İstatistik Kurumu internet sitesinden alınmıştır [15]. Bilecik ili yıllık toplam elektrik enerjisi eşdeğeri (kWh) ve yıllık elektrik tüketimi (kWh) karşılaştırıldığında yıllık üretilen biyogaz miktarından elde edilen yıllık toplam elektrik enerjisi eşdeğeri (kWh) değerinin yıllık elektrik tüketimini (kWh) karşıladığı görülmektedir.

Tablo 3. Bilecik ili hayvan miktarının biyogaz ve elektrik enerjisi eşdeğeri

Yıl	Hayvan Cinsi	Yıllık üretilen biyogaz (m ³)	Elektrik enerjisi eşdeğeri (kWh)	Yıllık toplam elektrik enerjisi eşdeğeri (kWh)	Yıllık Bilecik ili elektrik tüketimi (kWh)
2011	Büyükbaş	17,966,704	84,443,509	160,233,331	1,284,686,000
	Küçükbaş	10,165,535	47,778,015		
	Kanatlı	5,959,959	28,011,807		
2012	Büyükbaş	18,678,106	87,787,098	175,661,287	1,196,465,000
	Küçükbaş	11,102,249	52,180,570		
	Kanatlı	7,594,387	35,693,619		
2013	Büyükbaş	18,804,538	88,381,329	182,095,216	127,446,000
	Küçükbaş	11,379,450	53,483,415		
	Kanatlı	8,559,675	40,230,473		
2014	Büyükbaş	17,887,906	84,073,158	185,125,090	1,371,199,000
	Küçükbaş	12,901,031	60,634,846		
	Kanatlı	8,599,380	40,417,086		
2015	Büyükbaş	17,450,291	82,016,368	192,127,267	1,514,417,000
	Küçükbaş	11,118,332	52,256,160		
	Kanatlı	12,309,519	57,854,739		
2016	Büyükbaş	14,468,009	67,999,642	194,578,665	1,487,989,000
	Küçükbaş	11,997,240	56,387,028		
	Kanatlı	14,934,467	70,191,995		
2017	Büyükbaş	16,058,203	75,473,554	280,580,812	184,287,000
	Küçükbaş	13,258,081	62,312,981		
	Kanatlı	30,381,761	142,794,277		

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada 2011-2017 yılları arasındaki Bilecik ilindeki hayvan (büyükbaş, küçükbaş ve kanatlı) atıkları kullanılarak, biyogaz potansiyeli ve elektrik enerjisi eşdeğeri incelenmiştir. Buna göre biyogaz potansiyelinin en az olduğu yıl 2011, en fazla olduğu yıl ise 2017 olarak belirlenmiştir. Biyogaz potansiyel miktarından elde edilebilecek yıllık toplam elektrik enerjisi eşdeğeri ise en fazla 2017 yılında 280,580,812 olarak hesaplanmıştır (kWh). Bilecik ili yıllık toplam elektrik enerjisi eşdeğeri (kWh) ve yıllık elektrik tüketimi (kWh) karşılaştırıldığında ise yıllık toplam elektrik enerjisi eşdeğeri (kWh) değerinin, yıllık elektrik tüketimini (kWh) karşıladığı görülmektedir.

Hayvan cinsi açısından biyogaz potansiyeli incelendiğinde ise son yıllarda kanatlı hayvan sayısında ve buna bağlı olarak biyogaz potansiyeli ve elde edilebilecek elektrik enerjisi gelir miktarında ciddi bir artış olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak, önemli bir hayvancılık potansiyeline sahip Bilecik ilinde, özellikle köylerde yaşayan vatandaşların biyogaz potansiyeli konusunda bilinçlendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Çünkü bu konuda köylü vatandaşların bilinçlenmesinin hem köylerde temiz bir ortam sağlayacağı hem de bilinçsiz olarak tezek yakılmasının önüne geçerek büyük bir potansiyelin yok olmasının engelleneceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Hammad M., Badarneh D. & Tahboub K. (1999). Evaluating variable organic waste to produce methane. *Energy Conversion and Management*, 40, 1463-1475.

- [2] Doruk, İ., & Bozdeveci, A. (2017). Denizli ilinin kırsal kesimlerinde hayvansal kaynaklı atıklardan biyogaz potansiyelinin belirlenmesi. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 7(3), 181-186.
- [3] Korkmaz, Y., Aykanat, S., & Çil, A. (2012). Organik Atıklardan biyogaz ve enerji üretimi. *SAÜ Fen Edebiyat Dergisi*, 1, 489-497.
- [4] Çağlayan, G. & Koçer, N. (2014). Muş ilinde hayvan potansiyelinin değerlendirilerek biyogaz üretiminin araştırılması. *Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2(1), 215-220.
- [5] Diya'uddeen, B.H., Daud, W.M.A.W. & Aziz A.R.A. (2011). Treatment Technologies for Petroleum Refinery Effluents: A Review. *Process Safety and Environmental Protection*, 89, 95-105.
- [6] Şenol, H., Elibol, E. A., Açikel, Ü. & Şenol, M. (2017). Biyogaz üretimi için Ankara'nın başlıca organik atık kaynakları. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6(2), 15-28.
- [7] Çanka Kılıç, F. (2011). Biyogaz, Önemi, Genel Durumu ve Türkiye'deki Yeri. *Mühendis ve Makina*, 52 (617), 94-106.
- [8] Ergün, A. & Çoldan, İ. (2004). *Yemler Yem Hijyeni ve Teknolojisi*. Ankara Üniversitesi Yayınları, Ankara, 204-207.
- [9] Oerther, D.B. (2006). *Anaerobic Treatment in the 21st Century*, Water Environment Research, 1- 450.
- [10] Hande, T. Ü. R. K., Koçer, N. N. & Hanay, Ö. K. (2015). Elazığ İli'nde Faaliyet Gösteren Tavuk Çiftliklerindeki Atıklardan Elde Edilebilecek Enerji Potansiyelinin Değerlendirilmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(1), 1-7.
- [11] Akbulut, A., Kose, R., & Akbulut, A. (2014). Technical and economic assessments of biogas production in a family size digester utilizing different feedstock rotations: Döğler case study. *International Journal of Green Energy*, 11(2), 113-128.
- [12] Akdeniz, H. Y. (2015). *Çiftlik Tipi Bir Biyogaz Enerji Santralinin Optimizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.
- [13] Gül N. (2006). *Tavuk Gübresinden Biyogaz Üretim Potansiyelinin Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- [14] Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?kn=101&locale=tr> (Erişim Tarihi: 16/05/2019).
- [15] Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), <https://biruni.tuik.gov.tr/bolgeselistatistik/degiskenlerUzerindenSorgula.do> (Erişim Tarihi: 10/06/2019).

Derleme Makalesi - Review Article

Ahşap ve Ahşap Yapıların Dünyü, Bugünü ve Yarını Past, Present and Future of Timber and Timber Structures

Özlem ÇALIŞKAN^{1*}, Erdem MERİÇ², Murat YÜNCÜLER³

Geliş / Received: 22/02/2019

Revize / Revised: 02/05/2019

Kabul / Accepted: 03/05/2019

Öz- Geçmişten günümüze, insanların barınma ihtiyacını karşılamakta kullandığı ahşap malzemesi ülkemizdeki yapı sistemlerinde son yıllarda çok fazla tercih edilmemektedir. Ülkemiz; ahşap iskeletli yapı, bu tür yapılarda kullanılan ahşap malzemesinin fiziksel ve mekanik özellikleri ile ahşap yapıların avantajları-dezavantajları konusunda yeterli bilgiye sahip değildir. Bu çalışma ile ahşap malzemesinin önemli bazı fiziksel ve mekanik özellikleri anlatılmış; ahşap yapıların Türkiye ve Dünyadaki durumu ele alınmıştır. Ahşap yapılar ile ilgili ülkemizde ve Dünyada kullanılmakta olan standartlar ve yönetmeliklerden bahsedilmiştir.

Anahtar Kelimeler- Ahşap, Ahşap Yapılar, TS 647, Ahşap Standartları

Abstract- Timber structures construction systems which used many years for housing needs, aren't preferred in our country in recent years. Our country doesn't have sufficient knowledge about timber frame construction, wooden materials, physical and mechanical properties and advantages-disadvantages of timber construction. This study describes some of the physical and mechanical properties of wooden material, situation of timber structures in Turkey and in the world, standards and codes about timber structures are used in our country and in the world.

Keywords- Timber, Timber Structures, TS 647, Codes of Timber Structures

I. GİRİŞ

Ahşabın yapı malzemesi olarak kullanılması beton ve çeliğe kıyasla çok daha eskilere dayanır. Ahşap yapıların, ilk çağlardan başlayıp günümüz yapı sistemlerine kadar uzanan gelişim süreci; ahşabın doğadan kolay bir biçimde elde edilmesi ve yapım aşamasında kolaylıkla uygulanabilmesine rağmen yavaş bir biçimde gerçekleşmiştir [1]. 19. Yüzyılda Sanayi Devrimi'nin etkisiyle teknolojik gelişmelerle beraber yeni ürünlerin yapı sektöründe kullanılması, özellikle de taş ve tuğla yığma sistemlerinin yaygınlaşması, çelik ve betonarme yapım sistemlerinin ortaya çıkıp uygulanmaya başlanması sonucu ahşabın yapılarda taşıyıcı malzeme olarak kullanılması azalmıştır [2].

Ahşap yapı sistemlerinin geliştirilmesi ve yapılarda taşıyıcı iskelet olarak daha fazla kullanılması 20. yüzyıl başlarına rastlar. Artan ve gittikçe yaygınlaşan sanayileşmenin ortaya çıkardığı ihtiyaçlar ile I. Dünya Savaşı öncesi ve savaş yıllarında değerli bir silah hammaddesi olan çeliğin yapı alanından çekilmesi, ahşap malzemesinin farklı fonksiyonlardaki yapılarda ve daha rasyonel olarak kullanılması zorunluluğunu beraberinde getirmiştir. Bu dönemde ahşap malzemesinin mekanik ve fiziksel özellikleri araştırılmış, birleşim elemanları (çivi, kama, bulon vb.) üzerinde çalışmalar yapılmış, ahşabın dış etkilere karşı korunmasını sağlayan malzeme ve yöntemler geliştirilmiştir.

*Sorumlu yazar iletişim: ozlem.caliskan@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-5272-9552>)

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bilecik Şeyh Edebali Üniv, Gülümbe Kampüsü, Merkez, Bilecik

²İletişim: erdem.meric@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-9055-5568>),

³İletişim murat.yunculer@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-7384-8825>)

Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı, Üniv, Gülümbe Kampüsü, Merkez, Bilecik

2. Dünya savaşı sırasında, her türlü iklim koşulları ve rutubete dayanıklı yapay reçine tutkalının bulunması ve ahşap yapılarda kullanılması inşaat teknolojisi açısından reform olarak kabul edilmiş ve ahşabı diğer yapı malzemeleri ile yarışır hale getirmiştir. Günümüz koşullarında statik ve mukavemet hesaplarının ihtiyaç duyacağı her türlü kesit ve uzunlukta ahşap yapı elemanlarının üretilmesini ve projelendirilmesini mümkün kılmıştır [3].

Ahşap, doğayla tamamen uyumlu olan ve geri dönüşümü kolay olan, diğer yapı elemanlarına nazaran yoğunluğuna oranla mukavemeti oldukça iyi olan, diğer yapı malzemeleriyle uyumlu ve doğru kullanıldığında çok uzun ömürlü olabilen sürdürülebilir bir malzemedir. Olumlu olan bu özellikleriyle, geleneksel Türk mimarisinde temel bir yapı malzemesi olarak yerini kısmen de olsa almıştır. Geçmişte kullanılmış olan ahşap yapı elemanları, çoğu zaman hiçbir koruyucu işlem görmemiş olmasına rağmen günümüzde dayanıklılığını koruyabilmektedir. Ahşap yapıların ayakta kalabilmesi için doğru malzeme kullanımı, malzemeyi nem koşullarından korumak, yeterli kesit alanına sahip taşıyıcı malzeme kullanmak önemlidir [4].

II. AHŞAP MALZEMENİN FİZİKSEL ve MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Tarihi yapılarda ahşap yapıların özelliklerini anlayabilmek için öncelikle fiziksel özellikleri incelenmeli ve kullanılan ahşabın yapısı ve cinsi, kimyası gibi özellikleri bilinmelidir. Ahşabın mekanik ve fiziksel özellikleri taşıyıcı yapısı açısından oldukça önem taşımaktadırlar. Zaman içinde oluşan yıpranmaların ve çürümeler gibi istenmeyen durumları anlayabilmek için fiziksel ve kimyasal özelliklerini bilerek bir koruma yöntemi tanımlanması gerekmektedir. Özellikle ahşap malzemenin dış etkenlere karşı nemden korumak, çeşitli zararlı canlılardan korumak amacıyla kimyasal boyalar kullanarak ahşabın ömrü uzatılabilmektedir [5].

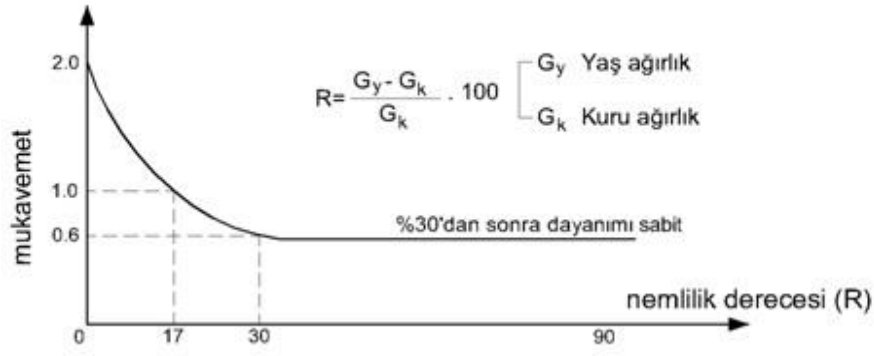
A. Fiziksel Özellikleri

Ahşap malzemesi depreme dayanımı yüksek bir yapı elemanıdır. Olumsuz hava koşulları ile kimyasal faktörlere kadar birçok etkilere maruz kaldığında bile mukavemetinde azalmanın yavaş olması ahşabı yapı elemanı olarak kullanımında önemli hale getirebilmektedir. Özellikle fiziksel özellikleri ahşabın mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Bu yüzden ahşabın sertliği, nem oranı, özgül ağırlığı ve ısı iletkenliği oldukça önemlidir.

1) Ahşap Malzemedeki Nem Oranı

Ahşap malzemenin zamanla fiziksel ve mekanik özellikleri değişebilmektedir. Özellikle renk değişimi ahşap malzemesinin yaşlı olduğunu göstermektedir. Eski tarihli ahşap yapılar ile son dönemdeki yapılan ahşap yapılar karşılaştırıldığında taşıyıcılar hakkında çıkan sonuçlara göre yapı malzemesinin, mukavemeti zamanla azalmaktadır. Ahşapta renk farklılıkları görülmeye başlanır ve buna bağlı olarak nem kaybının olması ve darbeye maruz kalması gibi nedenler ahşap malzemenin dayanımı azaltabilmektedir [6]. Ahşap malzemedeki nem miktarı ahşap malzemeyi birçok yönden etkilemektedir. İstenilen düzeydeki bir nem oranı ahşap malzemedeki birçok parametreyi doğrudan etkileyecektir [7]. Nemlilik derecesi artan bir ahşap malzemedeki mukavemette azalacaktır. Fakat nem oranının %30'u geçmesi durumunda ise mukavemette değişiklik olmamakla birlikte bu değer mukavemeti açısından sınır değer olarak kabul edilmektedir (Şekil 1) [3].

Ahşap malzemenin kullanım alanlarını azaltan sebeplerden birisi su veya su buharı ile temas ettiğinde fiziksel ve kimyasal özelliklerinde meydana gelen farklılıklardır. Ahşap malzemedeki meydana gelen hacimsel farklılıkların nedeni olan rutubet, mekanik özelliklerde değişimlere neden olur ve ahşap malzemenin kullanım ömrünü büyük oranda azaltır. Özellikle tamamen kuru hal olarak kabul edilen %0 nem oranı ile lif doygunluğu noktası olarak kabul edilen %30 nem oranları arasında hacimsel farklılıklar görülmektedir. Ahşabın şişmesi ve daralması olarak bilinen bu değişimlerin genel adı "odunun çalışması" olarak isimlendirilmektedir [8].



Şekil 1. Ahşaptaki nem ve mukavemet oranı [3]

Yukarıdaki formül ile ahşap malzemedeki nem oranı hesaplanabilmektedir. Burada R; nemlilik derecesini, G_k ; ahşabın kuru ağırlığını, G_y ; ahşabın yaş ağırlığını belirtmektedir.

2) Ahşap Malzemenin Özgül Ağırlığı

Ahşaptaki özgül ağırlık ağacın cinsine göre ve ahşabın hangi kısmından alındığına göre farklılıklar gösterebilmektedir. Ayrıca özgül ağırlığı yüksek olan bir malzemenin mekanik özelliklerinin de yüksek olması beklenmektedir. Yeni kesilen bir ahşap malzemesinin özgül ağırlığı eski kurumuş olan bir ahşap malzemedden farklıdır. Yeni kesilen bir ahşapta su miktarı %35-50 civarlarındayken kurutulmuş bir ahşap da ise bu oran %10-20 seviyelerindedir [9]. Tablo 1'de farklı ahşap sınıflandırmalarına ilişkin özgül ağırlıklar verilmiştir [10].

3) Ahşabın Isı Özellikleri

Ahşap malzemesinin temelini oluşturan selüloz ısıyı geçirmeyen malzemedir. Fakat ısının iletkenliği ahşap malzemedeki nem miktarına, cinsine ve lif doğrultusuna göre farklılıklar gösterebilmektedir [11]. Ahşap malzeme ısı etkisiyle genişleşip soğuduğu durumlarda büzülme göstermektedir. Bu genişleşme ahşap malzemenin ortotropik olması sebebiyle tüm yönlerinde farklılıklar göstermektedir. Çoğu zaman yapı elemanı olarak kullanılan ahşap malzemenin ısıl genişleşme özellikleri önemsizdir [12].

4) Ahşabın Sertlik Özelliği

Ahşap malzemenin kesilmeye ve işlenmeye karşı gösterdiği dirence sertlik denir. Sertlik üzerinde malzemenin nem oranı, malzemenin cinsi ve içyapısı gibi etmenlerin yanı sıra yoğunluk ile de sertlik doğru orantılı artmaktadır. Nem oranı arttıkça sertlik azalmaktadır. Kuru bir ağaçta sertlik oranı en üst düzeydedir [10].

Tablo1. Ağaçların özgül ağırlıklarının sınıflandırılması [10]

Sınıfı	Özgül Ağırlığı (gr/ cm ³)	Ağaç Türleri
Çok Hafif Ahşap	0.43 gr/ cm ³ kadar olanlar	İhlamur, köknar, ladin, ardıç çamı, kavak, balsa
Hafif Ahşap	0.44-0.72 gr/ cm ³ olanlar	At Kestanesi, Kırmızı Çam, Kırmızı Gürgen, Akçaağaç, Huş, Kestane, Kızılağaç, Söğüt, Sedir, Melez Çamı, Çınar, Tik, Ceviz, Karaağaç, Dışbudak
Ağır Ahşap	0.73-0.99 gr/ cm ³ olanlar	Ak gürgen, Zeytin, Meşe, Akasya, Elma, Armut, Karaçam, Maun, Pelesenk, Kiraz, Erik, Porsuk Ağacı, Abanoz, Pock Ağacı, Şimşir, Gül ağacı
Çok Ağır Ahşap	1 gr/ cm ³ 'den fazla olanlar	

B. Ahşabın Mekanik Özellikleri

Ahşap heterojen ve anizotrop bir malzeme olduğundan mekanik özellikleri diğer yapı malzemelerinden farklıdır. Bu yüzden ahşabın mekanik davranışı mikrodan makro seviyeye doğru incelenir. Ahşap, diğer heterojen

malzemelerde olduğu gibi lineer olmayan gerilme-deformasyon davranışına sahiptir. Bu sebeple ahşap malzemenin davranışını anlayabilmek için önce mikro düzeyde araştırma yapılmalıdır. Ahşabın heterojen yapısı dikkate alınarak deneysel çalışmalar ve nümerik analizlerle liflerin doğrultusu ve yapısı belirlenmelidir. Liflere paralel ve dik yönde kuvvetler uygulanarak ahşabın sertlik dereceleri ve rötre özellikleri bulunmalıdır. Deneysel ve nümerik çalışmalar yaparak ahşabın mekanik davranışını anlamak sağlıklı ahşap yapılar oluşturmak açısından oldukça önemlidir [13]. Ahşap iki farklı kuvvete maruz kalabilmektedir. Bu kuvvetler, liflere paralel ve liflere dik yöndeki basınç ve çekme dayanımlarıdır. Ahşapta mekanik özellikler incelenirken ahşabın elastisitesi, basınç ve çekme dirençleri ile yarılma ve makaslama dayanımları da incelenmelidir [14].

Ahşap malzemenin mekanik özelliklerine, ahşabın dış kuvvetlere karşı gösterdiği direnç denilebilir. Ortotropik özellik gösteren ahşap materyalde; liflere paralel, radyal (özden kabuğa doğru uzanan) ve teğet (yıllık halkalara paralel uzanan) üç değişik yön mevcuttur. Ortotropik özelliği sebebiyle ahşabın mekanik özelliklerinin yanı sıra fiziksel özelliklerini de etkileyebilmektedir. Bu durum ahşabın elastisite ve dayanımlarının yönlerine bağlı olduğunu göstermektedir. Elastisite modülü değeri, liflere paralel yönde en yüksek değere sahip iken, radyal yönde azalır, teğetsel yönde ise küçülecektir [15].

1) Basınç Direnci

Ahşabın liflere paralel ve dik yönde gelen kuvvetlerin, ahşaba uyguladığı basınca karşı gösterdiği direnç basınç direnci denilmektedir. TS 647'ye göre basınç direnci; ahşabın liflere paralel yöndeki değerlere göre tespit edilmektedir. Ahşap malzemede liflere dik yönde basınç kuvveti çok düşük iken, liflere paralel yönde ise malzeme kolon gibi çalışacağından burkulmaya ve ezilmeye karşı oldukça dirençli olacaktır [16]. Tablo 2'de TS 647'de yer alan ağaç türlerine göre liflere dik ve paralel yöndeki basınç değerleri verilmiştir [17].

Tablo 2. TS 647'de Ağaç türlerine göre liflere dik ve paralel basınç değerleri [17]

Çalışma Şekli	Ahşap malzemenin cinsi ve sınıfına göre basınç gerilmesi değerleri (MPa)			
	İğne Yapraklı Ağaç Sınıfları			Meşe-Kayın
	I	II	III	
$\sigma_{bem//}$	11.0	8.5	6.0	10.0
$\sigma_{bem\perp}$	2.0	2.0	2.0	3.0
$\sigma_{bem\perp} (*)$	2.5	2.5	2.5	4.0

(*) Hafifçe ezilmelere izin verildiği takdirde bu değer kullanılabilir.

2) Eğilmeye Dayanımı

Kiriş şeklinde mesnetlenmiş bir ahşaba bir veya iki taraftan liflere dik yönde etki eden bir kuvvetin onu eğmeye çalışması ve ahşap malzemenin bu kuvvete verdiği tepkiye eğilme dayanımı denir. Eğilme dayanımı mukavemeti ahşaptaki rutubet oranıyla bağlantılıdır. %3-5 oranındaki nem ahşaba en yüksek dayanımı sağlarken, nem oranı arttıkça her %1'lik orana karşı %4 oranında mukavemet azalmaktadır [7]. Tablo 3'de ağaç türlerine göre eğilme gerilmesi değerleri verilmiştir [17].

Tablo 3. Ağaç türlerine göre eğilme gerilmesi değerleri [17]

Çalışma Şekli	Eğilme gerilmesi değerleri (MPa)			
	İğne Yapraklı Ağaç Sınıfları			Meşe
	I	II	III	
σ_{eem}	13.0	10.0	7.0	11.0

3) Ahşap Malzemenin Makaslama Dayanımı

Birbirine bitişik iki kesitin birbirinden ayrılması için uygulanan kuvvete ahşabın verdiği dayanım makaslama dayanımıdır. Ahşap bir malzemede makaslama direnci liflerin yönü ve malzemenin kalitesi ile alakalıdır. Örneğin uygulanan kuvvet ile liflerin yönüne doğru 90° ile etkiyor ise direnç en düşük seviyede

olacakken, 0° olduğunda ise en yüksek seviyeye ulaşacaktır. Ayrıca nem oranı da makaslama direnci ile ters orantılı olarak değişmektedir [10].

4) Ahşap Malzemenin Yarıлма Direnci

Yarıлма direnci ahşap bir malzemeye vida, çivi gibi metallerin odun lifleri arasına belirli bir kuvvet ile girmesi, ahşabın da bu metalleri tutma kapasitesidir. Yarıлма direnci ahşabın çeşidine göre değişiklikler göstermektedir. Özellikle meşe, kayın ve çınar gibi ağaçlar yarıлма direnci yüksek olan ahşaplardır. Metal tutma kapasitesi ise %80- 90 oranlarına ulaşabilmektedir [10].

5) Ahşabın Elastisitesi

Herhangi bir kuvvetin etkisi ile şekli değişen bir cismin kuvvet bitince eski haline dönebilmesi özelliğine denir. Ahşap malzeme belli bir sınıra kadar deformasyonu olmadan kuvveti karşılayabilmektedir. Bu duruma ahşabın sınır değeri denir. Ayrıca kuvvet yüklemesi artarak devam ettiği durumlarda ise deformasyon oluşarak ahşabın kırılmasına yol açabilmektedir. Bu duruma da ahşabın kırılma sınırı denmektedir. Ahşap malzeme orta düzeyde elastik sayılan bir malzemedir. Yoğunlukla doğru orantılıdır. Sıcaklığın ve nem oranının artması elastisite modülünü olumsuz yönde etkilemektedir [14]. Ahşabın davranışını tanımlayabilmek için özellikle yapıya ait elastisite modülü ve poisson oranının bilinmesi gereklidir. Elastisite ahşabın eski halini alabilme özelliğidir. Poisson oranı ise eksenel sıkıştırma miktarına bölünen enine genişleme miktarıdır [18]. Tablo 4'te ağaç türlerine göre TS 647'de yer alan elastisite ve kayma modülleri verilmiştir [17].

Tablo4. Ağaç türlerine göre elastisite ve kayma modülü değerleri [17]

Ahşap Malzeme Türü	TS 647'e göre Elastisite ve Kayma Modülleri		
	Elastisite Modülü (kg/m ²)		Kayma Modülü (kg/cm ²)
	Liflere paralel E _∥	Liflere dik E _⊥	
İğne Yapraklı	100000	3000	5000
Meşe,Kayın	125000	6000	10000

C. Ahşap Yapıların Avantajları ve Dezavantajları

Sağlam ve ekonomik yapılar üretebilmek için projelendirme ve uygulama aşamasına başlamadan önce taşıyıcı iskelet sistemi olarak ahşabın avantaj ve dezavantajlarını bilmek gerekmektedir.

Ahşap, yapı elemanı olarak inşaat mühendisliğinde sık olarak kullanılan bir malzemedir. Bunun sebebi avantajlarının oldukça fazla olmasıdır. Özellikle yenilenebilir bir malzeme olması yani kaynağına kolayca ulaşılabilirliği, uygulamanın yapılacağı alana kolayca götürülüp montajının yapılabilmesi, hafif olması ve buna rağmen iyi mukavemet değerleri vermesi, her türlü doğa koşullarında bakımının kolay olmasının yanı sıra imalatının bu hava koşullarında yapılabilmesi gibi sebepler ahşap malzemeyi çekici kılmıştır [19].

1) Avantajlar

Ahşap malzemenin diğer yapı malzemelerine nazaran üstün özellikleri olduğu gibi farklılık gösteren özellikleri de vardır. Farklı özellikler göstermesi (anizotropi), her türün farklı yoğunlukta olmasından dolayı fiziksel, mekanik, kimyasal ve diğer teknolojik özelliklerinin farklılık göstermesi ve çürümeye karşı çok dayanıklı olmaması gibi istenmeyen özellikleri bulunmaktadır. Masif ahşap malzemedeki yoğunluk arttıkça genel bir kural olarak mekanik özellikler artmaktadır. Eğilme direnci, elastikiyet modülü ve şok direnci ile yoğunluk arasında artan-doğrusal bir ilişki vardır. Ahşabın enine kesitine baktığımızda odun oluşumu bakımından, odunun özü ve diri odun şeklinde iki farklı odun kısmının oluştuğu ve buna ek olarak genç odun ve olgun odun olarak da iki farklı odun yapısının oluştuğu bilinmektedir. Çoğu ağaç türünde genç odun kısmı öz odun kısmının ortasında kalan ve ilk 5 ile 30 yıl sonunda oluşan yıllık halkaları kapsamaktadır [20].

- Yeterli mukavemete sahip olmakla birlikte oldukça hafif bir malzemedir. Malzemenin hafifliğinin bir sonucu olarak ahşap binaların ölü yükü azalmakta, temel ve diğer taşıyıcı elemanların boyutları küçülmektedir.
- Hafif olması nedeniyle nakliyesi ucuz, montaj makineleri gereksinimi az, montajı kolay, çabuk ve ekonomiktir.

- Birleşimi kolay bir malzeme olan ahşap yapı elemanları, birbirlerine geçmeli bağlanabilir; yapıştırılabilir; çivi, bulon, vida, metal lama yardımı ile birleştirilebilir.
- Birleşim elemanları kolay sökülebilir olduğundan yapının demontajı yapıp, ahşap malzemeler farklı binaların yapımında tekrar kullanılabilir.
- Isı yalıtımı yönünden iyi bir malzemedir.
- Kimyasal etkilere ve asitlere karşı dayanıklıdır.
- İşçiliği kolaydır ve şantiye ortamında dahi istenilen şekil verilebilir.
- Kurutulmuş ahşap iyi bir elektrik yalıtkanlığına sahiptir.
- Doğadan kolay bir şekilde elde edilebilir ve sıcak bir malzeme olması sebebiyle mimarlar tarafından çok fazla tercih edilir.

Sonuç olarak ahşap; taşıma gücü yüksek, birleşim detayları basit, ağırlığı az ve mimari etkisi olumlu bir malzemedir.

2) Dezavantajlar

- Suya ve neme karşı dayanıksızdır. Korunmadığı zaman bünyesine kolayca su emer, emdikçe şişer, suyu kuruduktan sonra büzülür ve çatlak oluşmasına sebebiyet verir. Bu nedenle yapılarda kurutulmuş ahşap kullanılmasına dikkat edilmelidir.
- Yapısı homojen değildir, anizotrop bir malzemedir. Her nokta ve doğrultudaki statik özellikleri eşit değildir. Lifli yapısı nedeniyle lif doğrultusunda basınç ve çekme dayanımı yüksek, diğer doğrultularda daha düşüktür. Hesaplamalarda buna dikkat edilmelidir.
- Lifli yapısı nedeniyle çatlaklar, budaklar kesitin her yerine aynı şekilde dağılmamıştır.
- Ahşap kurtları, böcekler, mantarlar ve bakteriler ahşabın bozulmasına ve çürümmesine neden olabilirler. Bundan dolayı koruma yöntemleri uygulanmalıdır.
- Ses yalıtımı yönünden zayıftır.
- Yangın dayanımının yüksek olmasına karşı kolay tutuşan bir malzemedir [21].

III. AHŞAP YAPI ve YÖNETMELİKLERİNİN DÜNYADAKİ ve TÜRKİYE'DEKİ YERİ

A. Ahşap yapıların dünyadaki ve Türkiye'deki durumu

Ahşap yapı malzemesinin dünyada yaygın olarak kullanılmasına rağmen ülkemizde kullanımı diğer yapı sistemleri ile karşılaştırıldığında çok düşük düzeyde kalmıştır. Ülkemizde ahşabın yapılarda taşıyıcı iskelet olarak kullanımı, 1940'lı yıllardan itibaren yapı ve inşaat sektöründe çimento, taş ve çelik malzemelerin tercih edilmesiyle beraber belirgin bir düşüş yaşamıştır. Ahşap, bina yapı sistemleri içinde özellikle İsveç, Norveç, Finlandiya, Kanada ve ABD'nin kuzey eyaletleri ile Japonya, Yeni Zelanda ve Avustralya'da Türkiye'ye göre çok daha fazla kullanılmaktadır. Tutkallı lamine ahşabın bulunmasıyla beraber gelişmiş ülkelerde ahşap paneller üretilmiştir. Çapraz lamine ahşap sistemler yüksek ahşap yapılarda taşıyıcı sistem olarak kullanılmıştır. Bu sistemle Almanya, Norveç ve Avusturya gibi ülkelerde çok katlı ahşap yapılar yapılmıştır. Tutkallı lamine ahşap, ahşap esaslı levhalar ve diğer endüstriyel ahşap malzemeler Eurocode 5' te de tanımlanmaktadır. Gelişmiş ülkelerde yapılan çalışmalarla beraber hafif ağırlıklı ve yüksek performanslı yeni ahşap malzemelerin bulunması ahşap yapı sektörünü bir adım daha ileriye götürecektir [22]. Deprem riski altında bulunan Kanada'da konutların ve eğitim binalarının %90'ı, Japonya'da %42'si ve ABD'nin deprem kuşağında yer alan bölgelerinde ise konutların %92'si ahşap taşıyıcı sistemli yapılardır [23-24]. Şekil 2'de görüldüğü üzere gelişmiş ülkelerde ileri ahşap yapım teknikleri kullanılarak çok katlı binalar yapılabilmektedir [25].

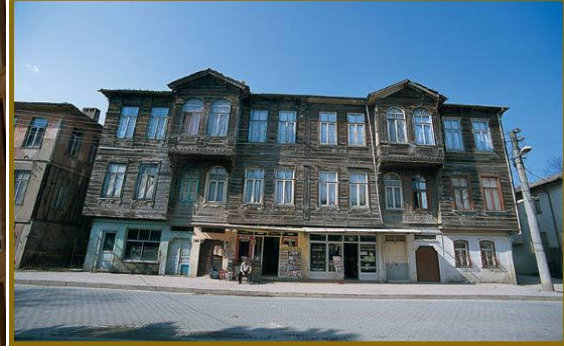
Türkiye'de ahşap iskeletli yapım tekniği ile yapılan en erken tarihli konut örnekleri on yedinci yüzyıla gitmektedir. Ahşap iskeletli konut yapımı yirminci yüzyılın ilk çeyreğine kadar yaygın olarak devam etmiştir. 1940'lardan sonra ise bu gelenek, kırsal alanlarda kısıtlı olarak sürmüştür [26]. Ülkemizde 100 yıl öncesine kadar ahşap yapılar geleneksel üretim teknikleriyle birlikte yaygın olarak üretilip kullanılmaktayken, günümüzde belirli sebeplerden dolayı tercih edilmemektedir. Geleneksel Türk konutu, zemin katını çevreleyen taş duvarları, bir anlamda iç mekânı dışarıya taşıyan ahşap çıkmaları, kiremit örtülü kırma çatısıyla tüm dünyaca tanınır hale gelmiş ve birçok araştırmanın konusu olmuştur [27]. Genel olarak ahşap yapıların zemin katı yığma olarak planlanıp, üst katlar geleneksel ahşap yapım tekniklerine göre yapılmıştır (Şekil3) [28]. Ahşap yapılar ile ilgili ülkemizde ön yargılar bulunmaktadır. Ahşabın eksik ve yanlış bilgi ile tanınıyor olması ve yangına dayanıksızdır, sürekli bakım gerektirir, pahalıdır gibi bilimsellikten uzak ve ön yargılı yaklaşımlar ile ahşap talep düzeyi ülkemizde çok düşüktür. Ülkemizde ham maddeyi sağlayacak orman alanlarının azalması, endüstriyel ormancılık ve odun

üretimini yeterince gelişme sağlayamamış olması, ahşap yapı üretiminde kullanılacak nitelikli ağaç türlerinin azalması ve yurt dışından temin edilmesinin çok pahalı olması ahşap yapı üretimini durma noktasına getirmiştir [29].

Ahşap taşıyıcı sistemler genel olarak dayanımı oldukça iyi ve depreme dayanıklı yapı malzemeleridir. Hafif olmasına nazaran mukavemeti yüksektir. Montajının kolay olması, maliyetinin çok fazla olmaması ve işlenilebilirliğinin kolay olması ahşabı çekici kılar. Fakat Türkiye’de ahşabın bilinirliği hala oldukça azdır. Ahşap, özellikle 1999 Marmara depreminden sonra deprem karşısındaki performansı nedeniyle tekrar gündeme gelmiş, konut, eğitim yapısı benzeri kullanım tercihinde artış gözlenmiştir [30].



Şekil 2. İleri ahşap yapım teknikleri



Şekil 3. Ülkemizdeki geleneksel ahşap sivil mimari örneği

Hızlı kentleşmeye bağlı olarak artan nüfus dolayısıyla arsa fiyatlarının yükselişi ve kent merkezlerindeki alan yetersizliği dikey mimariyi zorunlu kılmıştır. Ülkemizdeki ahşap alanındaki teknolojik gelişmeler takip edilmediği ve bu alanda yeterli Ar-Ge çalışmaları yapılmadığı için gereksinimi karşılayacak kadar yüksek katlı ahşap yapılar yapılamamıştır. Türkiye’de geleneksel sivil ahşap mimari yapılar yerini yüksek katlı betonarme yapılara bırakmıştır. Ahşabın mekanik ve fiziksel özellikleri üzerine yapılan çalışmalar neticesinde ahşabın dayanıklı bir malzeme olduğu ve yatay kuvvetler karşısında sağlamış olduğu avantajlar ile deprem kuşağında yer alan ülkemizde son yıllarda ahşap yapı üretiminin arttığı gözlemlenmektedir [31].

B. Ahşap yapıların yönetmelikler ve standartlardaki yeri

Sağlam, nitelikli ve denetlenebilir ahşap yapılar üretebilmek için belli kurallar, yönetmelikler ve standartlar gereklidir. Ülke koşullarında üretimin nasıl, ne şekilde ve hangi sınırlara bağlı kalınarak yapılacağını belirten kuralların tasarımcı, uygulayıcı ve denetleyici tarafından bilinmesi ve uygulanması çok önemlidir. Ülkemizde ve dünyada ahşap yapıların tasarım kurallarını belirten yönetmelikler ve standartlar bulunmaktadır.

Dünyada ahşap yapılar için önemli yönetmelik ve standartlar;

- Eurocode 5(EN 1995-1-1); European Comitee for Standartization,
- AITC; American Institute of Timber Construction,
- DIN 1052; Deutsche Norm, Structural Use of Timber, Design and Construction,
- AS 1720.1-2010; Australian Standard, Timber Structures şeklindedir.

Gelişmiş ülkelerde ahşap yapılar ile ilgili çağın gereksinimleri ve teknolojik gelişmelerin ışığında yapılmış, detaylı ve evrensel birçok yönetmelik ve standart bulunmaktadır, ülkemizde ahşap yapı ile ilgili yönetmelik ve standartlara yeteri kadar önem verilmemiştir.

Türkiye’de ahşap yapılar için yönetmelik ve standartlar;

- TS 647; Ahşap Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları,
- ABYYHY 1997; Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik,
- TBDY 2018; Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği,
- TS EN 1995-1-1; Ahşap Yapıların Tasarımı Bölüm 1-1,
- Genel Teknik Şartname 1985,
- İstanbul İmar Yönetmeliği 2007 şeklindedir [29].

1979 yılında yayımlanan TS 647' de ahşap türleri, ahşap türlerine ait emniyet gerilmeleri, birleşim araç ve şekilleri ile birleşimlerde kullanılan emniyet gerilmeleri, eğilme, çekme, basınç, sehim ve mesnet koşulları tahkik hesapları ve yöntemlerinden bahsedilmiştir. Emniyet gerilmeleri yöntemine göre tasarım kuralları sunulmuştur. Bu standartta teknolojik ahşap yapı ürünleri ve yöntemleri, gelişmiş yapım sistemlerinde kullanılan ahşap birleşim ürünleri ve birleştirme yöntemleri yer almamaktadır [32].

2 Eylül 1997 tarihinde Resmi Gazete'de yayımlanan ve 1 Ocak 1998 tarihinde yürürlüğe giren Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmeliğin (ABYYHY 1997) 9. bölümünde "Ahşap Binalar İçin Depreme Dayanıklı Tasarım Kuralları" başlığı altında bilgi verilmiştir. Ahşap yapıların iskeleti, taşıyıcı duvarlar ve ahşap elemanlar ile ilgili bilgiler detaylı değildir. Bu yönetmelikte ahşap yapılar ile ilgili kurallar çok kısıtlayıcı ve sadece geleneksel ahşap yapıların uygulanmasına yöneliktir. Ahşap yapılar ile ilgili çağın gereksinimlerini karşılayamayacak düzeydedir.

13 Mart 2018 tarihinde Resmi Gazete'de yayımlanan ve 1 Ocak 2019 tarihinde yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinin 12. bölümünde 'Deprem Etkisi Altında Ahşap Bina Taşıyıcı Sistemlerinin Tasarımı İçin Özel Kurallar' başlığı altında bilgi verilmiştir. Deprem etkisi altındaki ahşap yapıların ahşap panellerden oluşabileceği kabul edilerek, tasarım yöntemi olarak TS EN 1995-1-1 esas alınmıştır. Bu yönetmelik ile beraber Eurocode 5'in tasarım ve hesap yöntemleri ilk defa resmi olarak kabul edilmiştir. Günümüz yapım tekniklerine uygun olarak kiriş, döşeme, dikme, ahşap paneller ve birleşim araçları ile ilgili hesap yöntemleri sunulmuştur.

Genel Teknik Şartname'nin 17.7. maddesinde ve İstanbul İmar Yönetmeliği'nin 7. bölümünde ahşap yapılardan sınırlı bir şekilde bahsedilmiştir. TS EN 1995-1-1 kodlu standartta, genel bilgilerle birlikte ahşap yapılarda tasarım esasları, malzeme özellikleri, dayanıklılık, yapısal analiz esasları, sınır değerler, birleşim elemanları, yapısal detaylar ve kontrol başlıkları altında tasarım kuralları belirtilmektedir [31].

Eurocode 5'te tasarım esasları, malzeme özellikleri, dayanıklılık, yapısal analiz esasları, taşıma gücü sınır durumları, kullanılabilirlik sınır durumları, metal bağlantı elemanları ile birleşimler, bileşenler ve ahşap donanımlar, yapısal detaylandırma ve kontrol başlıkları yer almaktadır. Standartta taşıma gücü yöntemine göre tasarım kuralları sunulmuştur. Ayrıca bu standartta bir kısmı faktör yöntemi ile sınır durum kavramı esas alınır. TS 647'de sadece masif ahşap ve kontraplaklar üzerine çalışılmasına rağmen TS EN 1995-1-1'de tutkalı lamine ahşap, ahşap esaslı yapısal mamuller, mekanik bağlantı elemanlarıyla birleştirilen ahşap esaslı levhalardan oluşan binaların tasarımı ile ilgili çalışmalar yapılmıştır [33].

Ahşap yapılar ile ilgili ülkemizde kullanılan bütün yönetmelik ve standartlar incelendiğinde ahşap yapı uygulamalarının sadece iskelet sistem olarak düşünüldüğü, gelişmiş yapı sistemlerinden bahsedilmediği sonucuna varılmıştır. Ülkemizde nitelikli ahşap yapılar üretebilmek için uluslararası standartlar, yönetmelikler ve şartnameler incelenerek TS 647 Ahşap Yapı Standardının çağın gereksinimleri doğrultusunda yenilenip tekrardan kullanılması sağlanmalıdır. Bu amaçla üniversitelerimizde ahşap ile ilgili bilimsel ve teknik araştırmalar yapılmalı ve eğitimler verilmelidir.

IV. SONUÇLAR

Ahşap mukavemeti yüksek bir malzemedir. Eğilmeye karşı direnci diğer yapı elemanlarından yüksektir. Yük altında ki ahşap bir kirişin kırılma süresi oldukça uzundur. Ahşap malzeme yapı elemanı olarak kullanımında ahşabın fiziksel özellikleri mukavemeti açısından önemlidir. Ayrıca ahşabın cinsi, bir ağaç kesitinde bulunan liflerin doğrultusu ve açısı, ahşapta bulunan nem oranı gibi faktörler dayanımını etkileyebilmektedir. Ahşap; taşıma gücü yüksek, birleşim detayları basit, ağırlığı az ve mimari etkisi olumlu bir malzemedir. Ahşap yapıların dünyadaki yeri ile ülkemizdeki yeri karşılaştırıldığında ise ülkemizde ahşap yapıların oldukça az olduğu görülebilmekte ve önemi hala anlaşılamamaktadır. Ayrıca standartlarımız bakımından dünya standartlarına nazaran eksikleri olduğu ve geliştirilmesi gerekmektedir.

Ahşabın yapı malzemesi olarak kullanılması diğer yapı malzemelerine nazaran çok daha eskilere dayanmaktadır. Bunda doğadan kolay elde edilebilir olması, mekanik özelliklerinin getirdiği avantajlar, hafif ve kolay şekil verilebilir olması büyük rol oynamaktadır. Fakat geçmişte yaşanan büyük yangınlar sonucunda insanlar tarafından ahşabın kolay yanabilmesi ve dayanıklı olmaması algısı, artan nüfusa yetebilecek kadar yüksek ahşap yapıların yapılamayacağı düşüncesi ahşabın yapılarda kullanımını azaltmıştır. Son yıllarda ahşap mühendisleri, yangın mühendisleri ve diğer bilim insanları tarafından yapılan Ar-Ge çalışmaları sonucunda yangın algılama ve koruma sistemlerinin geliştirilmesi, çok katlı ahşap yapıların yapılmasını sağlayan yeni ahşap yapı ürünlerinin ve yapı sistemlerinin bulunmasıyla beraber ahşap yapıların tekrardan altın çağını yaşayacağı görülmektedir [34]. Geçmişten günümüze kadar yapılan ahşap yapı sistemleri ve yeni buluşların yardımıyla, ekosisteme zarar

vermeden, çevreci ahşap yapılar yapılmalı; çağımızın getirdiği yeni teknolojilerle ahşabı yeniden tanımalı ve onu doğru kullanmayı öğrenmeliyiz.

KAYNAKLAR

- [1] Batur, A. (2004). *Gelişmiş Ahşap Yapım Sistemleri ve Türkiye Koşulları Yönünden Değerlendirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.
- [2] Bilici, S. (2006). *Ahşap Konut Üretim Sistemleri; Almanya Örneği*. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [3] Duman, N., & Ökten, S.(1988). *Ahşap Yapı Dersleri.1 2. baskı*. Yapı Endüstri Merkezi Yayın Bölümü, İstanbul, 272.
- [4] Bozkurt, Ö., (2011). Geleneksel Tekirdağ Evlerinde Kullanılmış Meşe Ahşabının Mekanik Özellikleri ve Kimyasalla Koruma Uygulamalarının Mekanik Özellikler Üzerine Etkisi. *Politeknik Dergisi*, 14(2), 115-119.
- [5] Nilsson, T. & Rowell, R. (2012). Historical Wood – Structure and Properties. *Journal of Cultural Heritage*,13 (3), 5-9.
- [6] Sonderegger, W., Kránitz, K., Bues, T. C., & Niemz, P.(2015). Aging Effects On Physical and Mechanical Properties of Spruce, Fir and Oak Wood. *Journal of Cultural Heritage*,16 (6), 83-88.
- [7] Hiraoğlu, E.(2007). *Ahşap ve Çelik Makas Sistemlerin Malzeme ve Sistem Özelliklerinin İncelenmesi, Bir Örnek Yapı Üzerinde Değerlendirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [8] Pelit, H., Korkmaz, M., & Budakçı, M., (2017). Farklı Ahşap Malzemelerin Bazı Fiziksel Özelliklerine Su İtici Maddelerin Etkileri. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*,6(3), 1027-1036.
- [9] Dışkaya, H. (2011). *19.Yüzyıl İstanbul Geleneksel Ahşap Karkas Yapılarında Deprem Etkisinin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Değerlendirilmesi*. Doktora Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [10] Erkoç, E. (2004). *Günümüz Teknolojileriyle Üretilen Ahşap Konutların Tasarım-Uygulama-Kullanım Üçgeninde Değerlendirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [11] Şenkal, F. (1996). *Konutlarda Dünden Bugüne Ahşap Kullanımı Üzerine Bir Araştırma*. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
- [12] Gürel, F. (2018). *Çok Katlı Ahşap Yapıların Deprem Yükü Altında Performanslarının İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [13] Holmberg, S., Persson, K., & Petersso, H. (1999). Nonlinear Mechanical Behaviour and Analysis of Wood and Fibre Materials. *Computers and Structures*, 72, 459-480.
- [14] Kaplan, B. (2013). *Geleneksel Osmanlı Mimarisine Sahip Ahşap Yapıların Deprem Kuvveti Altında İncelenmesi ve Güçlendirme Teknikleri*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [15] Çetin, F., & Gündüz, G.,(2017). Türkiye'deki Bazı Ağaç Türü Odunlarının Mekanik Özellikleri Üzerine Yapılan Araştırmaların Değerlendirilmesi. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 19(1), 161-181.
- [16] Uzun, S. (2018). *Tarihi Ahşap Yapı Taşıyıcı Sistemlerin İncelenmesi ve Boğaziçi Örneği: Amcazade Hüseyin Paşa Yalısı*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [17] Türk Standartları Enstitüsü. (1979). *TS 647 Ahşap Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları*. <https://intweb.tse.org.tr/Standard/Standard/Standard.aspx?081118051115108051104119110104055047105102120088111043113104073087057052114079112107055056111086>

- [18] Kretschmann, D., (2010). Wood Handbook : Wood As An Engineering Material. Madison, WI, USA,44.
- [19] Algin, H., Algin, Z., & Ekmen, A., (2016). Ahşap Köprü ve İnşaat İskele Performansına Ahşap Kusurlarının Etkisi. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 02, 27-34.
- [20] Bal, B., & Bektaş, İ., (2018). Odunun yoğunluğu ile bazı mekanik özellikleri arasındaki ilişkinin belirlenmesi üzerine bir araştırma. *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 1(2), 51-61.
- [21] Türkçü, H. Ç. (2004). *Yapım İlkeler Malzemeler Yöntemler Çözümler 3. baskı*. Birsen Yayınevi, İstanbul, 318.
- [22] Lattke, F., & Lehmann, S. (2007). Multi-Storey Residential Timber Construction: Current Developments in Europe. *Journal of Green Building*, 2(1), 119-129.
- [23] Akça, C., Akarca, H., Erdoğan, E., & Demirel, A. (2013-2014). *Yapı Ahşabı ve Ahşap Yapı Sektörü*. Ulusal Ahşap Birliği, <http://www.ahsap.org/assets/pdfDocs/etkinlik-2/Ahsap-Yapi-Sektor-Raporu-2.pdf>, (18.01.2019).
- [24] *Türk Yapı Sektörü Raporu 2014*, Yapı Endüstri Merkezi, İstanbul.
- [25] A Frame Construction Barrie. <http://ww9.onvacations.co/a-frame-construction-barrie/>. (13.02.2019).
- [26] Aksoy, D., & Ahunbay, Z. (2005). Geleneksel Ahşap İskeletli Türk Konutu'nun Deprem Davranışları. *İtü Dergisi*, 4 (1), 47-58.
- [27] Karaman, Y. Ö., & Zeren, T. M. (2010). Geleneksel Türk Konutunda Kullanılan ve Kagir Sistemi Destekleyen Ahşap Yapısal Elemanların Önemi ve Bozulma Nedenleri. *DEÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2 (12), 75-87.
- [28] T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı. Bartın İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü. <http://www.bartinkulturturizm.gov.tr/TR-68995/ahsap-bartın-evleri.html>. (13.02.2019).
- [29] Ohanesyan, D. S. (2012). *Ahşap Platform Çerçeve Yapıların Yatay Kuvvetler Karşısındaki Davranışları ve Alınması Gereken Önlemler*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [30] Yücel, G. (2018). Ahşap ve Mimarlık Eğitimi: İstanbul Örneği. *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 1(2), 62-77.
- [31] Avlar, E. (2008). Türkiye'de Ahşap Yapı Üretimine Yönelik Durum Tespiti. *Mimarlıkta Malzeme*, (8), 71-77.
- [32] Uzun, S. (2018). *Tarihi Ahşap Yapı Taşıyıcı Sistemlerinin İncelenmesi ve Boğaziçi Örneği: Amcazade Hüseyin Paşa Yalısı*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [33] Eurocode 5 (EN 1995-1-1:2004); European Comitee for Standardization, Design of Timber Structures. Part 1-1: General Common Rules and Rules For Buildings.
- [34] Smith, I., & Snow, M.A. (2008). Timber: An Ancient Construction Material With A Bright Future. *The Forestry Chronicle*, 84 (4), 504-510.