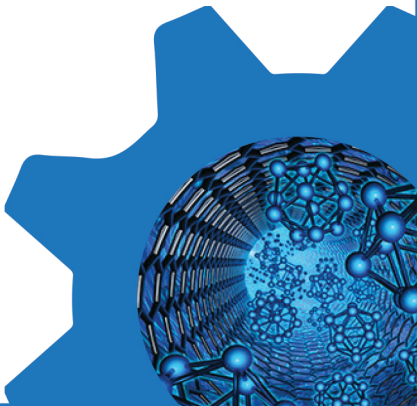


GAZI
JOURNAL OF
ENGINEERING
SCIENCES



EDİTÖR / EDITOR - IN – CHIEF

İsmail ŞAHİN

Gazi University, Ankara, Turkey
e-mail: editorgjes@gmail.com

YARDIMCI EDİTÖRLER / ASSOCIATE EDITORS

Harun GÖKÇE

Gazi University
e-mail: harungokce@yahoo.ca

Murat DÖRTERLER

Gazi University
e-mail: dorterler@gazi.dedu.tr

ALAN EDİTÖRLERİ / SECTION EDITORS

Abdullah AKDOĞAN

Pamukkale University

Alper BÜYÜKKARAGÖZ

Gazi University

Amin MIRZAPOUR

Zanjan Islami Azad University

Ayhan AYTAÇ

National Defense University

Bülent ÖZKAN

Gazi University

Erdem CÜCE

Recep Tayyip Erdoğan University

Fecir DURAN

Gazi University

Fatih ŞAHİN

Gazi University

G. Serdar TOMBUL

ASELSAN

Halil KARAKOÇ

Hacettepe University

Hüseyin GÖKÇE

Çankırı Karatekin University

M. Hanefi CALP

Karadeniz Technical University

Mustafa BOZ

Karabük University

Mustafa GÜNAY

Karabük University

Serhat KARAP

TUBİTAK-SAGE

Tayfun MENLİK

Gazi University

Umit ATİLA

Gazi University

YAYIN DANIŞMA KURULU / ADVISORY BOARD

Adnan SÖZEN

Gazi University, Turkey

Andrew PINKERTON

Lancaster University, England

Bekir Sami YILBAŞ

King Fahd University, Sudia Arabia

Farzollah MIRZAPOUR

University of Zanjan, Iran

Herbert M. REYNOLDS

Michigan State University, USA

Jamal KHATIB

University of Wolverhampton, England

Majid MEGHDADI

University of Zanjan, Iran

Mustafa KURT

Gazi University, Turkey

Nowruz ALLAHVERDİ

Karatay University, Turkey

Reza Negarastani

RIETEX, England

Salman NISAR

National University of Sci. and Tech., Pakistan

Shahin JALILI

Tebrez University, Iran

John KINUTHIA
University of South Wales, England

Jonathan C. BORG
University of Malta, Malta

Hossam KISHAWY
University of Ontario Technology, Canada

Kürşad SEZER
Gazi University, Turkey

Şakir TAŞDEMİR
Selçuk University, Turkey

Tahsin Tecelli ÖPÖZ
John Moores University, England

Yasir JOYA
GIK Institute, Pakistan

DİL EDİTORLERİ / LANGUAGE EDITORS

Türkçe/Turkish: V. Savaş YELOK (Hacı Bayram Veli University)

İngilizce/English: H. Kürşad SEZER (Gazi University)

TEKNİK EDİTÖR / TECHNICAL EDITOR

Neslihan TOP
Gazi University
e-mail: editorgjes@gmail.com

BU SAYININ HAKEMLERİ / REVIEWER OF THIS ISSUE

Adem TEKEREK, Gazi University
Ahmet Serdar GÜLDİBİ, Karabuk University
Ali SAĞLAM, Konya Technical University
Burak ÖZTÜRK, Bilecik Şeyh Edebali University
Bülent ÖZKAN, Gazi University
Erdem ÇİFTÇİ, Gazi University
Faik OKAY, Kastamonu University
Fevzi ÇAKMAK BOLAT, Bolu Abant İzzet Baysal University
Gürcan ÇETİN, Muğla Sıtkı Koçman University
Hüseyin KAYA, Bartın University
Kazım HANBAY, İnönü University

Mehmet Kaya, Tekirdağ Namık Kemal University
Nihat DALDAL, Bolu Abant İzzet Baysal University
Okan Özdemir, Dokuz Eylül University
Ömer Kadir MORGÜL, Sakarya University
Özkan ARSLAN, Tekirdağ Namık Kemal University
Rafet DURGUT, Karabuk University
Sakine KIRATLI, Çankırı Karatekin University
Selçuk YAĞMUR, Gazi University
Soner GÜLER, Van Yüzüncü Yıl University
Uğur KÖKLÜ, Karamanoğlu Mehmet Bey University
Volkan YILMAZ, Gazi University
Yusuf SÖNMEZ, Gazi University

Gazi Journal of Engineering Sciences has been published three issues per year.

CORRESPONDENCE ADDRESS :

Gazi Akademik Yayıncılık
Gazi Üniversitesi Gölbaşı Yerleşkesi Teknoplaza Binası Bahçelievler mahallesi,
320. Sok., No: 3/B GÖLBAŞI / ANKARA
Tel: +90-312-9113311 Fax: +90-312-9113312
e-mail: editorgjes@gmail.com

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

<i>Proje Yönetiminde Yapay Zekâ Tabanlı Paydaş Analizi Aracının Tasarımı</i> <i>Design of Artificial Intelligence Based Stakeholder Analysis Tool in Project Management</i> Gamzenur YILDIRIM, Funda ŞAHİNER, Hamdi Tolga KAHRAMAN	81-89
<i>A Novel Permutation Based Solution Representation Technique for Vehicle Routing Problems on GPUs</i> <i>Araç Rotalama Problemleri için Grafik İşlem Birimleri Üzerinde Yeni Bir Çözüm Gösterim Tekniği</i> Erdener ÖZÇETİN, Gürkan ÖZTÜRK	90-98
<i>Sertleştirilmiş AISI H13 Takım Çeliğinin Delme Performansını İyileştirmek İçin Elektro Erozyon İşleme Parametrelerinin Taguchi Yöntemi Kullanılarak Modellenmesi ve Optimizasyonu</i> <i>Modelling and Optimization of Electrical Discharge Machining Parameters Using the Taguchi Method to Improve the Drilling Performance of Hardened AISI H13 Tool Steel</i> Engin NAS, Erman ZURNACI, Sıdıka YILDIRIM	99-110
<i>Siğ Kriyojenik İşlemin Slepner Soğuk İş Takım Çeliğinin Metalurjik Özellikleri Üzerindeki Etkisinin Araştırılması</i> <i>Researching the Effect of Shallow Cryogenic Treatment on the Metallurgical Features of Slepner Cold Work Tool Steel</i> Enes EL, Fuat KARA, Onur ÖZBEK	111-120
<i>Kumaş Polisaj Tezgâhında Gürültü ve Titreşim Azaltım Çalışması</i> <i>Noise and Vibration Abatement Study on a Fabric Polishing Machine</i> Hüseyin DAL, Murat BAKLACI	121-133
<i>The Synthesis Copper-doped Nickel Oxide and Application of Hybrid Nano-lubricants as a Compressor Oil</i> <i>Bakır Katkılı Nikel Oksit Sentezi ve Hibrit Nano-yağlayıcıların Kompresör Yağı Olarak Uygulaması</i> Mustafa AKKAYA, Erdi AKMAN	134-142
<i>Derin Kriyojenik İşlemin Kalıntı Gerilme ve Kalıntı Östenit Üzerindeki Etkisinin Araştırılması</i> <i>Investigation of the Effect of Deep Cryogenic Process on Residual Stress and Residual Austenite</i> Fuat KARA, Onur ÖZBEK, Nursel ALTAN ÖZBEK, İlyas UYGUR	143-151
<i>Karbon Elyaf Takviyeli Kompozitlerin İstifli Delinmesinde Delik Çıkış Hasarının Deneysel Araştırılması</i> <i>Experimental Investigation of Hole Exit Damage in Stacked Drilling of Carbon Fiber Reinforced Composites</i> Elif Özge KIRHASANOĞLU, Yakup TURGUT	152-159

Dielektrik Malzemelerin Yüzeyleri için Islanabilirlik ve Buharlaşma Hızının Analizine Yönelik Ayrık Kosinüs Dönüşümü Tabanlı Bir Yaklaşım

A Discrete Cosine Transform Based Approach to Analysis of Evaporation Rate and Wettability for Dielectric Materials' Surfaces

Mustafa KARHAN.....160-168

Application of Differential Transformation Method and Dunkerley Formula for Stability Analysis of Bars in water

Su İçerisindeki Çubuğun Stabilitate Analizi için Diferansiyel Dönüşüm Yöntemi ve Dunkerley Formülünün Uygulanması

Farshid KHOSRAVI, Kanat Burak BOZDOĞAN.....169-174

Proje Yönetiminde Yapay Zekâ Tabanlı Paydaş Analizi Aracının Tasarımı

Gamzenur YILDIRIM^{*a}, Funda ŞAHİNER^a, Hamdi Tolga KAHRAMAN^a

^a Karadeniz Teknik Üniversitesi Of Teknoloji Fakültesi Yazılım Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 23.11.2020
Kabul: 25.04.2021

Anahtar Kelimeler:
proje yönetimi,
paydaş analizi, yalın
bayes sınıflandırıcı,
yapay-zeka tabanlı
paydaş analizi aracı
tasarımı

ÖZ

Projelerin başarıya ulaşmasında başlıca faktör proje yönetimidir. Proje yönetimi uluslararası standartları tanımlanmış ve tanımlanmaya devam eden birçok süreçten ve öğeden oluşmaktadır. Bu süreçlerden biri de paydaş analizidir. Proje yönetiminde paydaş analizi konusunda dünyada ve ülkemizde standartları karşılayan bir yazılım aracına rastlanılmamaktadır. Dolayısıyla bu konuda ciddi bir eksiklik olduğu görülmektedir. Bu çalışmanın amacı, uygulama alanından (proje konusundan) bağımsız olarak ve uluslararası standartlara göre paydaş analizi yapmayı sağlayan algoritmanın ve yazılım aracının tasarlanmasıdır. Bu amaçla öncelikle paydaş analizini problem alanından bağımsız olarak gerçekleştirmeyi sağlayan gereksinimler araştırılmış ve tanımlanmıştır. Gereksinimlerin tanımlanmasında ise uluslararası proje yönetim kurulunun belirlediği standartlar dikkate alınmıştır. Gereksinimlerin tanımlanmasından sonra paydaş analizinin aktörleri, her bir aktörün sahip olması gereken işlevler, paydaş analizi sınıfları ve veri modelleri geliştirilmiştir. Paydaş analizinin önemli bir aşaması analize kaynaklık teşkil edecek verinin etkili bir şekilde toplanması ve işlenmesidir. Bu amaçla mobil cihazlar üzerinden ve çeşitli sosyal medya uygulamalarından veri toplamayı sağlayan esnek bir uygulama mimarisi tasarlanmıştır. Yazılım mimarisinin tasarlanmasında ise yazılım tasarım prensiplerine bağlı kalmıştır. Paydaş analizinin kaynağı olan verilerin yapay zekâ tabanlı algoritmalar kullanılarak modellenmesinde ise yalın bayes sınıflandırma algoritmasını tatbik eden yazılım modülleri tasarlanmıştır. Tasarlanan paydaş analizi aracının gelecekteki birçok çalışmaya kaynaklık etmesi beklenmektedir.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.02.01>

Design of Artificial Intelligence Based Stakeholder Analysis Tool in Project Management

ARTICLE INFO

Received: 23.11.2020
Accepted: 25.04.2021

Keywords:
project
management,
stakeholder
analysis, naive
bayes classifier,
artificial
intelligence based
stakeholder analysis
tool design

ABSTRACT

The main factor in the success of the projects is project management. Project management consists of many processes and elements whose international standards have been defined and continue to be defined. One of these processes is stakeholder analysis. There is no software tool that meets the standards in stakeholder analysis in project management in the world and in our country. Therefore, it seems that there is a serious deficiency in this regard. The purpose of this study is to design the algorithm and software tool that enables stakeholder analysis independent from the field of application (project subject) and according to international standards. For this purpose, firstly, the requirements that enable stakeholder analysis to be carried out independently of the problem area have been researched and defined. In defining the requirements, the standards determined by the international project board are taken into consideration. After defining the requirements, actors of stakeholder analysis, the functions that each actor should have, stakeholder analysis classes and data models were developed. An important stage of stakeholder analysis is the effective collection and processing of data that will be a source for the analysis. For this purpose, a flexible application architecture is designed that enables data collection from mobile devices and various social media

*Corresponding author: gamzenur.yildirim2727@gmail.com

To cite this article: G. Yıldırım, F. Şahiner and H. Kahraman, "Design of Artificial Intelligence Based Stakeholder Analysis Tool in Project Management", *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol.7, no.2, pp. 81-89, 2021.

doi:<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.02.01>

applications. In designing the software architecture, it was adhered to the software design principles. In the modeling of data that is the source of stakeholder analysis using artificial intelligence-based algorithms, software modules that provide classification algorithms, primarily naive bayes and decision trees, are designed. The designed stakeholder analysis tool is expected to be the source of many future studies.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.02.01>

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüz dünyasında teknoloji, sanayi ve bilim alanında ki gelişmeler piyasa da ki rekabeti arttırmaktadır. Bu rekabet durumu içinde öne geçebilmek için yapılan projelerin başarıyla tamamlanması ve gerekli hedefleri yerine getirmesi gerekmektedir. Yapılan projenin başarısı ise proje gerçekleştirim süresince proje faaliyetlerinin ve kaynakların iyi bir planlama sürecinden geçirilmesiyle sağlanabilir. Bu planlama metodolojisine *Proje Yönetimi* denir. Proje yönetimi ilk çağ uygarlıklarından itibaren kullanılmıştır.

Proje, amaçlanan bir hedefi, belirli başlangıç ve bitiş noktası olan sınırlı bir finansmanla en iyi kaliteye ulaşmaya çalışılan ilişkili faaliyetlere denir. Projenin en önemli özelliği tekrarı olmamasıdır. Bir faaliyete proje denilebilmesi için ulaşılması gereken bir amacın olması, başlama ve bitiş tarihlerinin kararlaştırılması ve bir kaynağa sahip olması gerekir. Proje sınırlı bir sürede gerçekleştirilmesine rağmen ekonomik ve çevresel etkileri uzun süreli olacağından proje yönetimi oldukça mühim bir konudur.

Kaynaklara ulaşımın güçlüğü ve beklentilerde ki artıştan dolayı Proje yönetiminin önemi giderek artmaktadır. Projenin hedeflerinin etkin bir şekilde kararlaştırılmasını, sistemli ve mantıklı düşünmemizi sağlayarak mevcut kaynakların etkin kullanımını sağlar. Projede yaşanabilecek sorunların erken tespit edilebilmesini sağladığı gibi buna bağlı olarak projedeki gereksiz iş yükü oluşmasını ve lüumsuz kaynak harcanmasının önüne geçer, raporlama yapılmasına imkan sağlar.

Proje yönetiminde kullanılan araçlardan biri Berrocal J., Garcia-Alonso J., Murillo J.M. [1] tarafından geliştirildi. Farklı bölgelerdeki takımlar tarafından geliştirilen yazılım projeleri için takımlar arasındaki etkileşimi, iş birliğini ve süreç iyileştirmeyi artıran bir yazılım aracı geliştirildi. Gül, N, Arıcı, N. [2], Karınca Kolonisi Algoritmasını kullanarak proje ekiplerinin yapması gereken görevleri en kısa zamanda yapılabilmesi için gerekli olan kaynak atamasını gerçekleştirmek için yapay zeka tabanlı proje takvim planı oluşturulmuştur.

Proje yönetimini en iyi şekilde gerçekleştirebilmek için proje yaşam döngüsü boyunca uygulanacak yönetim süreçlerine ve yönetim alanlarına hakim olunmalıdır. Projenin başarılı bir şekilde sonuçlanabilmesi için bu yönetim alanlarının süreç adımları ile birlikte etkileşim halinde olması ve uyum içinde yürütülmesi gerekmektedir. Proje yönetim süreçleri farklı büyüklüklerdeki projelerde ve farklı sektörlerde geçerlilik göstermektedir. Proje yönetim süreçleri ISO 21500 standartlarına göre 5 ana süreçten meydana gelmektedir ve bu süreçler birbirleriyle etkileşim halindedir. Bunlar sırasıyla başlama, planlama, yürütme, denetleme ve kapanıştır. Proje yönetim alanları ise projenin yöntem ve teknik yönleri ile ilgili ISO 21500 standardında; bütünleştirme, paydaş, kaynak, kapsam, zaman, maliyet, risk, kalite, tedarik, iletişim olmak üzere on ana başlıktan oluşmaktadır [3-4].

Mevcut proje yönetimi uygulamaları kaynak planlama, zaman takip, maliyet takibi, iletişim kurma gibi proje yönetim hizmetleri sunarak takip ve raporlama ile proje yaşam döngüsü boyunca zamanı verimli kullanma, kaynakların etkin kullanımı, ilerlemeyi ve oluşabilecek riskleri izleyebilmeyi ve kolayca yönetebilmeyi amaçlamaktadır. Bu uygulamaların çoğunda proje süreç adımlarını uygularken proje başarısını önemli derecede etkileyen paydaş analizi adımını gerekli düzeyde gerçekleştirilmemektedir.

Paydaş gerçekleştirmek istediğiniz projeden doğrudan veya dolaylı olarak etkilenebilecek, projeyi olumlu veya olumsuz yönde etkileyebilecek kişi, kurum veya organizasyonlardır. Paydaşlar proje ekibi içerisinde yer alarak iç paydaş veya dış paydaş olabilir, proje içerisinde aktif ve ya da pasif olabilirler. Başka bir deyişle paydaşlar, projenin başarısında “pay sahibi” kişilerdir. Paydaş yönetimi her projenin başarısı için ciddi öneme sahip bir proje yönetim alanlarından biridir.

Paydaş analizi uygulamasındaki amacımız, paydaş yönetim alanına eğilerek projenin başarısını artırmaktır. Bu çalışmada uygulama alanından (proje konusundan) bağımsız olarak ve uluslararası standartlara göre paydaş analizi yapmayı sağlayan

yazılım aracını yapay zeka algoritması kullanarak gerçekleştirmeyi hedeflemekteyiz.

1.1. Problem Tanımı (Definition of the Problem)

Proje yönetimi uluslararası standartlara sahip olan birçok süreçten ve öğeden oluşmaktadır. Bu standartlar çerçevesinde birçok yardımcı yazılım aracı kullanılmaktadır. Projenin başarısını sağlamak için paydaşların gereksinimlerinin karşılanması ve memnuniyetinin sağlanması şarttır. Bir projeyi geliştiren ekipten, o projeden olumlu/olumsuz etkilenen kişiye kadar herkes projenin için paydaştır. Projenin varlığı, paydaşlar tarafından benimsenmesine bağlıdır. Paydaşlar bir projenin olmazsa olmazıdır. Proje geliştirmeye karar verildiğinde projenin; hangi ekip tarafından ne kadar sürede, hangi amaca hizmet edeceği önceden belirlenmelidir. Günümüzde gelişen ihtiyaçlara daha önce tecrübe edinilmemiş yenilikçi projeler yapılmaya çalışılmaktadır. Bu doğrultuda müşteri ve paydaşlarının beklentilerini anlamak ve memnuniyetini sağlamak, projenin risklerini azaltmak, proje yönetimi sürecinin yapısını belirlemek için paydaş analizinin iyi bir şekilde yapılması gerekmektedir.

Paydaş memnuniyeti proje hedefi olarak tanımlanmalı, analiz edilmeli ve yönetilmelidir. Peki paydaşlar projelerin hangi aşamalarında bulunmalıdır? Projeye ne kadar dahil edilmektedir? Etkili paydaş katılımı aynı zamanda çelişen çıkarları yönetmek, proje kararları ve faaliyetlerine uygun paydaş katılımını teşvik etmek için sürekli iletişim üzerine odaklanmaktadır.

Paydaşların katılımı, anketlere ve odak gruplarına ara sıra yapılan katkılardan finansal, politik veya diğer destek türlerini içeren tam proje sponsorluğuna kadar değişebilir. Proje katılımının türü ve düzeyi, projenin yaşam döngüsü boyunca değişebilir. Bu nedenle, paydaşları başarılı bir şekilde tanımlamak, analiz etmek ve katılımı sağlamak ve proje beklentileri ile proje yaşam döngüsü boyunca katılımını etkili bir şekilde yönetmek proje başarısı için kritik öneme sahiptir.

Proje yönetimi ile ilgili standartları incelediğimizde proje yaşam döngüsünün neredeyse her aşamasında paydaşlarla sürekli iletişim halinde olmamız gerektiği açıkça görülmektedir. Gelişen teknoloji ve imkanlar ile birlikte paydaşların proje hakkındaki fikirlerini sürekli gözetmek ve paydaşlar ile proje süreçlerini paylaşarak ilerlemek mümkündür.

Paydaşların da dahil edildiği bir proje yönetim süreci proje için oluşabilecek riskleri azaltmayı sağlayacağı gibi proje başarısını da arttıracaktır. Proje yönetiminde paydaş analizi konusunda dünyada ve ülkemizde standartları karşılayan bir yazılım aracına rastlanmamaktadır.

1.2. Yöntem (Definition of the Problem)

Uluslararası standartlarda paydaşların tanımlanması, katılımlarının planlanması, yönetilmesi ve izlenmesi aşamalarında kullanılan araç ve teknikler arasında anketler tercih edilmektedir [3]. Geliştirilen paydaş analizi aracının tasarımında paydaşların fikirlerini/değerlendirmelerini almak, alınan fikir ve değerlendirmeleri yapay zeka algoritması ile analiz etmek ve bu doğrultuda analiz sonuçlarının görsel olarak raporlanması sağlanmaktadır.

Projede; projenin oluşturulması ve proje yöneticisi tarafından projenin başarısını sağlayan oluşturulan anketlerin paydaşlara gönderilmesi ve anketlerin geri dönüşünün alınması için bir paydaş analizi uygulaması geliştirilecektir. Proje yöneticisi tarafından projenin aşamalarından oluşturulan anketlere ve alınan anket sonuçlarının tutarlılığını sağlamak için veri temizleme yapılacaktır. Veri temizleme sonrasında alınan sonuçlar veri sınıflandırması yaparak alınan sonuçları sınıflandırarak projenin dış paydaşlarının proje yöneticisinin soruları ile projenin bazı metriklerine nasıl bakıldığı analiz edilecek ve bundan sonraki aşamalarda bu paydaş sınıflarının projenin başarısına ve onlara hitap edecek şekilde yönetilmesi esas alınacaktır. Dış paydaşlardan alınan sonuçların projenin iç ve her bir dış paydaş grubu için (n-1) tane dış paydaş için etkisi sayısal metrikler ile ifade edilerek alınan sonuçların sisteme etkisi değerlendirilmek üzere nitelendirilecektir.

Sınıflandırmada temel amaç, nesnelerin sahip olduğu özelliklere bakılarak nesnelerin hangi sınıfa ait olduğunun belirlenme işlemidir. Veri madenciliğinde çok farklı sınıflandırma türleri ve algoritmaları bulunmaktadır. Karar ağaçları, en yakın komşu sınıflandırıcı, yalın bayes, yapay sinir ağları bunlardan bazılarıdır. Projede nümerik (sayısal) olmayan bağımsız değişkenlerin tanımlandığı anketlerin değerlendirilmesinde istatistiksel bir yöntem olan yalın bayes kullanılacaktır [5-9]. Veri setinin olasılıklar tablosuna dönüştürüldüğü ve bu olasılık tablosundaki bilgilerin kullanılması suretiyle sınıflandırma kararlarının verildiği yalın bayes

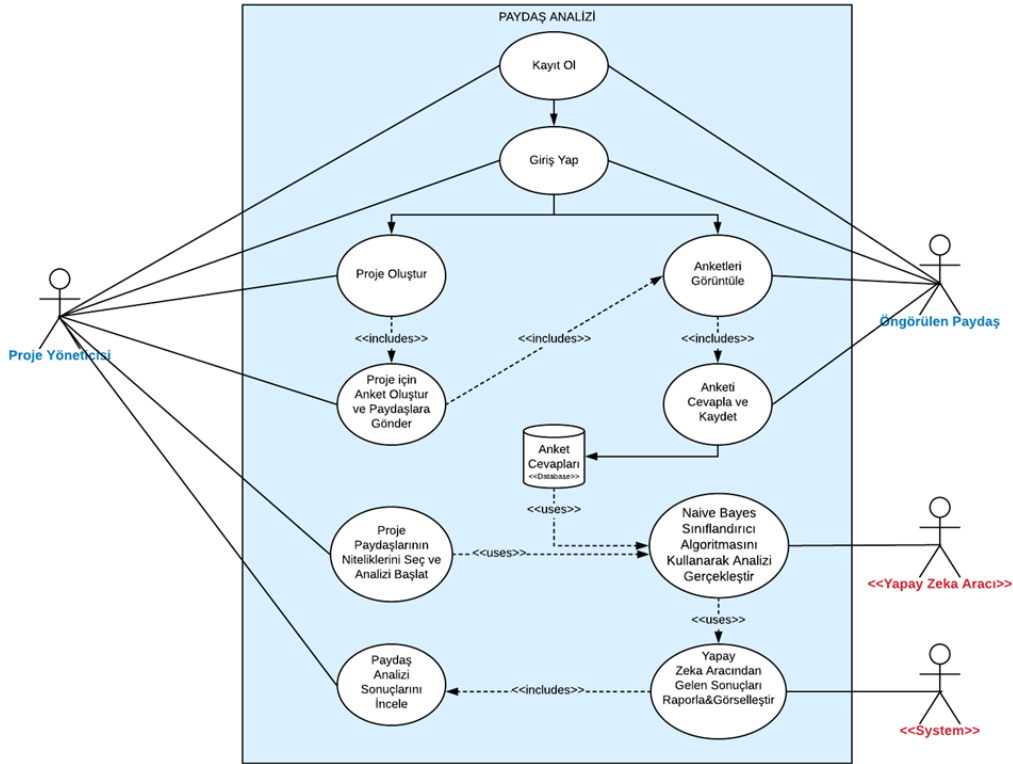
yöntemi k-nn algoritmasına kıyasla çok daha hızlı cevap üretmekte ve web ortamında etkili bir çözüm olabilmektedir.

1.2.1. Analiz (Analysis)

Paydaş analizini projeden bağımsız olarak gerçekleştirmeyi sağlayan gereksinimler araştırılmış ve tanımlanmıştır. Gereksinimlerin tanımlanmasında ise uluslararası proje yönetim kurulunun belirlediği standartlar dikkate alınmıştır. Gereksinimlerin tanımlanmasından sonra paydaş analizinin aktörleri, her bir aktörün sahip olması gereken işlevler, paydaş analizi sınıfları ve veri modelleri geliştirilmiştir.

Yapılan çalışmalar neticesinde “Paydaş Analizi” aracı için kullanım senaryosu (use case) diyagramı hazırlanmıştır (Şekil 1). Paydaş analiz anketi, paydaşların hepsini temsil eden bir kısmının

incelenerek, paydaşların hepsi hakkında çıkarımlar yapmaya yarayan bir araştırma yöntemidir. Paydaşlar anketleri genellikle niceliksel olmaktadır. Paydaş analiz anketlerinden elde edilen veriler sayısal olmasa da anketlerden elde edilen bilgiler çoğunlukla sayısal yöntemler kullanılarak analiz edilmeye çalışılır. Paydaş analizi aracı ile hazırlanan anket soruları çeşitli kalıplarda olabilir. Paydaş anketleri belirli kurallara göre hazırlanmış sorular ve kalıp haline getirilmiş bir anket formu kullanılarak paydaş kümesinden sayısallaştırılabilecek veri toplamayı amaçlar. Bundan dolayı incelenen paydaş analiz anketlerine göre paydaş analiz aracında hazırlanacak olan anket soru kalıpları Tablo 1’deki gibi belirlenmiştir. Paydaşların anket sorularına verdiği cevaplar aşağıdaki gibi sıralı şekilde değerlendirilir ve tutulur. Bunun sonucunda veriler sınıflandırma algoritması ile sınıflandırma yapılabilecek halde sayısallaştırılır.



Şekil 1. Paydaş Analizi Aracı için Kullanım Senaryosu (Use Case for Stakeholder Analysis Tool)

Tablo 1. Anket Soru Kalıpları (Survey Question Patterns)

Anket Sorularının Alabileceği Değerler											
1	Kesinlikle Katılmıyorum	Çok az	Asla	Hiç Memnun değilim	Son Derece Olumsuz	Hiç İyi Değil	Hiç Katılmıyor	Hiç Net Değil	Hiç	Hiçbir Zaman	Hiç Faydalı Olmadı
2	Katılmıyorum	Az	Günlük	Memnun Değilim	Olumsuz	İyi Değil	Katılmıyor	Net Değil	Bazen	Arada Bir	Faydalı Olmadı
3	Kararsızım	Orta	Haftalık	Kısmen Memnunum	Ne olumlu Ne Olumsuz	Kısmen İyi	Biraz Katılıyor	Kısmen Net	Orta Sıklıkta	Bazen	Biraz Faydalı Oldu
4	Katılıyorum	Fazla	Aylık	Memnunum	Olumlu	İyi	Katılıyor	Net	Çok Sık	Çoğu Zaman	Faydalı Oldu
5	Kesinlikle Katılıyorum	Çok Fazla	Yıllık	Çok Memnunum	Oldukça Olumlu	Çok iyi	Son Derece Katılıyor	Son Derece Net	Son Derece Sık	Her Zaman	Çok Faydalı Oldu

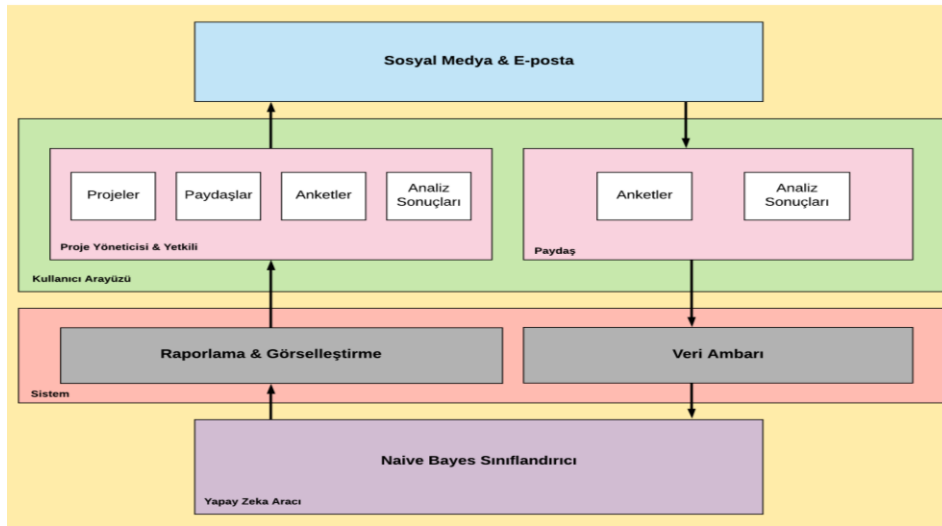
Bu cevap kalıplarıyla hazırlanan anketlerle paydaş analizini yapmamıza yarayacak bilgi, düşünce, görüş ve beklentileri tespit edilmek istenen paydaş kümesinin verileri sistematik bir şekilde toplanacaktır.

1.2.2. Tasarım (Design)

Paydaş analizinin önemli bir aşaması analize kaynaklık teşkil edecek verinin etkili bir şekilde toplanması ve işlenmesidir [10-17]. Bu amaçla mobil cihazlar ve çeşitli sosyal medya uygulamaları aracılığı ile geliştirilen yazılım aracı üzerinde veri girişi

sağlayan esnek bir uygulama mimarisi tasarlanmıştır (Şekil 2).

Yazılım tasarımında ve mimarisinin oluşturulmasında uluslararası standartlarına uygun olarak yazılım geliştirme prensiplerine bağlı kalınmıştır. Yetkili kullanıcıya sistemin karmaşıklığına karşın basit ve akıcı bir arayüz ile analizi başlatma, raporları görüntüleme özellikleri kazandırılmıştır.



Şekil 2. Uygulama Mimarisi (Application Architecture)

1.2.3. Paydaş Analizinde Yapay Zeka (*Artificial intelligence in stakeholder analysis*)

Paydaş Analizi sisteminin veri tabanında paydaşların anketlerden elde edilen özellikleri ve bu özelliklerin işlenmesiyle elde edilen bilgileri tutulacaktır. Bu verilerin işlenmesi ve anlamlı bilgi çıkarımı için kural tabanlı bir çıkarım mekanizması hazırlanmıştır. Kural tabanlı çıkarım mekanizmasında paydaşların anket verilerinde ki iletişim, yeterlilik, bilgi sahipliği, güvenlik, heveslilik, isteklilik, duyarlılık alanları incelenen paydaş anketleri

örneklerine göre kurallar tanımlanmıştır. Paydaşların verilen alanlardan herhangi birine verdiği cevaplar o sınıfa ait kurallara göre değerlendirilir. Paydaşlardan alınan anket verileri (ham veri) bu şekilde anlamlı bilgilere dönüştürülür. Sınıflandırıcı algoritma paydaşların projeyi destekleme durumlarını anket sorularından elde edilen özellik değerlerine göre sınıflandırır. Tablo 2’de paydaş analizi modelinde paydaşların analizi yaparken dikkate alacağımız bağımsız değişkenler, hedef parametre ve aldığı değer aralığı bulunmaktadır.

Tablo 2. Paydaş Analizi Modelinin Parametreleri (*Parameters of the Stakeholder Analysis Model*)

	Paydaş Analizi Bağımsız Değişkenleri							Çıktı
Özellik	İletişim	Yeterlilik	Bilgi Sahipliği	Güvenilirlik	Heveslilik	İsteklilik	Duyarlılık	Projenin Desteklenmesi
Aldığı Değer	[1.0-5.0]	[1.0- 5.0]	[1.0-5.0]	[1.0 - 5.0]	[1.0 - 5.0]	[1.0-5.0]	[1.0-5.0]	Olumlu Olumsuz

Paydaş verileri alanında ki her bir paydaş nesnesinin bireysel özellikleri vardır. *o*’, bir paydaş verisi olduğunu varsayalım. Paydaşın bu *o*’ nesnesiyle projeyi destekleme durumu, bu nesnenin bireysel ve ilişkisel nitelikleri hakkındaki verdiği değerlere(verilerine) bağlı olarak bulunur. Paydaşın bu *o*’ nesnesinin bireysel nitelikleri hakkındaki cevap verdiği anket soruları:

paydaşın iletişim derecesi “Id”, paydaşın proje hakkında yeterlilik derecesi “Yd”, paydaşın proje hakkında bilgi sahipliği derecesi “BSd”, paydaşın proje hakkında güvenilirlik derecesi “Gd”, paydaşın proje hakkında heveslilik derecesi “Hd”, paydaşın isteklilik derecesi “Pid”, paydaşın proje hakkında duyarlılık derecesi “Dd” ve bu cevaplara ait paydaşın projeyi destekleme durumu “Pdd”, dir. Paydaşın yapılan anketler sonucunda her bir paydaşın bağımsız değişken derecelerinin hesaplanması:

Tasarlanan modelde bir paydaş anket verisine ait bütün nitelikler için paydaşın nitelik değerlerinin ne kadar olduğu gösterilmektedir. Bu olması gereken değerler incelenen anketler sonucunda karar verilmiştir. Bir paydaşın nitelik değeri “Pd” ve bu nitelik değerinin olması gereken düzey “Od” olsun. “Od”, “Pd” ve nitelik derecelerinin bulunması için hazırlanan kurallara göre *Id, Yd, BSd, Gd, Hd, Pid, Dd, Pdd* dereceleri 5 farklı değer alabilir. Bunlar “çok az”, “az”, “orta”, “fazla”, “çok fazla” dır.

Id, Yd, BSd, Gd, Hd, Pid, Dd, Pdd =

$$\begin{cases} Kt < Od/5 \rightarrow \text{“Çok az”} \\ Od/5 < Kt < Od/4 \rightarrow \text{“az”} \\ Od/4 < Kt < Od/3 \rightarrow \text{“orta”} \\ Od/3 < Kt < Od/2 \rightarrow \text{“fazla”} \\ Od/2 < Kt \rightarrow \text{“Çok fazla”} \end{cases} \quad (1)$$

Hazırlanan uygulama tarafından toplanan paydaş verilerinin işlenmesinin ardından veriler içinde ki her bir paydaş nesnesinin bireysel *<Id, Yd, BSd, Gd, Hd, Pid, Dd, Pdd>* 6 özellik değeri ile paydaşın faydalı bilgileri elde edilmiş olur. Bu adımdan sonra paydaş verilerinde ki her bir nesne için bu 6 niteliğin değerlerine bağlı olarak paydaşın projeyi destekleme durumu hesaplanır.

Anketler ile paydaşlardan toplanan veriler kullanılan sınıflandırıcı algoritmanın değişkenlerini temsil etmektedir. Sınıflandırıcı algoritma oluşturulan paydaş nesnelere her birini değişken değerlerine göre sınıflandırır. Paydaş analizinde, kullanıcı modelleme problemlerinde en çok kullanılan algoritmalar Naive Bayes Sınıflandırıcı (NBS) kullanıldı. Naive Bayes istatistiksel (olasılıksal) sınıflandırma yöntemidir. Naive Bayes sınıflandırıcısı Bayes teoremini temel alır. Naive Bayes sınıflandırıcılar, bir verinin değerinin belirli bir sınıf üzerindeki etkisinin, diğer verilerin değerlerinden bağımsız olduğunu varsayar. Bu durum sınıf koşullu

bağımsızlık olarak da bilinir. Naive Bayes algoritmasının kullanılmasının sebebi, bir paydaşın sınıfını belirleyen niteliklerinin birbirinden bağımsız olmasıdır. NBS bir verinin hangi olasılıkla hangi sınıfa dahil olduğunu kestirmeyi sağlar. NBS 'de her paydaş ait olduğu sınıfın etiketini alır. Bu NBS' nin eğitim setini oluşturur. Az sayıda veri kümesiyle eğitim yapıldığında yeni bir örnek sınıf oluşabilir. NBS' nin bu özelliğinden dolayı NBS danışmalı öğrenme algoritması olarak bilinir. Eğitim verisinde her bir nesne n-boyutlu nitelik vektörü $\langle a_1, a_2, a_3, \dots, a_n \rangle$ ve bu özelliklere karşılık gelen bir sınıf etiketi "C", m-boyutlu olarak bulunur. Naive Bayes algoritmasında yeni bir nesnenin sınıflandırılması için o nesneyi tanımlayan niteliklerin değerlerine bakarak nesnenin en yüksek olasılıkla hangi sınıftan olduğu aşağıda Denklem 2 de verilmiştir. Bu metod "Maksimum Posterior Probability (MAP)" olarak bilinir [5, 18].

$$C_{MAP} = \underset{c_m \in C}{\operatorname{argmax}} P(c_m | a_1, a_2, a_3, \dots, a_n) \quad (2)$$

Bayes Teoremine göre düzenlendiğinde:

$$C_{MAP} = \underset{c_m \in C}{\operatorname{argmax}} \frac{P(a_1, a_2, a_3, \dots, a_n | c_m) P(c_m)}{P(a_1, a_2, a_3, \dots, a_n)} \quad (3)$$

$$= \underset{c_m \in C}{\operatorname{argmax}} P(a_1, a_2, a_3, \dots, a_n | c_m) P(c_m) \quad (4)$$

Naive Bayes teoreminde bir nesnenin sınıfı bulunmaya çalışıldığında her bir nitelik değerinin $\langle a_1, a_2, a_3, \dots, a_n \rangle$ birbirinden bağımsız olduğu kabul edilir. Bu duruma bağlı olarak hedef nesnenin hangi sınıf etiketini alacağına bulunması için niteliklerin ayrı ayrı bu sınıf etiketi için olasılık değerinin bulunması ve sonuçların değerlendirilmesi aşağıdaki gibi gerçekleştirilir.

$$C_{NB} = \underset{c_m \in C}{\operatorname{argmax}} P(c_m) \prod_{i=1}^n (a_i | c_m) \quad (5)$$

NBS, paydaş verilerinde ki her bir nesne için paydaşın projeyi destekleme durumunu belirler. Paydaş verilerinden elde edilen bilgilerle elde belirlenen ve tanımlanan kurallar doğrultusunda düzenlenen "paydaş proje destekleme durumu için şartlı olasılık dağılımları" verilmiştir. Tablo 3 de 350 veriden oluşan eğitim kümesi kullanılarak oluşturulmuştur.

Paydaş örnekleri kümesindeki özellikler paydaş proje destekleme modelindeki $\langle Id, Yd, BSd, Gd, Hd, İsteklilik, Duyarlılık \rangle$ uygun etiketlere atanırlar. Bu altı özellik değerine göre NB sınıflandırıcı algoritması her bir için paydaş proje destekleme durumu "olumlu" ya da "olumsuz" olarak sınıflandırır.

$\langle Id, Yd, BSd, Gd, Hd, İsteklilik, Duyarlılık \rangle$ uygun etiketlere atanırlar. Bu altı özellik değerine göre NB sınıflandırıcı algoritması her bir için paydaş proje destekleme durumu "olumlu" ya da "olumsuz" olarak sınıflandırır.

Tablo 3. Paydaş Proje Destekleme Durumu için Şartlı Olasılık Dağılımları (Conditional Probability Distributions for Stakeholder Project Support Status)

Özellik Adı		OLUMLU (186)	OLUMSUZ (164)
İletişim	Çok Az (70)	31/186	39/164
	Az (70)	42/186	28/164
	Orta (70)	43/186	27/164
	Fazla (70)	41/186	29/164
	Çok Fazla (70)	43/186	27/164
Yeterlilik	Çok Az (70)	22/186	48/164
	Az (70)	47/186	23/164
	Orta (70)	46/186	24/164
	Fazla (70)	42/186	28/164
	Çok Fazla (70)	53/186	17/164
Bilgi Sahipliği	Çok Az (71)	24/186	47/164
	Az (74)	36/186	38/164
	Orta (75)	41/186	34/164
	Fazla (72)	44/186	28/164
	Çok Fazla (58)	41/186	17/164
Güvenilirlik	Çok Az (70)	24/186	46/164
	Az (67)	21/186	46/164
	Orta (71)	37/186	34/164
	Fazla (72)	51/186	21/164
	Çok Fazla (70)	53/186	17/164
Heveslilik	Çok Az (71)	21/186	50/164
	Az (67)	24/186	43/164
	Orta (68)	45/186	23/164
	Fazla (70)	46/186	24/164
	Çok Fazla (74)	50/186	24/164
İsteklilik	Çok Az (67)	19/186	48/164
	Az (68)	20/186	48/164
	Orta (71)	43/186	28/164
	Fazla (70)	50/186	20/164
	Çok Fazla (74)	54/186	20/164
Duyarlılık	Çok Az (73)	25/186	48/164
	Az (68)	34/186	34/164
	Orta (72)	46/186	26/164
	Fazla (68)	39/186	29/164
	Çok Fazla (69)	42/186	27/164
Paydaşın Proje Destekleme Durumunun "Olumlu" ve "Olumsuz" olması olasılıkları		186/350	164/350

Paydaş verilerinin etiketlenmesi aşağıdaki gibidir:

- i. Paydaşın iletişim derecesi "Id"
- ii. Paydaşın proje hakkında yeterlilik derecesi "Yd"
- iii. Paydaşın proje hakkında bilgi sahipliği derecesi "BSd"
- iv. Paydaşın proje hakkında güvenilirlik derecesi "Gd"
- v. Paydaşın proje hakkında heveslilik derecesi "Hd"
- vi. Paydaşın isteklilik derecesi "İd"
- vii. Paydaşın proje hakkında duyarlılık derecesi "Dd"
- viii. Paydaşın projeyi destekleme durumu "PDd"

Örnek Durum: Anket yapılan bir paydaşın projeyi destekleme durumu belirlenecektir. Paydaşın anketlere verdiği cevaplara göre paydaş nesnesi aşağıda Tablo 4’de verilmektedir.

Tablo 4. Paydaş Nesnesi(Stakeholder Object)

Nesne	Id	Yd	BSd	Gd	Hd	Pld	Dd	PDd
a'	Az	Fazla	Orta	Çok Fazla	Çok Az	Az	Orta	?

Yukarıdaki tabloda bulunan paydaş anket değerlerine göre paydaşın projeyi destekleme durumu NB sınıflandırıcı kullanılarak bulunacaktır. NB Sınıflandırıcı tabloda ki verilere göre örnek durumu aşağıda ki şekilde ki gibi sınıflandırır: PDD (Paydaş Proje Destekleme Durumu) değerinin sınıfını (Olumlu, Olumsuz) bulmak için denklem 6 kullanılır [18]:

$$C_{NB} = \underset{c_m \in C}{\operatorname{argmax}} P(c_m) \prod_{i=1}^n (a_i | c_m) \quad (6)$$

$$C_{NB} = \underset{c_m \in (\text{olumlu}, \text{olumsuz})}{\operatorname{argmax}} P(c_m) P(Id = Az | c_m) P(Yd = Fazla | c_m) P(BSd = Orta | c_m) P(Gd = Çok Fazla | c_m) P(Hd = Çok Az | c_m) P(Pld = Az | c_m) P(Dd = Orta | c_m) \quad (7)$$

PDD hedef değerinin hangi paydaş sınıfına ait olduğunu bulmak için $\langle Id, Yd, BSd, Gd, Hd, Pld, Dd \rangle$ niteliklerinin her bir sınıf için olasılığını hesaplamamız gerekmektedir. Bu durumda 7 özellik değerinin 2 farklı sınıf için (olumlu, olumsuz) değeri hesaplanır.

$$P_{olumsuz} = \frac{164}{350} * \frac{28}{164} * \frac{28}{48} * \frac{34}{164} * \frac{17}{164} * \frac{50}{164} * \frac{164}{164} = 0,415238 * 10^{-5}$$

$$P_{olumlu} = \frac{186}{350} * \frac{42}{186} * \frac{42}{186} * \frac{41}{186} * \frac{53}{186} * \frac{21}{186} * \frac{20}{186} * \frac{46}{186} = 0,510998 * 10^{-5}$$

Elde edilen en büyük olasılık değerini normalize edilecek olursa:

$$P_{norm} = \left(\frac{0,510998 * 10^{-5}}{0,415238 * 10^{-5} + 0,510998 * 10^{-5}} \right) = 0,55$$

Yukarıda ki olasılık hesabına göre kullanıcının PDD değeri için ait olduğu sınıf “olumlu” dur.

SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu makale çalışmasında, proje yönetiminde yapay zeka tabanlı çözüm geliştirme üzerine önemli bir çalışma sunulmuştur. Proje yönetimindeki en önemli süreçlerden biri olan paydaş analizi konusunda yapay zeka tabanlı çalışan bir uygulama çerçevesi tanıtılmıştır. Paydaş analizi sürecinin problem alanından ve tüm kısıtlardan bağımsız bir şekilde ve uluslararası standartları gözeterek gerçekleştirebilmek büyük zorluklar içermektedir. Yüksek düzeyli soyutlama yeteneğine sahip ve modüler olarak geliştirilmiş öğelerden oluşan bir yazılım çevresini tasarlayarak bu zorluklar aşılmıştır. Bu makale, böylesi bir yazılım çevresinin tasarlanması yönünde yürütülmüş öncü çalışmalardan biri olarak literatüre kazandırılmıştır. Geliştirilen yazılım çevresi sayesinde proje konusundan bağımsız bir şekilde paydaşların tanımlanması, paydaş analizi konusunun modellenmesi ve analiz sürecinin aktör ve öğelerinin esnek bir şekilde sisteme entegre edilmeleri sağlanabilmektedir. Paydaşlara sunulacak anketler dinamik yapıda tasarlanmıştır. Gelecek çalışmalarda geliştirilen yazılımın büyük çaplı projelerde test edilmesi üzerine faaliyetlerin yürütülmesi planlanmaktadır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışmada yürütülen faaliyetler, 2020 yılında TÜBİTAK 2209-A Üniversite Öğrencileri Yurt İçi Araştırma Projeleri Destek Programı kapsamında 1919B011903604 numaralı proje olarak TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI BİLDİRİMİ (CONFLICT OF INTEREST STATEMENT)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] J. Berrocal, J. García-Alonso and J. M. Murillo, “Lean management of software processes and factories using business process modeling techniques”, in *International Conference on Product Focused Software Process Improvement*, Springer, Berlin, Heidelberg, June 2010, pp. 321-335.
- [2] N. Gül ve N. Arıcı, “Karıncı Kolonisi Algoritması ile Yazılım Proje Takvimi Oluşturma”, *Journal of New Results in Engineering and Natural Sciences*, vol. 8, pp. 38-47, 2018.

- [3] Ç. Elmas, A. Elmas, *Uluslararası Standartlara Göre Proje Yönetimi*, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 2018.
- [4] A. Guide, *A guide to the project management body of knowledge (PMBOK® guide)*, 6th ed, Newtown Square, *PA Project Management Institute*, 2017.
- [5] H. T. Kahraman, S. Sagiroglu, and I. Colak, "Novel user modeling approaches for personalized learning environments," *International Journal of Information Technology & Decision Making*, vol. 15, pp. 575-602, 2016.
- [6] D. D. Lewis, "Naive (Bayes) at forty: The independence assumption in information retrieval," in *European conference on machine learning*, Springer, Berlin, Heidelberg, April 1998, pp. 4-15.
- [7] M. Granik and V. Mesyura, "Fake news detection using naive Bayes classifier," in *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, May 2017, pp. 900-903.
- [8] J. Abellán and J. G. Castellari, "Improving the Naive Bayes classifier via a quick variable selection method using maximum of entropy," *Entropy*, vol.19, no. 6, pp. 1-17, 2017.
- [9] N. Jing, Z. Wu, S. Lyu and V. Sugumaran, "Information credibility evaluation in online professional social network using tree augmented naïve Bayes classifier," *Electronic Commerce Research*, vol. 21, pp. 1-25, 2019.
- [10] A. A. Elias, R. Y. Cavana and L. S. Jackson, "Stakeholder analysis for R&D project management," *R&D Management*, vol. 32, no. 4, pp. 301-310, 2002.
- [11] A. L. Jepsen and P. Eskerod, "Stakeholder analysis in projects: Challenges in using current guidelines in the real world," *International Journal of Project Management*, 27(4), pp. 335-343, 2009.
- [12] S. Missonier, and S. Loufrani-Fedida, "Stakeholder analysis and engagement in projects: From stakeholder relational perspective to stakeholder relational ontology," *International Journal of Project Management*, vol. 32, no. 7, pp. 1108-1122, 2014.
- [13] R. J. Yang, "An investigation of stakeholder analysis in urban development projects: Empirical or rationalistic perspectives," *International Journal of Project Management*, vol. 32, no. 5, pp. 838-849, 2014.
- [14] G. F. de Oliveira and R. Rabechini, "Stakeholder management influence on trust in a project: A quantitative study," *International Journal of Project Management*, vol. 37, no. 1, pp. 131-144, 2019.
- [15] N. P. Srinivasan and S. Dhivya, "An empirical study on stakeholder management in construction projects," *Materials Today: Proceedings*, vol. 21, pp. 60-62, 2020.
- [16] A. Ahmadi, R. Kerachian, R. Rahimi and M. J. E. Skardi, "Comparing and combining Social Network Analysis and Stakeholder Analysis for natural resource governance," *Environmental Development*, vol. 32, pp. 100-451, 2019.
- [17] S. R. Pandi-Perumal, J. L. Zeller, S. Parthasarathy, R. E. Freeman and M. Narasimhan, "Herding cats and other epic challenges: Creating meaningful stakeholder engagement in community mental health research," *Asian journal of psychiatry*, vol. 42, pp. 19-21, 2019.
- [18] Ş. Sağıroğlu, İ. Çolak ve H. T. Kahraman, "Geleneksel Web Tabanlı Öğretim Sistemlerinden Uyarlanın Öğretim Sistemlerine Geçiş: ÜHOS İçin Tasarım Yaklaşımlarının İncelenmesi," *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 23, no. 4, pp. 837-852, 2008.

NOT:

Bu makale, Uluslararası Mühendislikte Yapay Zeka ve Uygulamalı Matematik Konferansı (UMYMK 2020), 9 – 10 – 11 Ekim 2020, Antalya, Türkiye, isimli konferansında sunulmuş bildirinin genişletilmiş halidir.

A Novel Permutation Based Solution Representation Technique for Vehicle Routing Problems on GPUs

Erdener ÖZÇETİN^{a,*}, Gürkan ÖZTÜRK^b

^{a,*} Hitit Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, Çorum, Türkiye

^b Eskişehir Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye

ARTICLE INFO

Received: 10.01.2021
Accepted: 03.08.2021

Keywords:

Vehicle routing
problem
parallel programming
GPU
CUDA

ABSTRACT

In this study, the vehicle routing problem (VRP) which is a well-known NP-hard combinatorial optimization problem is handled on graphic processing units (GPUs). Solving optimally any kind of VRP is extremely hard when the instance size is large. For this reason, researchers tend to solve the VRP with meta-heuristics. Although, many well-designed meta-heuristics produce near-optimal solutions in reasonable time, still a challenge to solve large scale instances. To accomplish this issue, researchers need novel, fast and wisely designed parallel operators for the proposed algorithms. Furthermore, the success of these operators directly depends on the way the solution is represented. This paper offers a new permutation based solution representation technique ($\pi+$) for vehicle routing problems on GPUs. Results show that proposed technique can be used in many algorithms to accelerate computations.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.02.02>

Araç Rotalama Problemleri için Grafik İşlem Birimleri Üzerinde Yeni Bir Çözüm Gösterim Tekniği

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 10.01.2021
Kabul: 03.08.2021

Anahtar Kelimeler:

Araç rotalama
problemi
Paralel programlama
GPU
CUDA

ÖZ

Bu çalışmada, NP-Hard kombinatorik optimizasyon problemlerinden olan araç rotalama problemi (ARP), grafik işlem birimleri (GPU) üzerinde ele alınmıştır. Problem boyutunun büyümesiyle birlikte ARP'nin herhangi bir türünü optimal olarak çözmek oldukça zorlaşmaktadır. Araştırmacılar bu yüzden metasezgisel yöntemlere yönelmektedir. Her ne kadar bu metasezgisel algoritmalar kabul edilebilir sürelerde optimale yakın sonuçlar üretse de büyük boyutlu problemler için bu durum farklıdır. Bu durumu aşmak için, araştırmacılar önerilen algoritmalar için yeni, hızlı ve akıllıca tasarlanmış paralel operatörlere ihtiyacı bulunmaktadır. Bu operatörlerin başarısı doğrudan çözümün temsil edilme şekline bağlıdır. Bu makale, ARP'yi GPU'lar üzerinde etkin bir şekilde ele alabilmek için yeni bir permütasyon tabanlı çözüm gösterim tekniği ($\pi+$) sunmaktadır. Sonuçlar, önerilen tekniğin hesaplamaları hızlandırmak için birçok algorithmada kullanılabileceğini göstermektedir.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.02.02>

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

The vehicle routing problem (VRP) can be defined as the finding optimal routes of distribution plans with

side constraints [1]. Since the VRP introduced by Dantzig and Ramser [2], researchers have studied many variants of problem. This can be inferred that popularity of the VRP still ongoing since many

*Corresponding author: erdenerozcetin@hitit.edu.tr

To cite this article: Özçetin, E., Öztürk, G. "A Novel Permutation Based Solution Representation Technique for Vehicle Routing Problems on GPUs", *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol.7, no.2, pp. 90-98, 2021.
doi:<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.02.02>

applications of problem can be seen in real-life. Besides popularity, it is still a challenge to solve VRP optimally or near-optimally when the instance size increases.

Metaheuristic algorithms are generally cited as tools for solving certain types of optimization problems, such as combinatorial optimization problems like VRP. These algorithms do not guarantee the exact solution developed for optimization problems; but they are techniques that give satisfactory solutions in a short time. They are often used in cases where exact solution algorithms do not provide solutions in a reasonable time.

Whether it is exact method or meta-heuristic still requires intelligent and fast computational techniques. Especially, when the researchers study with very large scale problems, time is one of the most important issues to generate a good solution.

A graphics processing unit (GPU) is a processor designed to rapidly manipulate and alter memory to accelerate the visualization of images. As well as visualization, GPUs are increasingly used in computing. With the motivation of shortening the solution times of optimization problems, it is becoming widespread to develop metaheuristic algorithms on GPUs, mostly using by CUDA environment. However, this technology is an obstacle to the direct use of traditional programming knowledge and skills. In order to develop applications using this technology, it is necessary to understand the architecture of GPU very well.

The problem under consideration must be suitable for processing on the GPU. Furthermore, the representation of the problem and constraint handling will directly affect the efficiency of the GPU. In order to develop the algorithms on GPUs effectively, it is important to define proper representation to the problem structure.

In this study, we focus on solution representation of the VRP. We propose a new permutation based solution representation technique which we called π^+ . The main contributions of π^+ can be summarized as follows:

- It is easy to manipulate.
- It offers a tremendous speed up opportunity on GPUs
- It can be adaptable for other combinatorial optimization problems.

The remainder of this paper is organized as follows. In Section 2, we review the VRP and meta-heuristic algorithms on GPUs. In Section 3, we describe the proposed permutation based solution representation technique and in Section 4 we show the computational experiments. In conclusion, we discuss the efficiency of the proposed technique and the potential for future studies.

2. VRP AND META_HEURISTICS on GPUS (ARP ve GPU İÇİN METASEZGİSELLER)

Researchers commonly propose meta-heuristics algorithms for any variant of VRP. These algorithms can be single solution based such as tabu search, simulated annealing and variable neighborhood search or population based such as genetic algorithm and ant colony optimization. In many studies, these techniques can be hybridized and enriched with local search strategies to give both intensification and diversification properties to the algorithm.

2.1. VRP (Araç Rotalama Problemi)

There are many variants of the VRP in the literature such as capacity constrained, time windowed and open. When the VRP is mentioned, the first thing that comes to mind is the capacity constrained VRP. A vehicle fleet with the same capacity in the capacity-limited VRP moves from a warehouse and serves customers whose demands are known in advance. Each customer gets service from only one vehicle and each customer's demand is met. The vehicles cannot exceed their capacity and return to the warehouse at the end of service. It is aimed to find the least costly routes under these constraints. In one variant of the problem, there is the additional constraint that the travel time of each vehicle should not exceed a given travel time limit. In open VRP, each route starts at the depot and ends at a customer, visiting number of customers, each once, without returning to the depot.

Mathematical model of heterogeneous fleet open vehicle routing problem is given below.

Parameters:

$I, J = \{1, 2, \dots, n\}$: set of customers

$K = \{1, 2, \dots, m\}$: set of vehicles

r_k : capacity of k^{th} vehicle

d_j : demand of j^{th} customer

c_{ijk} : cost between j^{th} and j^{th} customer with k^{th} vehicle

Decision variables:

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{if } k^{\text{th}} \text{ vehicle serve } j^{\text{th}} \text{ cust. after } i^{\text{th}} \text{ cust.} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$y_{jk} = \begin{cases} 1, & \text{if } k^{\text{th}} \text{ vehicle serve } j^{\text{th}} \text{ customer} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

Objective:

$$\min z = \sum_i \sum_j \sum_k c_{ijk} x_{ijk} \quad (1)$$

Constraints:

$$\sum_{i,i \neq j} x_{ijk} = y_{jk}, \forall j, k, j > 1 \quad (2)$$

$$\sum_{j,i \neq j, j > 1} x_{ijk} \leq y_{ik}, \forall i, k, i > 1 \quad (3)$$

$$\sum_j \sum_k x_{1jk} \leq m \quad (4)$$

$$\sum_{j,j > 1} d_j y_{jk} \leq r_k, \forall k \quad (5)$$

$$\sum_i \sum_k x_{ijk} = 1 \quad \forall j > 1 \quad (6)$$

$$u_{ik} - u_{jk} + r_k x_{ijk} \leq r_k - d_j, i \neq j, i > 1 \& j > 1 \vee d_j + d_i \leq r_k \quad (7)$$

With the objective function (Eq. 1) the total cost is minimized. Constraint (Eq. 2) guarantees that j^{th} customer will be served by k^{th} , if $y_{jk} = 1$. Constraint set (Eq. 3) states that, if customer i^{th} is visited by k^{th} vehicle; then this vehicle may travel or may not travel to another customer. Constraint (Eq. 4) limits the number of vehicles. It is ensured not exceeding the capacities of the vehicles with (Eq. 5). Constraint set (Eq. 6) indicates that every customer must be visited exactly once. Relations (Eq. 7) are the sub-tour elimination constraints.

VRP diversifies according to the needs in application and gains new variants every day. Both technological innovations and the needs of the industry have led to the emergence of many different types of VRP. However, the need to make effective decisions in a short time has led researchers to various studies on VRP's solution methods.

The diversity of models and solution approaches in vehicle routing is enormous (see, e.g., [3] and [4]). For detailed information for variants of problem, readers are encouraged to see [5]. Some meta-heuristic approaches are commonly studied to solve the VRP like tabu search [6], variable neighborhood search [7] and ant colony optimization [8]. The number of metaheuristic algorithms in the literature can be easily increased, but in this study, we focus on the solution representations used in metaheuristic algorithm design for the VRP.

2.2. Meta-heuristics on GPUs (Grafik İşlem Birimleri Üzerinde Metasezgisel Algoritmalar)

Although metaheuristic algorithms search for solution spaces with highly advanced techniques, the increase in the size of the instances can cause algorithms to not converge to the best solution. Therefore, parallelization is a very important tool that allows the development of new methods for solving large problems.

Parallel computing has been an advanced way of solving difficult large-scale problems for years. The design and coding of sophisticated parallel metaheuristic algorithms are directly affected by the platform where the calculation will be made. GPU, which is used as a visualization tool in computer systems, is one of these platforms.

It is a fact that metaheuristic algorithms significantly reduce the computational complexity and perform the search for the best solution, but the increase in the size of the problems causes the solution times to increase and the solution quality to decrease. In combinatorial optimization problems, the increase in the instance size causes the solution space to grow exponentially. However, computing the objective function and many other calculations require more processing time. For these reasons, a parallel design to metaheuristic algorithms comes to the fore. In a broader sense, parallel and distributed computing on metaheuristic algorithms aims to:

- Speeding up the search,
- Improving the quality of the solution obtained,
- Increasing consistency,
- Solving large scale problems.

With these purposes, parallelization in metaheuristic algorithms occurs in three main dimensions:

- Solution level parallelization: This type of parallelization involves the simultaneous computation of the evaluation of a single solution by breaking it into pieces.
- Parallelization at the level of iteration: It means that multiple solutions can be calculated simultaneously or that the neighborhood comparison on a solution can be partitioned and evaluated simultaneously.
- Algorithmic level parallelization: It is the simultaneous processing of different metaheuristic algorithms in order to obtain more consistent results.

2.2.1. Literature review (Literatür incelemesi)

When we focus on combinatorial optimization problems that studied on GPUs, there are several publications in the literature. Tsutsui and Fujimoto [9] presented a parallel genetic algorithm on GPUs for the quadratic assignment problem (QAP) in their study. In this study, 3 to 12 times faster results were obtained than the serial algorithm. In another study [10], the same authors presented a method for the solution of the quadratic assignment problem, consisting of optimizing ant colonies and combining the 2-opt local search algorithm. According to the results, it was emphasized that the solution times on the GPUs are 24.6 times faster than the serial one. Czapski [11] developed multiple onset tabu search algorithm for the QAP in the CUDA environment in their paper. In this study, some of the literature problems developed for the QAP were addressed and results were obtained in up to 70 times shorter time with solutions that averagely have 1% gaps to optimal solutions. The same problems also studied on GPUs in [12] and [13].

Cecilia et al. [14] developed an ant colonies optimization for the travelling salesman problem and obtained solutions up to 20 times faster. In another study conducted for the same problem, Delevacq et al. [15] achieved an acceleration up to 23.6 by ant colonies optimization.

Although the literature is rich on GPU implementations of population-based metaheuristics, only a few publications discuss routing problems. Shulz [16] presented a study on applications of local search algorithms for VRP. In the study, the memory operations were emphasized which is one of the bottlenecks when operating on GPUs. In another study for the VRP, Groer et al. [17] have applied local search techniques on GPUs. In another study, Szymon and Dominik [18] developed a parallel tabu search algorithm on GPUs for the multi-criteria VRP.

Local Search is a basic algorithm in discrete optimization and used commonly with metaheuristics. With the availability of CUDA, the number of papers studying local search based metaheuristics on the GPU increased. The technical report by Luong et al. [19] discusses a CUDA based GPU implementation of local search. The neighborhood evaluation is the most computationally intensive task in local search based algorithms such as variable neighborhood search. In many applications, selecting the best move is not always done on the GPU to use memory operation efficiently. The papers (Luong et al. [19], O'Neil et al.

[20], Coelho et al. [21], Rocki and Suda [22]) all discuss different implementation details and CUDA specific optimizations.

The strategy that used for handling of constraints and objective components for each solution in the neighborhood is an almost perfect parallel task, see for instance [23] and [24] for an illustrating example.

2.2.2. Handling VRP with meta-heuristics (ARP'nin metasezgisellerle ele alınması)

There are some solutions representation methods for VRP, such as permutation based and binary encoding. An example of permutation based representation can be seen for VRP in Figure 1. It is known that representation methods for VRP strictly depends on the constraints of problem. In addition to this, time consuming operations can be handled according to representation of problem.

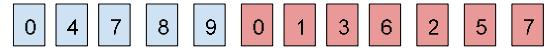


Figure 1: An example of permutation representation for VRP (ARP için permütasyon tabanlı gösterime bir örnek)

When it comes to parallel algorithms and concurrent computing, representation design of the problem comes to the fore. Davidovic et al. [25] offers the permutation based representation the best for concurrent computation on many types of problems.

3. Proposed Solution Approach (Önerilen Çözüm Yaklaşımı)

In many CPU-GPU oriented meta-heuristic algorithms for combinatorial optimization problems like the VRP are designed as follows: The starting solutions are generated and some complex operations are made on the host (CPU side). Then the solution is manipulated and sent to device (GPU side) to make parallel computations. This procedure brings many memory operations between host and device which makes GPUs inefficient.

Presentation of solutions on the GPU is extremely critical in terms of the simultaneous operation of the algorithm. π^+ has been proposed to show the solutions on the GPU, which provides many advantages.

3.1. Representation (Gösterim)

The main purpose of the π^+ is to standardize route lengths. We used dummy demand points (\emptyset) to ensure that all routes have equal lengths. The distance of all demand points including the warehouse to \emptyset is θ , and

the distance of \emptyset to all demand points is a very large number (M). At the same time, the distance of \emptyset to itself is 0 . However, \emptyset does not have demand.

To make the new representation format easy to understand, we will continue to explain π^+ on open VRP. As it is mentioned before, in open VRP, a route starts from depot and ends at a customer. In this example, we assume that all the vehicles are identical. Namely, they have the same capacities. Except for the warehouse and dummy demand points, the demands are arranged in ascending order to obtain the maximum number of different demand points that can be served with one vehicle. The number l is obtained by adding 2 to this number. The reason for adding 2 to this value is that, in accordance with open VRP, the first elements in each route are created from the warehouse last elements and the dummy demand points.



Figure 2: An example of π^+ for open VRP (*AARP için bir π^+ örneği*)

The total length of a π^+ is obtained by multiplying the l by the number of vehicles. An example of π^+ with 2 vehicles and 8 nodes including the warehouse is as in Figure 2. Accordingly, it is assumed that a maximum of 4 different demands can be loaded on a vehicle according to the vehicle capacity by listing the demands ascending. Therefore, the number l is determined as 6. In π^+ every l segment represents a route.

For this example, the objective function of π^+ can be calculated as $\sum_{i=0}^{n-1} cost[\pi^+[i], \pi^+[i+1]]$. Please note that only a dummy demand point is added as the last column and last row in the cost or distance matrix.

3.2. Objective Function Calculation (*Amaç fonksiyonu hesaplaması*)

Objective function calculation is a critical issue for meta-heuristics. Depending on the flow of the algorithm and type of the problem, the objective function may need to be calculated over and over again. π^+ can reduce computation time for many combinatorial optimization problems like the open VRP on GPUs. This should be considered that each route designed as a block on grid structure of GPU. A vector can be defined on device for π^+ and each element of this vector will keep a route's cost.

Two random instances were created to show the effectiveness of the proposed solution representation method in calculating the parallel objective function. According to this, the instance A has 79 customers and a depot with 10 vehicles, and the instance B has 385 customers and a depot with 47 vehicles. We generate random solutions between 2^{10} and 2^{20} . Time of generating these solutions were discarded from comparison. On the other hand, we took into account the time of data transfers to GPU side for fair comparison. The comparisons for these random instances are shown in seconds in Table 1. This can be said that the objective function evaluation on GPUs with π^+ for open VRP offers a tremendous speed-up. In addition, it should not be overlooked that algorithms do not only consist of calculating the objective function, but also have many other computational operators. For this reason, we focused also other operators like local search.

Table 1: Performance comparison on objective function calculation (*Amaç fonksiyonu bakımından performans karşılaştırması*)

Number of solutions	A		B	
	n80k10 CPU (secs)	n80k10 GPU (secs)	n386k47 CPU (secs)	n386k47 GPU (secs)
2^{10}	0.126	0.085	0.356	0.097
2^{11}	0.154	0.088	0.620	0.100
2^{12}	0.300	0.089	1.412	0.104
2^{13}	0.529	0.094	2.500	0.106
2^{14}	1.162	0.096	5.528	0.143
2^{15}	2.285	0.136	10.027	0.152
2^{16}	4.383	0.142	20.497	0.210
2^{17}	8.887	0.151	42.560	0.351
2^{18}	20.770	0.225	84.241	0.676
2^{19}	34.871	0.365	174.168	1.378
2^{20}	73.872	0.649	372.455	3.282

3.3. Local Search Operators (*Yerel arama operatörleri*)

Most of well-designed meta-heuristics use local search operators. We can divide local search algorithms for VRP into intra-route and inter-route operators. Intra-route algorithms search for some neighborhoods in a route and inter-route algorithms search for neighborhoods between two or more routes.

3.3.1. Intra-route local search operators (*Rota içi yerel arama operatörleri*)

The most popular intra-route local search algorithms are Or-opt, 2-opt or 3-opt for the VRP. We implemented 2-opt and Or-opt for open VRP on GPUs to show the efficiency of π^+ .

Since a similar strategy is followed in all neighborhoods, the operation on GPU is explained in detail only over the 2-opt neighborhood. Breaking (i, j) and $(i + 1, j + 1)$ connections by breaking $(i, i + 1)$ and $(j, j + 1)$ connections with $j \geq i + 2$ in each route, simultaneously on all routes is tested. The inverse conversion between $(i + 1, j + 1)$ performing at the appropriate ones is also performed simultaneously (see Figure 3)

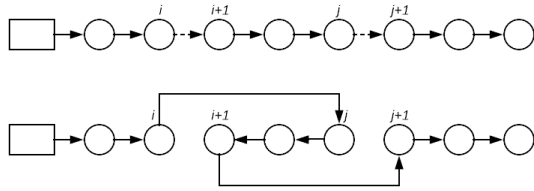


Figure 3. 2-opt neighborhood (2-opt komşuluğu)

In π^+ , the warehouse that states at the beginning of the routes and the \emptyset that states at the end of routes are excluded from the local search. However, in π^+ , \emptyset can also take place somewhere else the last point. When looking at the 2-opt neighborhood, the \emptyset in the route is prevented from getting ahead of a demand point, thanks to the large number of the distance of \emptyset to the demand points in the cost matrix. This block level parallelization can bring tremendous speed-up to intra-route local search operators.

3.3.2. Inter-route local search operators (Rotalar arası yerel arama operatörleri)

Basically, inter-route algorithms make moves between two or more vehicles. When concurrent search between vehicles is concerned, bank conflict should be taken into consideration. For GPUs the local memory is divided into memory banks. Each bank can only address one dataset at a time, so if a half-warp tries to load/store data from/to the same bank the access has to be serialized. In detail, this is not possible to compare a vehicle with more than one vehicle and apply meaningful changes in simultaneous operation (see Figure 4).

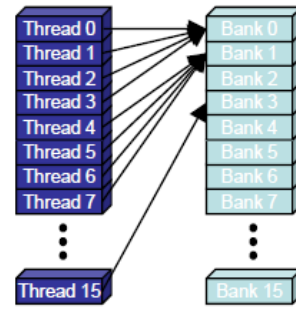


Figure 4. Bank conflict example (Bank uyumsuzluğu örneği)

For example, we suppose a one-to-one change (see Figure 5) inter-route search is performed on an example with three routes (R=Route, $R1-R2, R1-R3$). In this case, in the comparisons of $R1-R2$ and $R1-R3$, an element from $R1$ may be replaced by an element from both $R2$ and $R3$, and this causes the algorithm to malfunction or bank conflict in technological term.

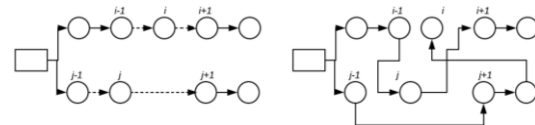


Figure 5. One-to-one change neighborhood (Bire-bir değişim komşuluğu)

In the proposed parallel method, comparisons up to $int((number\ of\ vehicles) / 2)$ during the search between vehicles are considered simultaneously. To compare all vehicles with each other a loop must be found in the code. In this case, there is a need for an index set that states which routes to compare in each repetition. Successively indexed routes are taken simultaneously for comparison. A reciprocal change of element between routes has been considered for each vehicle to be used at most once. A route cannot be processed more than once in a concurrent transaction. An example of the index set can be seen in Figure 6.

		▲		▲		▲	
loop							
1	1	2	3	4	5	6	
2	1	3	2	4	5	6	
3	1	4	2	5	3	6	
4	1	5	2	6	3	4	
5	1	6	2	3	4	5	
6	1	2	3	5	4	6	

Figure 6. An example of index set (İndeks kümesi örneği)

4. Computational experiments (Hesapsal deneyeler)

With the proposed π^+ many calculations can be done in a parallel manner on GPUs. For a meta-heuristic algorithm that solves the VRP on graphic processing units can easily calculate objective function and run local search operators.

4.1. Test Environment (Test ortamı)

The platform for our investigations is a modern NVIDIA Maxwell architecture GPU (GTX 980) with 16 streaming processors, each with 128 cores, a total of 2048 cores for parallel computation. In addition, our workstation has an Intel Xeon E5-2630 2.4 Ghz. CPU and 32 GB RAM. Python 2.7 was used when coding the algorithms. Furthermore, PyCuda [26] library is used for GPU operations. Finally, kernels are coded as C++.

4.2. Performance of local search operators (Yerel arama operatörlerinin performansı)

In this study, it is not aimed to design a total meta-heuristic algorithm for open VRP. However, we define a way to get performance of local search operators on GPUs by means of time. This should be considered that if we design an operator that has many conditional statements, the efficiency of GPUs would drop noticeably.

A wise performance evaluation method has been followed. We test intra-route (2-opt, Or-opt) and inter-route (one to one change) local search algorithms, respectively with different iterations. It is not allowed vehicle capacities to be exceeded, therefore we can say that we have a time-consuming process during the control of vehicle capacities in the exchange between routes. Furthermore, we consider the time of initial solution transfer to GPU side for fair comparison. Furthermore, in contrast to objective function evaluation we handle a single solution.

In Table 2, the results in seconds can be seen for different iterations for problem A and B. This can be said that memory transfer is a bottleneck for GPU side, up to 5000 iterations. This can be comprehended that when the number of iterations increases, things turn in favor of GPU. In the B problem with 386 customers and 47 vehicles, when the number of iterations is increased, an acceleration of up to five times is observed. As a consequence, a significant acceleration can be given to the algorithm with the proposed strategy.

Table 2. Performance comparison on local search operators (Yerel arama operatörleri bakımından performans karşılaştırması)

Iterations	A		B	
	n80k10 CPU (secs) (serial code)	n80k10 GPU (secs) (parallel code)	n386k47 CPU (secs) (serial code)	n386k47 GPU (secs) (parallel code)
1000	0.705	1.166	1.788	3.366
2500	1.655	1.754	3.670	4.785
5000	2.698	2.227	6.299	6.213
10000	5.993	3.566	14.365	9.137
25000	12.367	5.217	29.437	13.767
50000	22.335	7.425	56.432	18.998
100000	39.215	9.665	110.369	29.231

5. Conclusions and Further Research (Sonuçlar ve gelecek çalışmalar)

For high GPU utilization, there are a number of implementation issues, the most important ones being related to configuration and use of memory structures, and code diversion for configurable thread blocks. There is still a need to solve large combinatorial optimization problems like the VRP with fast meta-heuristic algorithms. GPU offers an opportunity to accelerate algorithms.

In this study, we propose a novel permutation-based solution representation technique which is easy to manipulate for the VRP. The proposed representation technique can be used with many meta-heuristic algorithms and many variants of the VRP. We showed the efficiency of this technique on objective function calculation and some local search operator. For the objective function calculation, the parallel implementation runs up to 100 times faster than the sequential one. A promising acceleration for the local search operators have also been obtained. For further studies, researchers can adapt the proposed representation technique to other combinatorial optimization problems such as quadratic assignment problem with new heuristic or meta-heuristic algorithms.

ACKNOWLEDGMENT (TEŞEKKÜR)

This work was funded with projects by Eskisehir Technical University, project numbers 1601F004 and 19ADP022.

CONFLICT OF INTEREST STATEMENT (ÇIKAR ÇATIŞMASI BİLDİRİMİ)

No potential conflict of interest was reported by the authors.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

[1] Gilbert Laporte, “The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms”, *European Journal of Operational Research*, vol. 5 no. 3, pp. 345-358, 1992. doi:https://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(92)90192-C

[2] G. Dantzig and J. Ramser, “The Truck Dispatching Problem”, *Management Science*, vol. 6, pp. 80-91, 1959. doi: https://dx.doi.org/10.1287/mnsc.6.1.80

[3] P. Toth and D. Vigo, “The granular tabu search and its application to the vehicle-routing problem”, *Inform Journal on Computing*, vol. 15, no. 4, pp. 333-346, 2003. doi: https://dx.doi.org/10.1287/ijoc.15.4.333.24890

[4] D. Pisinger and S. Ropke, “A general heuristic for vehicle routing problems”, *Computers & Operations Research*, vol. 34, pp. 2403-2435, 2007. doi: https://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2005.09.012

[5] S. N. Kumar and R. Panneerselvam, “A Survey on the Vehicle Routing Problem and Its Variants”, *Intelligent Information Management*, vol. 4, pp. 66-74, 2012. doi: https://dx.doi.org/10.4236/iim.2012.43010

[6] E. Taillard, P. Badeau, M. Gendreau, F. Guertin and J.Y. Potvin, “A Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows”, *Transportation Science*, vol 31, no. 2, pp. 101-195, 1997. doi:https://dx.doi.org/10.1287/trsc.31.2.170

[7] K. Fleszar, I. Osman and K. Hindi, “A variable neighbourhood search for the open vehicle routing problem”, *European Journal of Operational Research*, vol. 195, pp. 803-809, 2009. doi: https://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2007.06.064

[8] Bin Yu, Zhong-Zhen Yang, Baozhen Yao, “An improved ant colony optimization for vehicle routing problem”, *European Journal of Operational Research*, vol. 196, no. 1, pp. 171-176, 2009. doi:https://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2008.02.028

[9] Shigeyoshi Tsutsui and Noriyuki Fujimoto, “Solving quadratic assignment problems by genetic algorithms with GPU computation: a case study,” in *Proceedings of the 11th Annual Conference*

Companion on Genetic and Evolutionary Computation Conference: Late Breaking Papers (GECCO '09), New York, USA, 2009, pp. 2523–2530.

doi:https://dx.doi.org/10.1145/1570256.1570355

[10] S. Tsutsui and N. Fujimoto, “Fast QAP solving by ACO with 2-opt local search on a GPU,” *2011 IEEE Congress of Evolutionary Computation (CEC)*, 2011, pp. 812-819. doi: https://dx.doi.org/10.1109/CEC.2011.5949702.

[11] M. Czapinski, “An effective Parallel Multistart Tabu Search for Quadratic Assignment Problem CUDA platform”, *J. Parallel Distrib. Comput.*, vol. 73, pp. 1461-1468, 2013. doi:https://dx.doi.org/10.1016/j.jpdc.2012.07.014

[12] E. Özçetin, G. Öztürk, “A Parallel Iterated Local Search Algorithm on GPUs for Quadratic Assignment Problem”, *International Journal of Engineering Technologies*, vol. 4, no. 2, pp. 123-127, 2018.

[13] E. Özçetin, G. Öztürk, “A Hybrid Genetic Algorithm for the Quadratic Assignment Problem on Graphics Processing Units”, *Anadolu University Journal of Science and Technology-A Applied Sciences and Engineering*, vol. 17, no. 1, pp. 167-180, 2016. doi: https://dx.doi.org/10.18038/btda.15399

[14] J. M. Cecilia, J. M. Garcia, A. Nisbet, M. Amos and M. Ujaldon, “Enhancing data parallelism for Ant Colony Optimization on GPUs”, *J. Parallel Distrib. Comput.*, vol. 73, pp. 42-51, 2013. doi: https://dx.doi.org/10.1016/j.jpdc.2012.01.002

[15] A. Delevacq, P. Delisle, M. Gravel and M. Krajecki, “Parallel Ant Colony Optimization on Graphics Processing Units”, *J. Parallel Distrib. Comput.*, vol. 73, pp. 52-61, 2013. doi: https://dx.doi.org/10.1016/j.jpdc.2012.01.003

[16] C. Schulz, “Efficient local search on the GPU- Investigations on the vehicle routing problem”, *J. Parallel Distrib. Comput.*, vol. 73, no.1, pp. 14-31, 2013.

[17] C. Groer, B. Golden and E. Wasil, “A Parallel Algorithm for the Vehicle Routing Problem”, *INFORMS Journal on Computing*, vol. 23, pp. 315-330, 2011. doi: https://dx.doi.org/10.1287/ijoc.1100.0402

[18] J. Szymon and Z. Dominik, “Solving Multi-criteria Vehicle Routing Problem by Parallel Tabu Search on GPU”, *Procedia Computer Science*, vol. 18, pp. 2529-2532, 2013.

[19] Thé Van Luong, Nouredine Melab, El-Ghazali Talbi. "GPU Computing for Parallel Local Search Metaheuristics", *IEEE Transactions on Computers*, vol. 62, no. 2, pp.173-185, 2013. doi: <https://dx.doi.org/10.1109/TC.2011.206>

[20] M.A. O'Neil, D. Tamir, M. Burtscher, "A parallel GPU version of the traveling salesman problem," in: *Proceedings of the International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications*, Lasvegas, Nevada, USA, 2011, pp.348-353.

[21] I. Coelho, L. Ochi, P. Munhoz, M.Souza, C. Bentes, R. Farias, "The Single Vehicle Routing Problem with Deliveries and Selective Pickups in a CPU-GPU Heterogeneous Environment", *International Journal of Production Research*, vol. 54, no. 4, 945-962, 2016. doi:<https://dx.doi.org/10.1080/00207543.2015.1035811>

[22] K. Rocki and R. Suda, "Accelerating 2-opt and 3-opt Local Search Using GPU in the Travelling Salesman Problem" 2012 12th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing, 2012, pp. 705-706. doi: <https://dx.doi.org/10.1109/CCGrid.2012.133>.

[23] N. Melab, E.G. Talbi, S. Cahon, E. Alba, G. Luque, "Parallel Metaheuristics: Models and Frameworks," in *E.G. Talbi Parallel Combinatorial Optimization*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2006, pp. 149-161.

[24] André R. Brodtkorb, Trond R. Hagen, Christian Schulz, Geir Hasle, "GPU computing in discrete optimization. Part I: Introduction to the GPU", *EURO Journal on Transportation and Logistics*, vol. 2, no. 1-2, pp. 129-157, 2013. doi: <https://dx.doi.org/10.1007/s13676-013-0025-1>

[25] T. Davidović, P. Hansen, N. Mladenovic, "Permutation-based genetic, tabu and variable neighborhood search heuristics for multiprocessor scheduling with communication delays", *Asia Pacific Journal of Operational Research*, vol. 22, no.3, 2005. doi:<https://dx.doi.org/10.1142/S021759590500056X>

[26] A. Klöckner, N. Pinto, Y. Lee, B. Catanzaro, P. Ivanov ve A. Fasih, "PyCUDA and PyOpenCL: A scripting-based approach to GPU run-time code generation", *Parallel Computing*, vol. 38, no. 3, pp. 157-174, 2012.

NOT: This article is an expanded version of the paper presented at the International Conference on Engineering Technologies (ICENTE'20) has been organized in Konya, Turkey on 19-21 November 2020.

Sertleştirilmiş AISI H13 Takım Çeliğinin Delme Performansını İyileştirmek İçin Elektro Erozyon İşleme Parametrelerinin Taguchi Yöntemi Kullanılarak Modellenmesi ve Optimizasyonu

Engin NAS^{*a}, Erman ZURNACI^b, Sıdıka YILDIRIM^a

^a* Düzce Üniversitesi Cumayeri Meslek Yüksekokulu Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Düzce, Türkiye

^b Kastamonu Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Kastamonu, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 05.04.2021
Kabul: 05.08.2021

Anahtar Kelimeler:

Elektro erozyon işleme, AISI H13 çeliği, Ölçü tamlığı, Taguchi, Anova,

ÖZ

AISI H13 sıcak iş takım çeliği, sahip olduğu mekanik ve termal özellikleri nedeniyle endüstriyel kalıpcılık uygulamalarında sıklıkla kullanılan bir malzemedir. Elektro Erozyonla İşleme yöntemi (EEI) ise özellikle karmaşık geometriye sahip ve ölçüsel hassasiyeti yüksek parçaların işlenmesinde tercih edilen bir yöntemdir. Bu çalışmada; sertleştirilmiş AISI H13 sıcak iş takım çeliğinin farklı işleme parametreleri (akım şiddeti, vurum süresi, elektrot tipi) kullanılarak elektro erozyon işleme yöntemi ile delinmesinde, işleme parametrelerinin delik çapı ve kalitesi üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel tasarım Taguchi yöntemi ile oluşturulmuş, deneysel parametreleri L_{27} ortogonal dizin kullanılarak belirlenmiştir. Deneysel tasarımda, işleme parametreleri olarak üç farklı elektrot tipi (Bakır, Grafit, Tuncop), üç farklı vurum süresi (200, 300, 400 μ s), üç farklı akım şiddeti (4, 8, 12 A), 0,5 mm talaş derinliği ve 50 μ s bekleme süresi kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar, varyans analizi (ANOVA) ve sinyal / gürültü (S/N) oranı kullanılarak değerlendirilmiştir. Yapılan çalışmanın sonucunda, işleme parametrelerinin delik çapının ölçüsel doğruluğu üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir. Sinyal/Gürültü oranları incelendiğinde, elektrot çapına en yakın delik çapını elde etmek için gerekli işleme parametrelerinin $A_3B_1C_1$ (Bakır–200 μ s–4 A) olduğu belirlenmiştir. Anova analizi sonuçları değerlendirildiğinde, delik çapının ölçüsel doğruluğu üzerinde en etkili işleme parametresinin elektrot malzemesi olduğu, en az etki eden işleme parametresinin ise vurum süresi olarak olduğu tespit edilmiştir.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.02.03>

Modelling and Optimization of Electrical Discharge Machining Parameters Using the Taguchi Method to Improve the Drilling Performance of Hardened AISI H13 Tool Steel

ARTICLE INFO

Received: 05.04.2021
Accepted: 05.08.2021

Keywords:

Electro Discharge Machining, AISI H13 Steel, Taguchi, Anova, Dimensional accuracy

ABSTRACT

AISI H13 hot work tool steel is a material that is frequently used in industrial molding applications due to its mechanical and thermal properties. Electric Discharge Machining (EDM) is a preferred method especially for the machining of parts with complex geometry and high dimensional precision. In this study; the effects of machining parameters on hole diameter and surface quality were investigated experimentally when drilling hardened AISI H13 hot work tool steel using different machining parameters (current, pulse on- time, electrode material) by electric discharge machining method. The experimental design was developed with the Taguchi method, experimental parameters were determined using the L_{27} orthogonal array. In the experimental design; three different electrode material (Copper, Graphite, Tuncop), three different pulse-on times (200, 300, 400 μ s), three different currents (4, 8, 12 A), 0.5 mm depth of cut and 50 μ s pulse-

*Corresponding author: enginnas@duzce.edu.tr

To cite this article: Nas, E., Zurnacı, E. and Yildirim, S. "Modelling and Optimization of Electrical Discharge Machining Parameters Using the Taguchi Method to Improve the Drilling Performance of Hardened AISI H13 Tool Steel", *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol.7, no.2, pp. 99-110, 2021. doi: <https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.02.03>

of time was used as machining parameters. Experimental results were evaluated by using analysis of variance (ANOVA) and signal/noise (S/N) ratio. As a result of the study, it was determined that the machining parameters have an effect on the dimensional accuracy of the hole diameter. Processing parameters that the required to obtain the hole diameter closest to the electrode diameter was determined as $A_3B_1C_1$ (Copper - 200 μ s - 4 A) using Signal/Noise ratios. When the ANOVA results were evaluated, it was determined that the most effective machining parameter on the dimensional accuracy of the hole diameter as the electrode material, and the least effective machining parameter was the pulse-on time.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.02.03>

1. INTRODUCTION (Giriş)

Sıcak iş takım çelikleri, özellikle yüksek sıcaklık gerektiren endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılan malzemelerden birisidir. Sıcak iş takım çelikleri, dövme kalıpcılığı, hafif metal ekstrüzyonu ve yüksek basınçlı döküm gibi kalıpcılık sektöründe tercih edilmektedir. İçyapısındaki içerdikleri elementlere göre krom, molibden ve tungsten esaslı olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır [1]. Kimyasal alaşımlarından dolayı sağladıkları dayanım avantajı sayesinde, yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen metal ve metal olmayan malzemelerin şekillendirilmesinde kullanılmaktadırlar [2]. En uygun sıcak iş takım çeliğinin belirlenmesinde, maliyetinin yanında işleme şartları ve üretim parametreleri gibi kriterler dikkate alınmaktadır. AISI H13 sıcak iş takım çelikleri, yüksek sıcaklıklarda mekanik ve termal özelliklerini koruduklarından, yeterli plastik deformasyon ve distorsiyon direnci gösterdiklerinden dolayı sıcak dövme kalıplarında yaygın olarak kullanılırlar [3].

Elektro erozyon yöntemi ile işleme (EDM), karmaşık ve ölçü hassasiyeti yüksek parçaların işlenmesinde kullanılmaktadır. Ayrıca, sert malzemeler ve hassas işleme için özellikle tavsiye edilmektedir [4]. Bahsedilen avantajları dikkate alındığında EDM işleminin kalıpcılık için en uygun imalat yöntemlerinden birisi olduğu açıktır. Endüstriyel kalıpların işlenmesinde, yüzey kalitesi ve ölçü tamlığı en önemli çıktı parametrelerinin başında gelmektedir. Yüzey kalitesi, büyük oranda işleme parametrelerine bağlı olarak değişen ve kalıpcılık bileşenlerinin kullanım ömrü üzerinde etkili olan bir faktördür [2- 5]. Ölçü tamlığı ise, seri üretim için kullanılan kalıpcılık ürünlerinin üretiminde, üretim kaynaklı hataların önüne geçilmesi açısından çok önemli bir konudur. Delik delme işleminde, işleme parametrelerinin etkisiyle istenmeyen şekil hataları ve ölçüsel hatalar meydana gelmektedir. Özellikle talaşlı imalat yöntemlerinde, işleme sürecinde ortaya çıkan titreşimler hem yüzey kalitesini hem de ölçü doğruluğu etkilemektedir. Bu sebeple EDM yöntemi ile delik delme işleminde, işleme parametrelerinin delme performansı üzerindeki etkisinin belirlenmesi

üzerinde çalışılması gereken bir konudur. Optimum işleme parametrelerinin önceden tespiti, işleme süresinin kısaltılması, ölçü tamlığı ve yüzey kalitesinin sağlanması açısından önem arz etmektedir.

Elektro erozyon işleme yönteminin işleme performansı üzerine etkisi ile ilgili gerçekleştirilen akademik çalışmalardan bazıları özetlenmiştir. Jaharah ve arkadaşları, sertleştirilmiş AISI H13 takım çeliğinin elektro erozyon işleme performansını, bakır elektrot ve farklı işleme parametreleri kullanarak incelemişlerdir. Gerçekleştirdikleri deneylerde, işleme parametrelerini akım şiddeti (1, 2 ve 4 A), vurum süresi (3, 6 ve 12 μ s) ve bekleme süresi (1, 2 ve 4 μ s) olarak, çıktı parametrelerini ise yüzey pürüzlülüğü, elektrot ve malzeme aşınması olarak belirlemişlerdir. Elde ettikleri sonuçları değerlendirdiklerinde; yüzey pürüzlülüğü için optimum işleme parametrelerinin üç parametre için de en düşük seviye olduğunu, en düşük malzeme aşınmasının gerçekleştiği optimum işleme parametrelerinin ise yüksek seviye akım şiddeti, orta seviye vurum süresi ve düşük seviye bekleme süresi olarak gerçekleştiğini belirlemişlerdir. Elektrot aşınması ise; yüksek akım şiddeti, yüksek vurum süresi ve düşük bekleme süresinde gerçekleşmiştir [6].

Kuppan ve Narayanan, derin delik delme işlemi sırasında elektro erozyon işleme parametrelerinin delik kalitesi özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Delik kalitesini incelemek için, Inconel 718 süperalaşımı numunelere 3,055 ile 3,316 mm arasında değişen çaplarda 62 mm derinliğinde boydan boya delikler açmışlar ve yüzey pürüzlülüğü, radyal kesme ve delik profili parametrelerini incelemişlerdir. Deneysel sonuçlar, akım şiddeti ve vurum süresi gibi işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğünü etkileyen önemli parametreler olduğunu ve radyal kesme parametresinin sadece vurum süresinden etkilendiğini tespit etmiştir [7].

Hasçalık ve Çaydaş, tel erozyon yöntemi ile yaptıkları çalışmalarında farklı kesme modlarını kullanarak sıcak iş kalıplarının imalatında kullanılan

AISI 4340 çeliğinin mikro yapı ve yüzey pürüzlülüğünde meydana gelen değişimleri incelemişlerdir. Gerçekleştirdikleri deneysel çalışmaların sonucunda, işleme sürecinde oluşan yüksek sıcaklıktan dolayı numunelerin yüzey bölgelerinde sert yapının oluştuğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca, malzemenin yorulma dayanımını azaltacak çatlakların oluştuğunu gözlemlemişlerdir [8].

Özek ve Özel yaptıkları çalışmalarında, tel erozyon yöntemi ile işlemede kesme alanına bağlı olarak meydana gelen sertlik değişimi ve yüzey pürüzlülüğünü incelemişlerdir. Deneysel çalışmalar için dişli çark imalatında yaygın olarak tercih edilen Ç8620 çeliği kullanmışlardır. Yapılan çalışmanın sonucunda kesme metodu ve kesme alanına bağlı olarak kesme alanı arttıkça yüzey pürüzlülük değerlerinin ve malzeme sertliğinin azaldığını, ark süresince elektrot telin yüzeyinde meydana gelen küçük kraterlerden dolayı yüzey pürüzlülük değerlerinin arttığını tespit etmişlerdir [9].

Pramanik ve arkadaşları 6061 alüminyum alaşımının tel elektro erozyon yöntemi ile işlenmesinde malzeme aşınması, yüzey kalitesi ve elektrot aşınması gibi bir dizi parametre üzerindeki işleme parametrelerinin etkisini incelemişlerdir. Vurum süresinin artmasıyla malzeme aşınmasının arttığını, vurum süresinin değişmesinin yüzey pürüzlülüğünü önemli ölçüde değiştirmediğini tespit etmişlerdir. Vurum süresinin artması, elektrot aşınmasını arttırmış bu ise deliğin üst tarafında alt tarafına kıyasla daha yüksek çentik genişliğine sahip konik yuva oluşturduğunu tespit etmişlerdir [10].

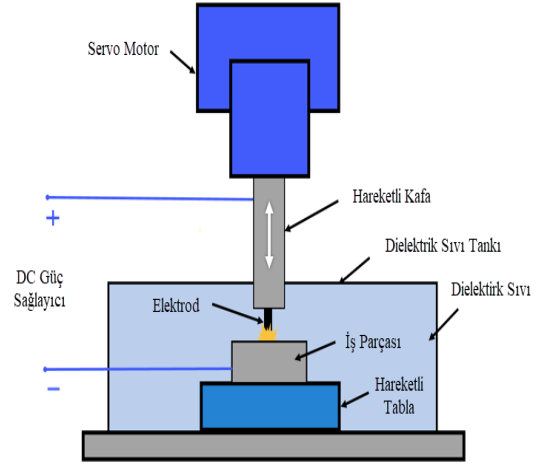
Dave ve arkadaşları ayrıca, elektro erozyon yöntemi ile 1100 alüminyum alaşımı malzeme üzerinde açtıkları mikro delikleri incelemek için Taguchi metodolojisini kullanmışlardır. Deney tasarımlarında girdi parametrelerini aralık voltajı, vurum süresi, elektrot boyutu ve elektrot rotasyonu olarak, çıktı parametrelerini ise üst yarıçap, alt yarıçap, konik açı ve elektrot aşınması olarak belirlemişlerdir [11].

Literatür çalışmaları incelendiğinde, işleme parametrelerinde gerçekleştirilen optimizasyonun, EDM yöntemini daha kararlı hale getirdiği görülmektedir. Ayrıca çalışmalar, sıcak iş takım çeliklerinin EDM ile işlenmesine ilişkin çeşitli girdi ve çıktı parametreleri arasındaki ilişkiye dair bilgiler sunsa da, temeldeki mekanizmalar hakkında çok fazla bilgi vermemektedir. AISI H13 Sıcak iş takım çeliğinin daha çok yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması

ve malzeme aşınma miktarı ile ilgili çalışmaların gerçekleştirildiği görülmektedir. Bu çalışmada AISI H13 sıcak iş takım çeliğinin elektro erozyon işleme yöntemi ile işlenmesinde, farklı işleme parametrelerinin malzeme yüzey kalitesi, elektrot ve deliğin ölçü doğruluğu üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

2. EXPERIMENTAL METHODS (DENEYSEL YÖNTEMLER)

Deneyler ISO 11090-1:2014 standardına uygun olarak tek sütunlu KING marka elektro erozyon tezgâhında gerçekleştirilmiştir. Dielektrik akışkan olarak Petrofer Dielectricum 358 mineral bazlı yağ kullanılmıştır. EDM yöntemi şematığı Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. EDM Tezgâhı çalışma şematığı
(EDM Machine working schematic)

Deneysel çalışmada Ø20 mm X 20 mm boyutlarında sertleştirilmiş (54 HRC) AISI H13 sıcak iş takım çeliği kullanılmış olup, malzemenin kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. AISI H13 sıcak iş takım çeliğinin kimyasal bileşimi (% Ağırlık) (Chemical composition of AISI H13 hot work tool steel (% by weight))

C	Mn	Cr	Mo	V	W	Diğer
0,39	0,4	5,3	1,3	0,9	-	Si 1,0

AISI H13 sıcak iş takım çeliği malzemesinin EDM yöntemi ile işlenmesinde, delik işleme kalitesi üzerinde elektrot türünün etkisini belirleyebilmek amacıyla üç farklı elektrot malzemesi kullanılmıştır (Şekil 2). Elektrot malzemelerinin seçiminde, imalat sanayisinde en çok kullanılan bakır ve grafit elektrot malzemesine ek olarak Tuncop elektrot malzemesi

tercih edilmiştir. Belirlenen elektrot malzemeleri Ø12 mm X 200 mm ölçülerinde kesilerek kullanılmıştır.



Şekil 2. Deneysel çalışmalarda kullanılan elektrot malzemeleri (*Electrode materials used in experimental studies*)

2.1. Experimental Design (*Deneysel Tasarım*)

AISI H13 sıcak iş takım çeliğinin EDM yöntemi ile işlenmesinde farklı işleme parametrelerinin belirlenen çıktı parametreleri üzerindeki etkisini belirleyebilmek amacıyla deneysel tasarım gerçekleştirilmiştir. Deneysel tasarımda girdi parametreleri olarak üç farklı elektrot tipi, üç farklı vuruş süresi, üç farklı akım şiddeti, 0,5 mm talaş derinliği ve 50 µs bekleme süresi, çıktı parametreleri olarak ise delik çapı ve yüzey kalitesi olarak belirlenmiştir. Girdi parametreleri ve alt seviyeleri literatür araştırması sonucu belirlenmiştir (Tablo 2).

Tablo 2. Deneysel çalışmada kullanılan işleme parametreleri (*Processing parameters used in the experimental study*)

Parametre	Sembol	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Elektrot	A	Bakır	Grafit	TunCop
Vuruş süresi (µs)	B	200	300	400
Akım (A)	C	4	8	12
Bekleme süresi (µs)	-	50		
Talaş Derinliği (mm)	-	0,5		

Alt seviyeleri bulunan girdi parametreleri çalışmanın devamında Tablo 2’de verilen harflerle sembolize edilmiştir. Belirlenen işleme parametreleri ile Taguchi L27 ortogonal dizi kullanılarak deney tasarımı oluşturulmuştur. Oluşturulan deney tasarımı Tablo 3’de verilmiştir.

Belirlenen deneysel tasarıma uygun olarak gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen numunelerin delik kalitesinin ve delik çaplarının belirlenmesinde DINO-LITE AM7915MZT – EDGE optik mikroskop kullanılarak üç noktadan geçen bir daire çizilerek üç ölçüm gerçekleştirilmiş ve ortalamaları delik çapı olarak alınmıştır.

Tablo 3. Taguchi L₂₇ ile belirlenen deneysel tasarım parametreleri (*Taguchi L₂₇ experimental design parameters*)

Sıra No	Elektrot			Akım (A)	Vuruş Süresi (µs)
	E ₁	E ₂	E ₃		
1	Bakır	Grafit	Tuncop	4	200
2	Bakır	Grafit	Tuncop	4	300
3	Bakır	Grafit	Tuncop	4	400
4	Bakır	Grafit	Tuncop	8	200
5	Bakır	Grafit	Tuncop	8	300
6	Bakır	Grafit	Tuncop	8	400
7	Bakır	Grafit	Tuncop	12	200
8	Bakır	Grafit	Tuncop	12	300
9	Bakır	Grafit	Tuncop	12	400

Delik yüzey durumunun ve kalitesinin daha ayrıntılı olarak belirlenmesi için ise numuneler Quanta FEG 251 marka taramalı elektron mikroskobu (SEM)’nda incelenmiştir. İşleme parametreleri ile çıktı parametreleri arasındaki ilişkinin ve optimum işleme parametrelerinin belirlenmesi amacıyla, deneysel sonuçlar Taguchi yöntemi ile analiz edilmiştir.

3. RESULTS AND DISCUSSION (*SONUÇLAR VE TARTIŞMA*)

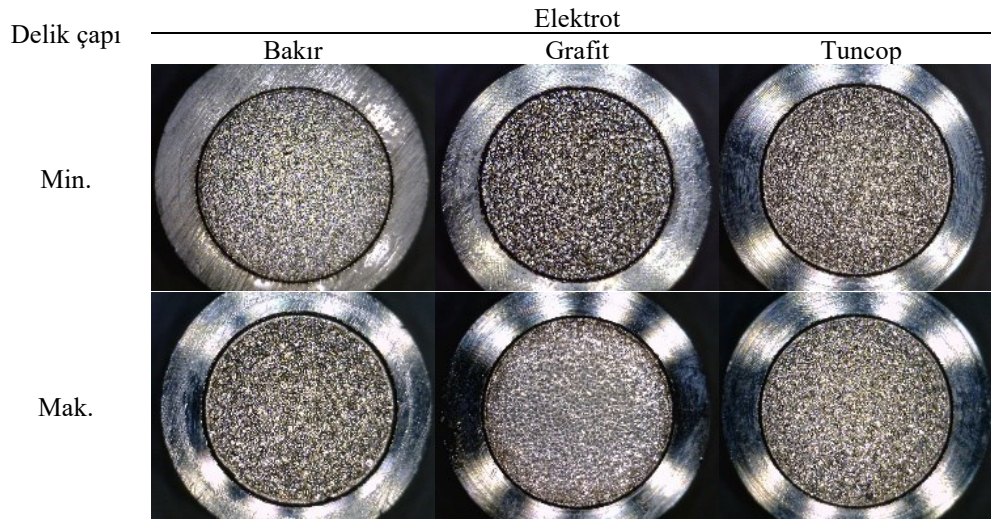
3.1. The Effect of Machining Parameters on Hole Diameter (*İşleme Parametrelerinin Delik Çapı Üzerindeki Etkisi*)

AISI H13 sıcak iş takım çeliğinin EDM yöntemi ile farklı işleme parametreleri kullanılarak işlenmesi sonucu oluşan deliklerin ölçümleri yapılmış ve ölçü doğruluk değerleri belirlenmiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucu elde edilen numunelerin delik çapı ölçüm sonuçları Tablo 4’de verilmiştir. Maksimum ve minimum delik çapı elde edilen numunelere ait optik mikroskop görüntüleri Şekil 3’de gösterilmektedir.

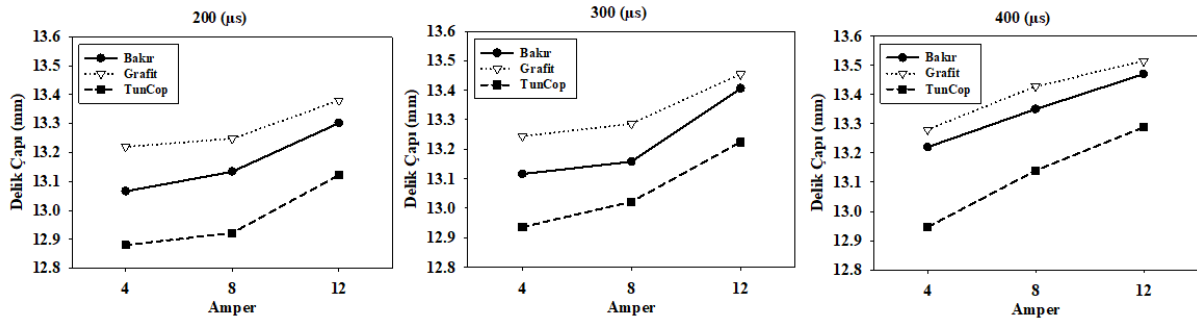
Tablo 4’de gösterilen verilerin işleme parametrelerine göre karşılaştırılması için veriler Sigmaplot yazılımı kullanılarak grafik haline getirilmiştir. Farklı vuruş süreleri için, farklı elektrot malzemelerinin oluşturdukları delik çaplarını gösteren grafikler Şekil 4’te verilmiştir.

Tablo 4. Deneysel tasarıma göre elde edilen delik çapları (Hole diameters obtained according to the experimental design)

Sıra No	Akım (A)	Vurum süresi (μ s)	Elektrot			Delik Çapı (mm)		
			E ₁	E ₂	E ₃	D ₁	D ₂	D ₃
1	4	200	Bakır	Grafit	Tuncop	13,066	13,220	12,880
2	4	300	Bakır	Grafit	Tuncop	13,116	13,244	12,936
3	4	400	Bakır	Grafit	Tuncop	13,220	13,280	12,946
4	8	200	Bakır	Grafit	Tuncop	13,134	13,248	12,922
5	8	300	Bakır	Grafit	Tuncop	13,158	13,286	13,022
6	8	400	Bakır	Grafit	Tuncop	13,350	13,428	13,140
7	12	200	Bakır	Grafit	Tuncop	13,302	13,380	13,122
8	12	300	Bakır	Grafit	Tuncop	13,406	13,454	13,224
9	12	400	Bakır	Grafit	Tuncop	13,470	13,514	13,288



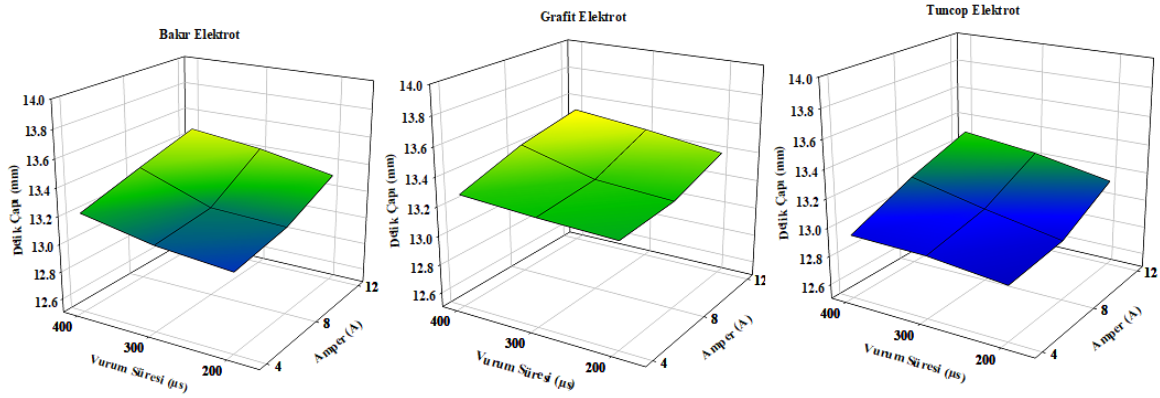
Şekil 3. AISI H13 numunelerine ait optik mikroskop görüntüleri (Optical microscope images of AISI H13 samples)



Şekil 4. Bakır, Grafit ve Tuncop elektrot malzemeleri ile işlenen numunelerin ölçülen delik çaplarının vurum süresi ve akım şiddetine bağlı olarak grafik gösterimi (Graphical representation of the measured hole diameters of the samples processed with copper, graphite and Tuncop electrode materials, depending on the pulse duration and current intensity.)

EDM tezgâhı ile 12 mm çapında elektrot malzemeler kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde 4 A akımda, elektrot çapına en yakın çap ölçüsünün tuncop elektrot ile 200 μ s vuruş süresinde işlenen numunede, en büyük çap ölçüsünün ise grafit elektrot ile 400 μ s vuruş süresinde işlenen numunede elde edildiği belirlenmiştir. 8 A akım ile gerçekleştirilen deneylerde, elektrot çapına en yakın çap ölçüsünün grafit elektrot ile 200 μ s vuruş süresinde işlenen numunede, en büyük çap ölçüsünün ise tuncop elektrot ile 400 μ s vuruş süresinde işlenen numunede elde edildiği belirlenmiştir. 12 A akım ile gerçekleştirilen deneylerde ise, malzeme yüzeyinde oluşan en küçük delik çapının grafit elektrot ile 200 μ s vuruş süresinde, en büyük delik çapının ise bakır elektrot ile 400 μ s vuruş süresinde oluştuğu tespit edilmiştir.

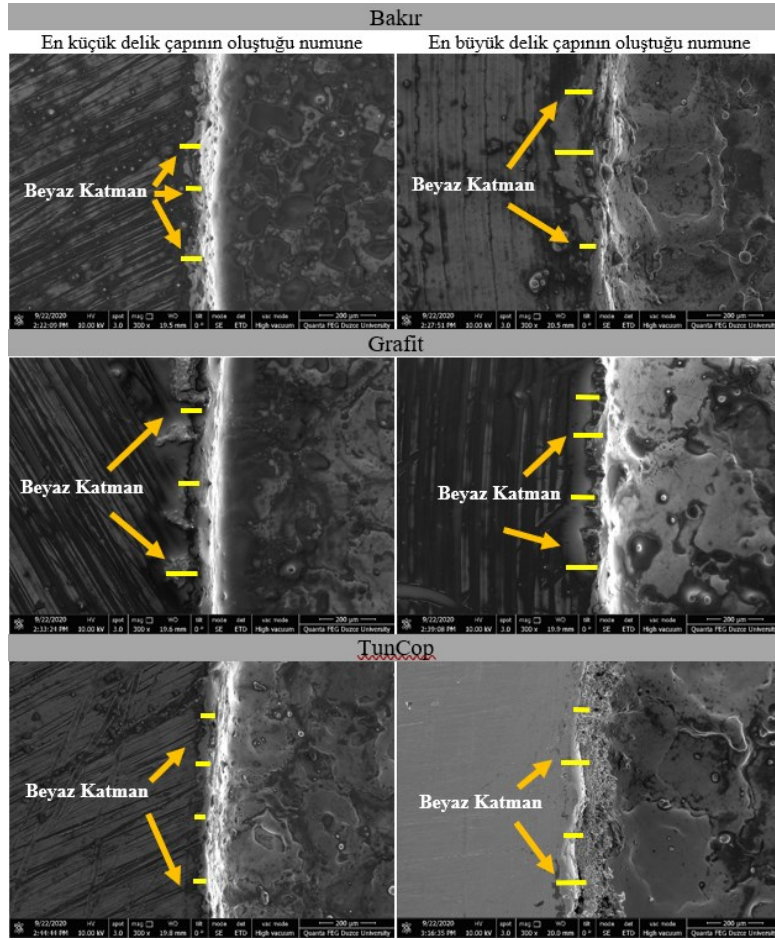
Bakır elektrot ile 200, 300 ve 400 μ s vuruş süresinde gerçekleştirilen deneylerde (Şekil 5) en düşük delik çapı 4 A akım 200 μ s vuruş süresinde, en büyük delik çapı ise 12 A akım 400 μ s vuruş süresinde oluşmuştur. Grafit elektrot ile gerçekleştirilen deneylerde, en düşük delik çapının 4 A akım 200 μ s vuruş süresinde, en büyük delik çapının ise 12 A akım 400 μ s vuruş süresinde oluştuğu görülmüştür. Tuncop elektrot ile gerçekleştirilen deneylerde ise elektrot çapına en yakın delik çapının 4 A akım 200 μ s vuruş süresinde ve en büyük delik çapının ise 12 A akım 400 μ s vuruş süresinde oluştuğu optik mikroskop ölçümleri ile belirlenmiştir. Farklı işleme parametreleri ile işlenen malzemelerde oluşan deliklerin çaplarının elektrot malzemesine göre kıyaslaması Şekil 3' de gösterilmiştir.



Şekil 5. Elektrot malzemelerinin vuruş sürelerine bağlı olarak farklı akım şiddetine göre oluşturdukları delik çaplarının grafik gösterimi (Graphical display of the hole diameters formed by the electrode materials according to the different current intensity depending on the pulse duration.)

Şekil 5' de verilen grafikler incelendiğinde bakır ve grafit elektrot ile gerçekleştirilen deneylerde 4 A akım sonucu oluşan deliklerin çaplarının 8 A akım sonucu oluşan deliklere göre daha büyük oluştuğu, en büyük delik çaplarının ise 12 A akımda oluştuğu belirlenmiştir. Tuncop elektrot ile gerçekleştirilen deneylerde ise akım şiddetinin artması ile tüm vuruş

sürelerinde delik çaplarının diğer elektrotlara göre arttığı tespit edilmiştir. Artan akım ve vuruş sürelerinde, bakır, grafit ve tuncop elektrot ile gerçekleştirilen deneylerde en küçük ve en büyük delik çapının oluştuğu numunelerin SEM görüntüleri Şekil 6' da gösterilmektedir.



Şekil 6. Bakır, Grafit ve Tuncop elektrot ile gerçekleştirilen deneylerde en küçük ve en büyük delik çapının oluştuğu numunelerin SEM görüntüleri (*SEM images of the samples with the smallest and largest hole diameters in the experiments performed with copper, graphite and Tuncop electrodes.*)

Farklı işleme parametreleri ile işlenen numunelerin delik yüzeyleri incelendiğinde, delik çapların küçük olduğu numunelerin elektrotun ilk temas ettiği kısımda küçük hasarlar oluşturduğu, büyük delik çapının olduğu yüzeylerde ise elektrotun ilk temas ettiği kısımda daha büyük hasarlar olduğu görülmektedir. Bu duruma AISI H13 malzemenin EDM yöntemi ile işlenmesinde, elektrot ile malzeme arasında işleme sırasında oluşan arkların malzeme yüzeyine etki etmeye başlaması sonucu oluşan kıvılcımlar ve sıcaklıktan dolayı eriyen malzeme parçacıklarının parça yüzeyine akarak beyaz katman oluşturması sebep olmaktadır [12].

3.2. Evaluation of the Relationship Between Processing Parameters and Output Parameters by Using the Taguchi Method (*İşleme Parametreleri ve Çıktı Parametreleri Arasındaki İlişkinin Taguchi Yöntemi ile Değerlendirilmesi*)

Taguchi metodu, ortogonal deney tasarımı kullanarak belirlenen deney parametreleri ve alt

seviyeleri ile gerçekleştirilecek deney sayısını en aza indirerek çıktı parametrelerinde avantaj sağlayan bir optimizasyon tekniğidir. Bu teknikle elde edilen veriler sinyal/gürültü (S/N) oranına çevrilir. S parametresi sinyal faktörünü (ortalama), N parametresi ise gürültüyü faktörünü (standart sapma) ifade etmektedir. Sinyal faktörü elde edilen deney sonuçlarını, gürültü faktörü ise deney deneylerde dikkate alınamayan fakat sonuçlar üzerinde etkisi olan parametreleri ifade etmektedir. Gürültü faktörünü oluşturan parametreler, istenen optimum deney sonucunun elde edilmesini engelleyen faktörleri temsil eder [13-14]. S/N oranının yorumlanmasında deney yönteminin karakteristiğine bağlı olarak üç farklı amaç fonksiyonu kullanılmaktadır. Bunlar “en büyük en iyi”, “en küçük en iyi”, “nominal en iyi” amaç fonksiyonlarıdır. Bu çalışmada delik çapının elektrot çapına en yakın ölçüde olması istendiğinden, S/N oranının değerlendirilmesinde “en küçük en iyi” amaç fonksiyonu seçilmiştir [15]. En küçük en iyi yaklaşımına göre S/N oranının belirlenmesinde

kullanılan formülasyon Denklem 1’de verilmiştir. En küçük en iyi:

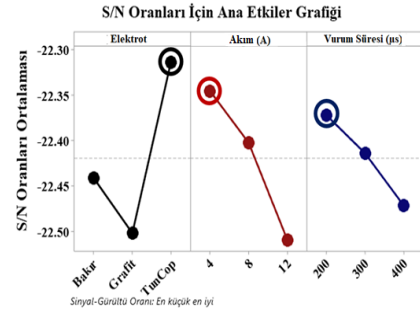
$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (1)$$

Denklem 2’de y , deneyde ölçülen işleme parametresini, n değeri ise yapılan deney sayısını ifade etmektedir.

En küçük en iyi amaç fonksiyonuna göre hesaplanan S/N analizi sonuçları Şekil 7’de gösterilmektedir. S/N grafiğinde dikeyde en üst noktada olan değer, en küçük en iyi amaç fonksiyonuna göre ideal olan işleme parametresini göstermektedir [16].

Şekil 7 incelendiğinde, elektrot çapına en yakın delik çapını elde etmek için gerekli işleme parametrelerinin A3B1C1 olarak gerçekleştiği belirlenmiş ve bu parametrelerle gerçekleştirilen deney sonucunda delik çapı 12,880 mm olarak elde

edilmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçların istatistiksel analizi ile işleme parametreleri ve çıktı parametreleri arasındaki ilişkiden yola çıkarak tahmini deney sonuçları hesaplamak mümkün olmaktadır. Belirlenen işleme parametrelerine göre istatistiksel analiz sonucu hesaplanan tahmini delik çapları (Predicted hole diameter- PreH) Tablo 5’de verilmiştir.

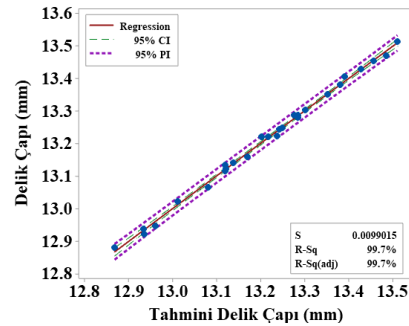


Şekil 7. S/N oranları için ana etkiler grafiği
(Main effects plot for S/N ratios)

Tablo 5. Tahmini delik çapları (Estimated hole diameters)

Sıra No	Elektrot			Akım (A)	Vurum süresi (µs)	Tahmini Delik Çapı (mm)		
	E ₁	E ₂	E ₃			Pre H ₁	Pre H ₂	Pre H ₃
1	Bakır	Grafit	Tuncop	4	200	13,080	13,217	12,868
2	Bakır	Grafit	Tuncop	4	300	13,119	13,242	12,933
3	Bakır	Grafit	Tuncop	4	400	13,201	13,284	12,960
4	Bakır	Grafit	Tuncop	8	200	13,119	13,249	12,934
5	Bakır	Grafit	Tuncop	8	300	13,169	13,285	13,011
6	Bakır	Grafit	Tuncop	8	400	13,352	13,427	13,138
7	Bakır	Grafit	Tuncop	12	200	13,301	13,381	13,121
8	Bakır	Grafit	Tuncop	12	300	13,390	13,456	13,237
9	Bakır	Grafit	Tuncop	12	400	13,485	13,510	13,275

Deneyel test sonuçları ve tahmini deney sonuçları için oluşturulan ikinci dereceden regresyon denklemleri karşılaştırılarak, tahmini deney sonuçlarının deneysel test sonuçlarını karşılama durumu belirlenmiştir. Şekil 8’de deneysel ve tahmini test sonucu elde edilen ve %95 güven düzeyinde oluşturulan regresyon eğrilerinin kıyaslanması gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar, tahmini olarak belirlenen delik çaplarının deneysel test sonuçlarına oldukça yakın olarak hesaplandığını göstermektedir.



Şekil 8. Deneysel ve tahmini deney sonuçların grafiksel olarak karşılaştırılması (Graphical comparison of experimental and predictive results)

3.3. Anova Analysis (Anova Analizi)

Anova, kontrol faktörlerinin birbirleri ile etkileşimlerini belirlemek için yaygın olarak kullanılan istatistiksel bir yöntemdir [17]. Anova analizi ile, işleme parametrelerinin seçilen çıktı değerleri üzerindeki etkisi ve işleme parametrelerine ait alt seviyelerin çıktı parametrelerini nasıl etkilediği belirlenebilmektedir. Bu çalışmada ise, farklı işleme parametrelerinin delik çapı oluşumu üzerindeki

etkisini belirlemek amacıyla kullanılmıştır. Deneysel test sonuçları ile %95 güven düzeyinde gerçekleştirilen Anova analizi sonuçları Tablo 6'da verilmiştir. Tabloda işleme parametreleri için elde edilen P (anamlılık) değeri, işleme parametreleri ile deneysel test sonuçları arasındaki ilişkinin anlamlılık düzeyini göstermektedir. En düşük P değerine sahip olan işleme parametresi en etkili işleme parametresini göstermektedir.

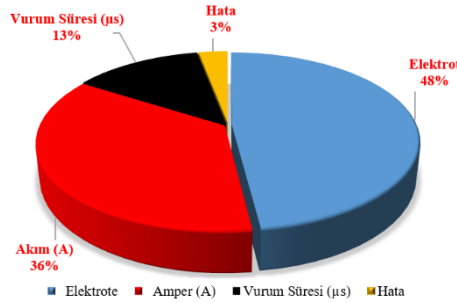
Tablo 6. Anava analizi sonuçları (Anova analysis results)

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Elektrot Malzemesi	2	0,38342	0,38342	0,191709	144,03	0,000000000001
Akım (A)	2	0,29062	0,29062	0,145309	109,17	0,000000000017
Vurum Süresi (μ s)	2	0,10394	0,10394	0,051969	39,04	0,000000124205
Error	20	0,02662	0,02662	0,001331		
Total	26	0,80459				

R-sq: 96,69%

Tablo 5 incelendiğinde, delik çapına en fazla etki eden işleme parametresinin elektrot malzemesi, en az etki eden işleme parametresinin ise vurum süresi olarak ortaya çıktığı belirlenmiştir. Bunun nedeni olarak ise elektrot malzemelerinin farklı kimyasal bileşiminden kaynaklı olduğu düşünülmektedir. İşleme parametrelerinin etki oranları yüzdesel olarak incelendiğinde ise elde edilen değerlerin grafiksel gösterimi Şekil 9'da verilmiştir. Etki oranlarının

yüzdesel olarak hesaplanmasında Anova tablosunda bulunan Seq SS (Sequential sums of squares) verileri kullanılmıştır. Şekil 9 incelendiğinde, elektrot malzemesini etki oranının %48, akım şiddetinin %36 ve vurum süresinin %13 olarak oluştuğu tespit edilmiştir. İstatistiksel hesaplamadaki hata payı oranının ise %3 olarak oluştuğu belirlenmiştir.



Şekil 9. İşleme parametrelerinin çıktı değerleri üzerindeki etkisini gösteren grafik (Graph showing the effect of processing parameters on output values)

Regresyon analizleri, bir bağımlı değişken ile bir veya daha fazla bağımsız değişken arasındaki istatistiksel ilişkinin matematiksel olarak modellenmesi amacıyla kullanılmaktadır [18-21].

Deneysel test sonuçları kullanılarak elde edilen ve en düşük delik çapı elde edilmesini hedefleyen doğrusal regresyon denklemi katsayıları Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Regresyon denklemi (Regression equation)

Elektrot Malzemesi	
Bakır	= 12,7697
Grafit	= 12,8621 + 0,03128 Akım (A) + 0,000757 Vurum süresi (μ s)
Tuncop	= 12,5761

Elde edilen regresyon denklemi aynı özellikteki AISI H13 sıcak iş takım çeliğinin farklı işleme parametreleri ile işlenmesinde işleme sonuçlarının önceden tahmininde kullanılabilir. Bu şekilde araştırmacılar, zaman ve enerji kaybının önüne geçebileceklerdir.

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

Sertleştirilmiş AISI H13 sıcak iş takım çeliğinin farklı elektrot malzemesi ve işleme parametreleri kullanarak EDM yöntemi ile gerçekleştirilen talaş kaldırma işlemi sonrasında oluşan delik çapları deneysel ve istatistiksel olarak incelenmiş olup elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

- 4 A akımda elektrot çapına en yakın delik çapının tuncop elektrot malzemesi ile 200 µs vurum süresinde, en büyük delik çapının grafit elektrot malzemesi ile 400 µs vurum süresinde işlenen numunede oluştuğu,
- 8 A akımda elektrot çapına en yakın delik çapının grafit elektrot malzemesi ile 200 µs vurum süresinde, en büyük delik çapının tuncop elektrot malzemesi ile 400 µs vurum süresinde işlenen numunede oluştuğu,
- 12 A akım ile gerçekleştirilen deneylerde en yakın delik çapının grafit elektrot ile 200 µs vurum süresinde, en büyük delik çapının bakır elektrot ile 400 µs vurum süresinde işlenen numunede oluştuğu,
- Bakır elektrot ile farklı vurum sürelerinde gerçekleştirilen deneylerde, en yakın delik çapının 8 A akımda 200 µs vurum süresinde, en büyük delik çapının ise 12 A akımda 400 µs vurum süresinde oluştuğu,
- Grafit elektrot ile gerçekleştirilen deneylerde en yakın delik çapının 4 A akımda 200 µs vurum süresinde, en büyük delik çapının ise 12 A akımda 400 µs vurum süresinde oluştuğu,
- Tuncop elektrot ile gerçekleştirilen deneylerde elektrot çapına en yakın delik çapının 4 A akımda 200 µs vurum süresinde, en büyük delik çapının ise 12 A akımda 400 µs vurum süresinde oluştuğu,
- Numunelerin delik yüzeylerinin SEM görüntüleri incelendiğinde, numunelerin elektrot ile ilk temas ettiği bölgelerde arkların küçük hasarlar oluşturduğu, büyük

delik çapının oluştuğu yüzeylerde ise elektrotun ilk temas ettiği alanlarda arkların hasarlarının daha büyük oluştuğu,

- AISI H13 sıcak iş takım çeliği malzemesinin elektro erozyon tezgahında işlenmesi sırasında oluşan arkların oluşturduğu yüksek sıcaklıktan dolayı malzeme yüzeyinde beyaz katman oluştuğu,
- Gerçekleştirilen istatistiksel analizler sonucunda, elektrot çapına en yakın delik çapının elde edildiği ideal işleme parametrelerinin A3B1C1 (Bakır-200 µs -4 A) parametreleri ile gerçekleştirilen deneyde oluşacağı,
- Anova analizi sonuçları incelendiğinde ise, delik çapına en fazla etki eden işleme parametresinin elektrot malzemesi, en az etki eden işleme parametresinin ise vurum süresi olarak gerçekleştirildiği tespit edilmiştir.

ACKNOWLEDGMENT (TEŞEKKÜR)

Bu çalışmayı, 2018.22.02.814 proje numarası ile destekleyen Düzce Üniversitesi Rektörlüğü ve Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkürlerimi sunuyorum.

CONFLICT OF INTEREST STATEMENT (ÇIKAR ÇATIŞMASI BİLDİRİMİ)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Y. Karaca, "Investigation of Vc Coatability Of 1.2344 Hot Work Tool Steel With Box Cementation Method," *Nevşehir Journal of Science and Technology*, pp. 106-110, 2020. doi: <https://dx.doi.org/10.17100/nevbittek.734281>
- [2] S. Koca, "Investigation Of The Relationship Between Tool Wear And Residual Stress That Happens During The High Feed Machining Of The 55 HRC Hardened Tool Steel DIN 1.2344 ESR," Uludağ University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Mechanical Engineering Uludağ Üniversitesi, Turkey, 2013.
- [3] M. Özer, "The Effect of Deep Cryogenic Processing and Tempering Heat Treatment of AISI H13 Tool Steel on Microstructure, Hardness and Impact Energy," *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, vol. 7, no. 3, pp. 688-699, 2020. doi: <https://dx.doi.org/10.29109/gujsc.603355>

- [4] Narcis Pellicer, Joaquim Ciurana & Jordi Delgado "Tool Electrode Geometry And Process Parameters Influence on Different Feature Geometry and Surface Quality in Electrical Discharge Machining of AISI H13 Steel," *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 22, pp. 575-584, 2011. doi: <https://dx.doi.org/10.1007/s10845-009-0320-8>
- [5] M. Zeyveli and H. Demir, "Experimental Study Of Surface Roughness For Machining Of AISI H13 Hot Work Tool Steel," *Erciyes University Institute of Science and Technology Journal of Science*, vol. 25, no. 1, pp. 251-261, Feb. 2009.
- [6] A.G. Jaharah, C. G. Liang, S.Z. Wahid, M. N. Ab Rahman and C.H. Che Hassan, "Performance Of Copper Electrode In Electrical Discharge Machining (EDM) Of AISI H13 Harden Steel," *International Journal of Mechanical and Materials Engineering (IJMME)*, vol. 3, no. 1, pp. 25-29, 2008.
- [7] P. Kuppan and S. Narayanan, "Effect of EDM Parameters on Hole Quality Characteristics in Deep Hole Drilling of Inconel 718 superalloy," *Int. J. Manufacturing Research*, vol. 10, no. 1, 2015. doi: [10.1504/IJMR.2015.067617](https://doi.org/10.1504/IJMR.2015.067617)
- [8] A. Haşçalık and U.Çaydaş; "The Effects Of Cutting Parameters On The Microstructure And Surface Roughness In The WEDM," *Firat Üniversty Research of Eastern Anatolia Region*, vol. 1, no. 3, pp.118-121, 2003.
- [9] C. Özek and C. Özel, "An Investigation On Cutting Behaviour Of AISI8620 Gear Steel By Wedm Machine," *Dokuz Eylul University Faculty of Engineering Journal of Science and Engineering*, vol. 5, no. 2, pp. 47-52, 2003.
- [10] A. Pramanik, K. A. Basak, N. M. Islami and G. Littlefair, "Electrical Discharge Machining of 6061 Aluminium Alloy," *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* vol. 25, pp. 2866-2874, 2015.
- [11] H. K. Dave, V. J. Mathai, K. P. Desai and H. K. Raval, "Studies on Quality of Microholes Generated on Al 1100 using Micro-Electro-Discharge Machining Process," *Int J Adv Manuf Technol*, no.76, pp.127-140, 2015. doi: <https://dx.doi.org/10.1007/s00170-013-5542-4>
- [12] A. Kumar, V. Kumar, and J. Kumar, "Investigation of Microstructure and Element Migration For Rough Cut Surface of Pure Titanium After WEDM," *International Journal of Microstructure and Materials Properties (IJMMP)*, vol. 8, no. 4-5, pp. 343-356, 2013. doi:<https://dx.doi.org/10.1504/IJMMP.2013.057071>
- [13] H. Serencam and M. Uçurum, "Performance Evaluation Of Adsorption Properties For Ni(II) Removal With Flying Ash Using Taguchi Experimental Design," *Niğde Ömer Halis Demir University Journal of Engineering Sciences*, vol. 8, no.1, pp. 336-344, 2019. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.517135>
- [14] B. Özlü, M. Akgün and H. Demir, "Analysis and Optimization of Effects on Surface Roughness of Cutting Parameters on Turning of AA6061 Alloy," *Gazi Journal of Engineering Sciences (GJES)*, vol. 5, no. 2, pp. 151-158, 2019.
- [15] E. Kavcı "Investigations of Adsorption of Direct Red BWS Textile Dye Using Taguchi L9 Orthogonal Experimental Design," *Niğde Ömer Halis Demir University Journal of Engineering Sciences*, vol. 10, no. 1, pp. 358-363, 2021. doi: <https://dx.doi.org/10.28948/ngumuh.669972>
- [16] F. Kara, M. Karabatak, M. Ayyıldız and E. Nas, "Effect Of Machinability, Microstructure And Hardness Of Deep Cryogenic Treatment in Hard Turning Of AISI D2 Steel With Ceramic Cutting," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 1, pp. 969-983, 2020. doi: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.11.037>
- [17] O. Özbek and N. A. Özbek, "Application Of Taguchi Method in The Optimization Of Cutting Parameters For Surface Roughness in Turning Of Hardened AISI 4140 Steel," *Journal of Advanced Technology Sciences*, vol. 5, no. 3, pp. 41-48, 2016.
- [18] M. H. Cetin et al., "Evaluation of Vegetable Based Cutting Fluids With Extreme Pressure And Cutting Parameters in Turning of AISI 304L by Taguchi Method", *Journal of Cleaner Production*, vol. 19, no. 17, pp. 2049-2056, 2011. doi: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.07.013>
- [19] E. Nas and H. Gökkaya, "Experimental and Statistical Study On Machinability Of The Composite Materials With Metal Matrix Al/B₄C/Graphite," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 48, pp.5059-5067, 2017.
- [20] B. Özlü, M. Akgün and H. Demir, "Analysis and Optimization of Effects on Surface Roughness of Cutting Parameters on Turning of AA6061 Alloy." *Gazi Journal of Engineering Sciences (GJES)* vol. 5, no. 2, pp. 151-158, 2019.

[21] M. Yavuz, H. Gokce and U. Şeker, "Investigation of the Effect of Drill Geometry on Tool Wear and Chip Formation," *Gazi Journal of Engineering Sciences (GJES)*, vol. 3, no. 1, pp. 11-19, 2017.

Sıg Kriyojenik İşlemin Sleipner Soğuk İş Takım Çeliğinin Metalurjik Özellikleri Üzerindeki Etkisinin Araştırılması

Enes EL^a, Fuat KARA^{*b}, Onur ÖZBEK^c

^a Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği, 81620, Düzce, Türkiye

^{b,*} Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 81620, Düzce, Türkiye

^c Düzce Üniversitesi, Gümüşova Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 81850, Düzce, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 06.04.2021
Kabul: 04.08.2021

Anahtar Kelimeler:

Sleipner,
Kalıntı östenit,
Mikroyapı,
Mikro Sertlik,
Kriyojenik İşlem

ÖZ

Sıfırın altındaki sıcaklıklarda malzemelerin bekletilmesi olarak bilinen kriyojenik işlem, son yıllarda metal ve metal olmayan malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için uygulanan bir yöntemdir. Bu çalışmada, Sleipner soğuk iş takım çeliği üzerinde sıg kriyojenik işlemin etkilerinin neden olduğu değişimler makro sertlik, mikro sertlik, mikroyapı ve kalıntı östenit hacim oranı yönünden araştırılmıştır. Bu amaçla deney numuneleri önce geleneksel ısıtım işlemiyle sertleştirilerek 60-62 HRC değerine getirilmiş ardından -80 °C sıcaklıkta 18 saat süreyle sıg kriyojenik işlem uygulanarak, 200 °C'de 2 saat boyunca temperleme yapılmıştır. Geleneksel ısıtım işlemi uygulanmış numunenin kalıntı östenit hacim oranı % 3,6 iken, kriyojenik işlem uygulanmış numunenin oranı % 1,4 olarak ölçülmüştür. Kalıntı östenit ölçüm sonuçlarına göre östenit hacim oranında yaklaşık % 61 oranında azalma tespit edilmiştir. Sertlik sonuçlarına göre sıg kriyojenik işlem görmüş numunede makro sertlikte % 2 ve mikro sertlikte % 7'lik bir artış görülmüştür. Mikroyapı incelemelerine göre kriyojenik işlem ile daha homojen bir yapı gözlemlenmiş ve ikincil karbür çökelmeleri görülmüştür.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.02.04>

Researching the Effect of Shallow Cryogenic Treatment on the Metallurgical Features of Sleipner Cold Work Tool Steel

ARTICLE INFO

Received: 06.04.2021
Accepted: 04.08.2021

Keywords:

Sleipner,
Retained austenite,
Microstructure,
Micro hardness,
Cryogenic treatment

ABSTRACT

Cryogenic process, known as holding materials at sub-zero temperatures, is a method applied in recent years to improve the mechanical properties of metal and non-metal materials. In this study, the changes caused by the effects of shallow cryogenic process on Sleipner cold work tool steel were investigated in terms of macro hardness, micro hardness, microstructure and residual austenite volume ratio. For this purpose, the test samples were first hardened by conventional heat treatment and brought to 60-62 HRC value, then by applying shallow cryogenic process at -80° C for 18 hours, tempering was performed at 200 ° C for 2 hours. While the residual austenite volume fraction of the conventional heat treated sample was 3.6%, the rate of the cryogenically treated sample was 1.4%. According to the measurement results of retained austenite, it has been determined that the austenite volume decreased by 61%. An increase of 2% in macro hardness and 7% in microhardness were observed in the shallow cryogenic processed sample according to the hardness results. According to the microstructure studies, more homogeneous structure was observed with the cryogenic process and secondary carbide precipitation was observed.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.02.04>

*Corresponding author: fuatkara@duzce.edu.tr

To cite this article: Özbek, N.A. and Saraç, E. "Effects of Tempering Heat Treatment Temperatures on Mechanical Properties of AISI 1020 and AISI 1040 Carbon Steels," *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol.7, no.2, pp. 111-120, 2021. doi:<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.02.04>

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Teknolojinin günümüzde yüksek bir hızla ilerlemesiyle birlikte farklı malzeme çeşitlerine duyulan ihtiyaçta beraberinde artmıştır. Metallerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla duyulan bu ihtiyaca karşılık olarak özellikle takım çeliklerine uygulanmak üzere çeşitli ısıl işlem türleri tercih edilmektedir [1]. Kalıp imalatının büyük çoğunluğunu kapsayan soğuk iş takım çelikleri en yaygın kullanılan takım çeliği grubudur. Slepner soğuk iş takım çeliği, krom-molibden-vanadyum alaşımı barındıran, yüksek sertlikte olmasına rağmen yüksek tokluğu ile aşınma dayanımında konvansiyonel malzemeler ile karşılaştırıldığında iyi sonuçlar elde etmek mümkün olmaktadır [2]. İçerdiği molibden elementi sayesinde bu çeliklerin akma ve çekme dayanımı yanında, yüksek sıcaklık performansları da artmaktadır [3]. Slepner soğuk iş takım çeliği, krom-molibden-vanadyum alaşımı barındıran, yüksek sertlikte olmasına rağmen yüksek tokluğu ile aşınma dayanımında konvansiyonel malzemeler ile karşılaştırıldığında iyi sonuçlar sergileyen yeni nesil takım çeliklerinden biridir. Slepner soğuk iş takım çeliği, vakum ortamında sertleşebilmekle birlikte yüksek sertlik değerlerine çıkabilen, yüksek alaşımlı oldukça iyi toklukla birlikte yüksek aşınma direncine ve kesme yeteneğine sahip, kolay ısıl işlem yapılabilen, ısıl işlem esnasında orta derecede boyutsal kararlılık gösteren, kopmama ve dayanma gücüne sahip bir çeliktir. Bu çelikler aşınma dayanımı yüksek DIN 1.2379 çeliğine alternatif olarak geliştirilmiş ve ekstrüzyon, zımbalar, baskı plakaları, madeni eşya, yüksek aşınma direnci gerektiren plastik kalıpların imalatında kullanılmaktadır.

Son yıllarda özellikle takım çeliklerinin mekanik özelliklerini iyileştirmek için ısıl işlemi tamamlayıcı bir yöntem olan kriyojenik işlem yaygın bir şekilde uygulanmaktadır. Isıl işlem sonrası malzemeye uygulanan kriyojenik işlemin aşınma direnci, sertlik, darbe direnci, çekme dayanımı, yorulma direnci, mikroyapı, kalıntı gerilme ve kalıntı östenit gibi birçok metalürjik özelliği önemli ölçüde iyileştirdiği literatürde belirtilmektedir [4]-[8]. Kriyojenik işlem sığ ve derin olmak üzere ikiye ayrılmış olup, -50 °C ve -100 °C aralığına sığ kriyojenik işlem, -125 °C ve -196 °C de uygulanan yöntem ise derin kriyojenik işlem adı verilmektedir [9]-[14]. Geleneksel işleme yöntemleriyle sert malzemelerin işlenmesi söz konusu olduğunda, takım aşınması ve işleme zamanı verimli olmadığı gibi ekonomikte olmamaktadır [15]. Kriyojenik işlem takım ömrünün iyileştirilmesi, verimlilikte artış, kalıntı gerilmelerin azaltılması gibi sebeplerle kullanılmaktadır. Bir sefer yapılan ve etkisi kalıcı olan kriyojenik işlemin, aşınma ve darbe etkilerine maruz bırakılan takım çeliklerinin

performansını artırmasının yanı sıra ekonomik bir yöntem olması da bu yöntemi tercih sebebi yapmaktadır [14], [16].

Kriyojenik işlem üzerine literatür araştırılması yapıldığında, K. Amini vd. (2012) AISI D3 soğuk iş takım çeliğinin farklı ısıl işlem prosesleri altında aşınma dayanımı ve mikroyapısı incelenmiştir. Numunelere uygulanan östenitleme işleminin akabinde farklı şekillerde soğutularak sertleştirilmiştir. Ardından numunelerin tamamına derin kriyojenik işlem uygulanmış ve temperleme yapılmıştır. Deneysel sonuçlarda, ısıl işlem zorluğunun artmasıyla birlikte kalıntı östenit miktarında azalmayla birlikte daha homojen karbür dağılımı ve karbür yüzdesinde artış olduğu gözlemlenmiştir. Mikro yapıları incelendiğinde daha homojen ve daha ince karbür dağılımı sıvı nitrojen içerisinde soğutularak sertleştirilen numunede görülse de aşınma direnci ve sertlik bakımından etanol içerisinde soğutularak sertleştirilen numunede en yüksek değerler elde edilmiştir [17]. Kriyojenik işlem uygulamasının temperlenmiş AISI M2, AISI D2 ve X105CrCoMo18 çelikleri üzerindeki mikroyapı ve mekanik özelliklerine olan etkileri araştırılmıştır. Çalışmanın sonucuna göre, üç çelik türü de temperleme sonrası kriyojenik işlemin sertlik ve elastisite modülü değerlerinde değişiklik göstermediği görülmüştür. Diğer yandan da kriyojenik işlem numuneler üzerindeki kalıntı gidermeleri azaltmakla birlikte kırılma tokluğunu artırılmıştır. Ayrıca mikroyapısında ince homojen dağılmış ikincil karbürlerin çökmesini de sağlanmıştır [18]. 80CrMo12 5 soğuk iş takım çeliği üzerinde yapılan çalışmada kriyojenik işlemin aşınma davranışına olan etkileri incelenmiştir. -80°C'de sığ kriyojenik işlem ve -196°C'de derin kriyojenik işlem olmak üzere iki farklı sıcaklıkta kriyojenik işlem sıcaklığı kullanılmıştır. Parametre olarak altı farklı bekletme süresi belirlenmiştir. Deneysel sonuçlara göre, derin kriyojenik işlemin geleneksel ısıl işlem yöntemine göre aşınma yönünden % 37-52 oranında iyileşme gösterdiği görülmüştür. Hem sığ hem derin kriyojenik işlem uygulamasının sertlik yönünden sırasıyla yaklaşık olarak % 1 ile % 5 iyileşme sağladığı tespit edilmiştir [19].

Literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında kriyojenik işlem uygulamalarının olumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. Fakat kriyojenik işlemin Slepner soğuk iş takım çeliğinin üzerindeki mekanik özelliklerine etkilerini araştırarak herhangi bir çalışma bulunamamıştır. Bu çalışmada kriyojenik işlemin Slepner soğuk iş takım çeliği üzerindeki makro sertlik, mikro sertlik ve kalıntı östenit oranları incelenerek, malzemenin mekanik özelliklerindeki değişimler araştırılmıştır.

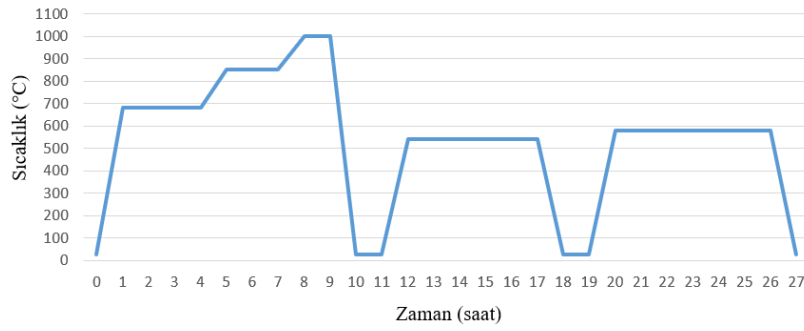
2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

Bu çalışmada, Sleipner soğuk iş takım çeliği CNC torna tezgahında işlendikten sonra numunelerin tamamına geleneksel ısıl işlem yöntemleri uygulanarak 60-62 HRC sertliğe çıkarılmıştır. Kriyojenik işlem öncesi uygulanan ısıl işlemler Şekil 1'de gösterilmiştir. Ardından araştırmanın gerekliliği

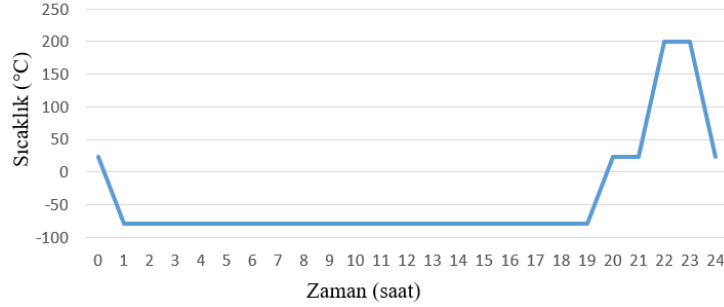
olan numuneye sıg kriyojenik işlem uygulanmış ve akabinde temperleme yapılmıştır. Uygulanan sıg kriyojenik işlem ve temperleme işlemi Şekil 2'de grafiksel olarak gösterilmiştir. Sleipner soğuk iş takım çeliğinin kimyasal bileşenleri Tablo 1'de gösterilmiştir. Kriyojenik işlem Şekil 3'te gösterilen MMD Criyo 125 marka kriyojenik işlem cihazı ile yapılmış olup bu cihaza ait teknik özellikler ise Tablo 2'de yer almaktadır.

Tablo 1. Sleipner çeliğinin kimyasal bileşenleri (%) (Chemical components of Sleipner steel (%))

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
0.90	0.90	0.50	7.8	2.5	0.50



Şekil 1. Kriyojenik işlem öncesi uygulanan ısıl işlem grafiği (Chart of heat treatment applied before cryogenic treatment)



Şekil 2. Sıg kriyojenik işlem ve temperleme işlemi eğrisi (Shallow cryogenic treatment and tempering treatment curve)



Şekil 3. Kriyojenik işlem cihazı (Cryogenic treatment device)

Tablo 2. Kriyojenik işlem cihazının teknik özellikleri (*Technical specifications of the cryogenic process device*)

İç ölçüler	60 cm L x 50 cm W x 50 cm D
İç hazne	304 paslanmaz çelik
Yalıtım	15 cm çok katmanlı yalıtım
Kapasite	< 100kg
Kontrol	Dokunmatik ekranlı programlanabilir PLC kontrol
Sıcaklık sensörü	PT100
LN2 kaynağı	Orta veya yüksek basınçlı sıvı azot kapları ile kullanılabilir
LN2 Transfer Bağlantısı	180cm esnek, yalıtımlı kriyojenik sıvı transfer hortumu
LN2 Dozajlama	Selenoid valf
İşlem Sıcaklığı	< -190 °C
Sıcaklık dağılımı	± 2 °C
Soğutma-Isıtma Hızı	≥ 10 °C / dk (malzeme yükleme kapasitesine göre değişebilir)

Çalışmada deney numuneleri iki gruba ayrılmıştır. Her iki gruptaki numuneler, geleneksel ısı işleme tabi tutularak 60-62 HRC sertliğine çıkarılmıştır. Birinci gruba uygulanan işlem sadece geleneksel ısı işlem iken, ikinci gruptaki numuneler, geleneksel ısı işlemden sonra sıg kriyojenik işlem (-80 °C'de 18 saat) ve akabinde temperleme işlemine tabi tutulmuştur. Temperleme işlemi 2 saat süre ile 200 °C'de yapılmıştır. Deney numunelerinin sınıflandırılması ve uygulanan ısı işlemler Tablo 3'te verilmiştir.

Mikroyapı çalışmalarında kullanılmak üzere 10 mm çapında ve yüksekliğinde numuneler hazırlanmıştır. Bu numuneler geleneksel ısı işlem ve sıg kriyojenik işlemden sonra sırasıyla 120, 240, 600, 800 ve 1200 grit SiC aşındırıcılar ile zımparalanmıştır. Daha sonra Nital solüsyonu ile dağlama işlemine tabi tutulmuş ve optik mikroskop altında incelenmiştir.

Tablo 3. Geleneksel ısı işlem ve derin kriyojenik işlem uygulaması (*Application of conventional heat treatment and deep cryogenic process*)

Numune Grubu	Numune Adı	Uygulanacak Isıl İşlem
1	CHT	Geleneksel ısı işlem
2	SCT-24	Geleneksel Isıl İşlem + Derin kriyojenik işlem (24 saat) + Temperleme işlemi

Deney numuneleri üzerine uygulanan işlemlerin etkisini görebilmek amacıyla mikro sertlik ve makro sertlik deneyleri yapılmıştır. Makro sertlik ölçümleri Time TH 300 marka makro sertlik cihazı ile Rockwell C (HRC) sertlik ölçme metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerin doğruluk kontrolü için aynı numune üzerinde 5 farklı bölgeden sertlik değeri alınmış olup bu değerlerin ortalamaları alınarak kullanılmıştır. Mikro sertlik ölçümleri Metkon marka DUROLINE-M model sertlik cihazı kullanılarak mikro sertlik ölçme işlemi gerçekleştirilmiştir. XRD yöntemi ile malzemelerdeki kalıntı östenit hacim oranları ölçülerek, numuneler üzerindeki işlem farklılıklarına

göre numuneler arasındaki farkın tespit edilmesi amacıyla, kalıntı östenit ölçümleri Atılım Üniversitesi

Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi'nde yapılmıştır. Kalıntı östenit değerlerine kriyojenik işlem uygulamasının doğrudan etkilenmesi sebebiyle malzemenin kalıntı östenit değerlerinin ölçülmesi önem teşkil etmektedir [20]. Kalıntı östenit testi SEIFERT Analytical X-ray MZ VI marka X-ışını difraksiyon cihazında gerçekleştirilmiş olup cihaz, Şekil 4'te verilmiştir. Çalışmada kalıntı östenit hacim oranının belirlenmesinde kullanılan ölçüm parametreleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Kalıntı östenit ölçüm parametreleri (*Residual austenite measurement parameters*)

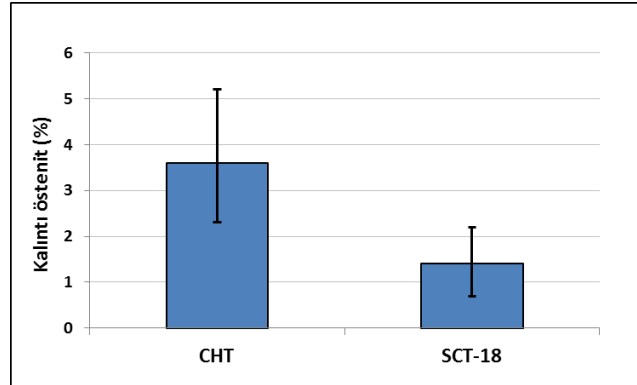
Odak noktası	Ø1mm x 135 mm kolimatör
Hassas konum dedektörü	Aktif aralık: 16,4°
Anot malzemesi	Cr
Filtre	Vanadyum
Tüp voltajı	30 kV
Tüp akımı	55 mA
Tarama 1	Aralık: 62°-74°
	Çözünürlük: 0,05°
	Ölçüm süresi: 2 dakika 24 saniye
Tarama 2	Aralık: 74°-84°
	Çözünürlük: 0,05°
	Ölçüm süresi: 1 dakika 30 saniye
Tarama 3	Aralık: 101°-110°
	Çözünürlük: 0,05°
	Ölçüm süresi: 1 dakika 30 saniye
Tarama 4	Aralık: 121°-137°
	Çözünürlük: 0,05°
	Ölçüm süresi: 3 dakika

Şekil 4. X-ışını difraksiyon cihazı (*X-Ray diffraction device*)

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (*RESULTS AND DISCUSSION*)

Kalıntı östenit kriyojenik işlem uygulanmış malzemelerin değişim özelliklerini açıklayan önemli metalürjik yöntemlerden biridir. Kalıntı östenitin martenzite dönüşümü malzemelerin mekanik özellikleri üzerinde büyük etkiye sahiptir. Yumuşak bir faz olan kalıntı östenitin sert bir faz olan martenzit fazı ile beraber yapıda bulunması

istenmeyen bir durumdur. Bunun nedeni kalıntı östenit sertlik başta olmaz üzere, mekanik özelliklerin tamamını olumsuz olarak etkilemektedir. Bu sebeple kalıntı östenitin martenzite dönüşümü gereklidir. Şekil 5'te Slepner soğuk iş takım çeliğine uygulanan sığ kriyojenik işleminin ardından yapıdaki kalıntı östenit hacim oranlarındaki değişim verilmiştir.

Şekil 5. Kriyojenik işlemin kalıntı östenit hacim oranına etkisi (*Effect of cryogenic treatment on residual austenite volume ratio*)

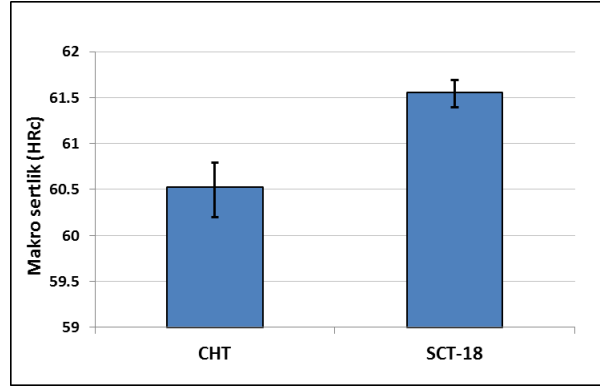
Şekil 5'te görülen CHT numunesi için kalıntı östenit hacim oranı % 3,6 olarak bulunmuştur. SCT numune üzerinde kalıntı östenit oranı % 1,4 olarak bulunmuştur. SCT-18 numunesi CHT numunesi ile karşılaştırıldığında kalıntı östenit hacim oranındaki azalma yaklaşık olarak % 61'dir. Bu sonuç, geleneksel işleminin uygulanmasının ardından yapılan kriyojenik işlem uygulamasının istenmeyen faz olan yumuşak kalıntı östenit fazının, daha sert bir faz olan martenzit fazına dönüştürmede büyük başarı

sağladığını göstermektedir. Bu durum literatür araştırmalarıyla da paralellik göstermektedir.

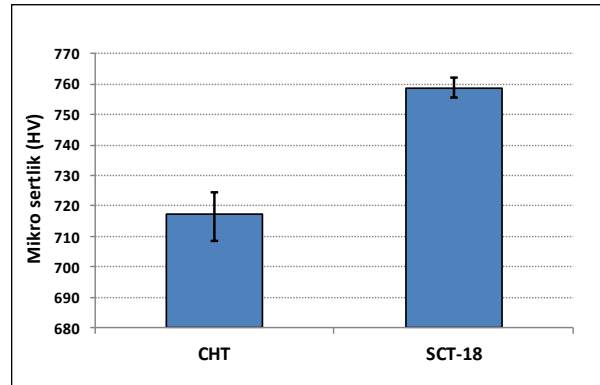
Yüksek alaşım ve karbon içeren takım çelikleri üzerinde uygulanan kriyojenik işlem ile ardından yapılan temperleme işleminin yapıdaki kalıntı östenitin martenzit fazına dönüştüğü belirtilmiştir [21]. Kriyojenik işlem uygulanmasının kalıntı östenit hacim oranında % 30-40 oranında düşüş sağladığı tespit edilmiştir [22].

Sertlik ölçümleri, mekanik özelliklerin incelenmesinde diğer yöntemlere göre daha çok tercih edilmektedir. Deneyin basit ve diğer yöntemlere göre malzeme üzerinde daha az tahribat oluşturması kullanım oranını artırmaktadır. Çelik malzemelerde sertlik çekme mukavemeti ile doğru orantılıdır. Dolayısıyla malzemenin sertlik değerinin bilinmesi diğer mekanik özellikleri hakkında da bir değerlendirme yapılabilmesini sağlamaktadır.

Sleipner soğuk iş takım çeliği numunelerinin tümüne geleneksel ısı işlem uygulanmış (CHT), ardından 18 saat süreyle $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' de sıg kriyojenik ısı işlem uygulanmış (SCT-18) olup 2 farklı gruba ayrılmıştır. Sertlik ölçümleri numune üzerindeki 5 farklı bölgeden yapılarak, bu değerlerin ortalaması alınmıştır. Makro sertlik ölçüm sonuçları Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Kriyojenik işlemin makro sertlik üzerindeki etkisi (*Effect of cryogenic process on macro hardness*)



Şekil 7. Kriyojenik işlemin mikro sertlik üzerindeki etkisi (*Effect of cryogenic treatment on micro hardness*)

Yapılan sertlik test sonuçları incelendiğinde, geleneksel ısı işlem sonrasında uygulanan kriyojenik işlem ve akabindeki temperleme işleminin makro sertlikte artışa neden olduğu tespit edilmiştir. CHT numunesinin sertliği 60,2 HRC olarak tespit edilmiştir. SCT-18 numunesinin sertlik değeri ise 61,4 HRC olarak tespit edilmiştir. Kriyojenik işlem uygulamasının makro sertlik yönünden SCT-18 numunesi üzerinde % 2 civarında bir iyileşmeye sebep olduğu görülmüştür. Bu durum malzemenin yapısında istenmeyen kalıntı östenit fazının, sert faz olan martenzite dönüşmesi ile ilişkilendirilmiştir. Bu durum için literatüre bakıldığında, araştırma malzemesi olarak AISI 52100 rulman çeliğinin kullanıldığı çalışmada yumuşak bir faz olarak bilinen kalıntı östenit fazının kriyojenik işlem uygulanması

sonucunda, bu fazın daha sert bir faz olarak bilinen martenzit fazına dönüştüğü gözlemlenmiştir [23].

Başka bir çalışmada deneysel sonuçlara göre, kriyojenik işlem uygulanan malzemede sertlikte % 22'lik bir oranda artış olduğu tespit edilmiştir [24]. Şekil 7'de elde edilen mikro sertlik değerlerinin değişim durumu gösterilmiştir. Mikro sertlik sonuçlarına bakıldığında CHT numunesinde 708,7 HV sertlik tespit edilmiştir. SCT-18 numunesinin sertlik değeri ise 755,6 HV olarak tespit edilmiştir. Kriyojenik işlem uygulamasını mikro sertlik yönünden SCT-18 numunesi üzerinde % 7 civarında bir sertlik artışına neden olmuştur. Bu durum kalıntı östenitin, sert faz martenzite dönüşmesine atfedilmiştir.

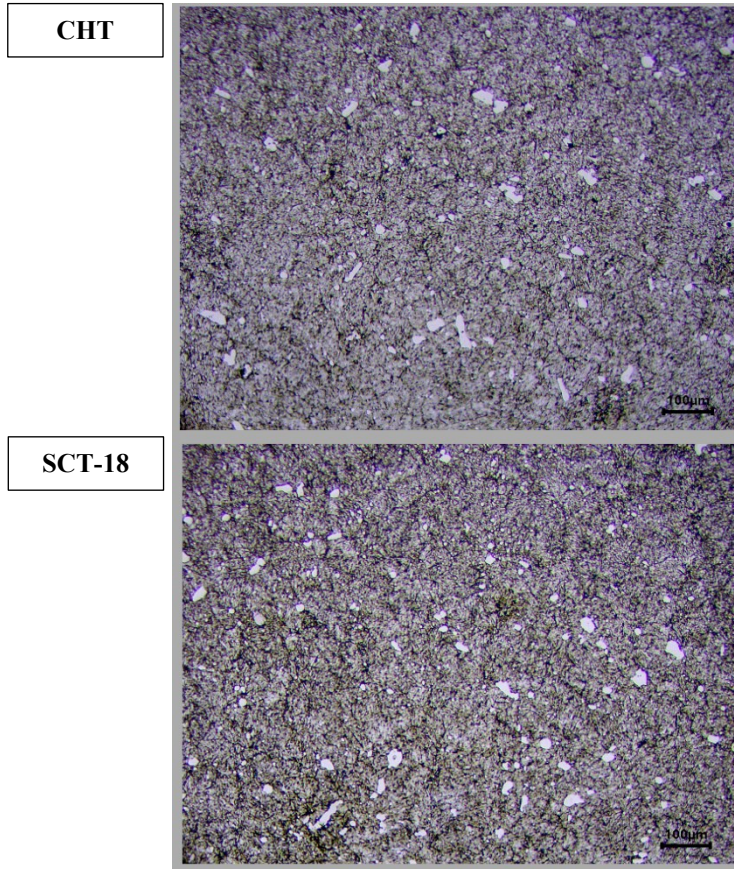
Kriyojenik işlemin farklı bekleme sürelerinde uygulandığında sertlik yönünden artışa neden olduğu yönünde yapılan deneysel çalışmada, hem makro hem mikro sertlik incelemeleri sonucunda 1.2080 soğuk iş takım çeliğinde sertlik artışları görülmüştür [25]. AISI D2 malzemesi üzerinde uygulanan farklı bekleme sürelerinde kriyojenik işlem ile sertlik değerlerinde artış olduğu gözlemlenmiştir [26.]

Yapılan sertlik deneyleri incelendiğinde kriyojenik işlem uygulamasının ve akabinde uygulanan temperleme işleminin mikro ve makro sertlik yönünden malzemede olumlu sonuçlar sağladığı görülmüştür. Literatürde yapılan araştırma sonuçlarıyla da benzerlik göstermiştir. Makro ve mikro sertlik değerlerinde yaşanan bu durum kriyojenik işlemin en önemli etkisi olan yumuşak faz kalıntı östenitin, sert faz olan martenzite dönüşmesi ve karbür çökmesi sebebiyle sertlikte artışa sebep olduğuna atfedilmiştir. 3.3. Mikroyapı Analizi Sonuçları Sleipner soğuk iş takım çeliği üzerinde uygulanan sığ kriyojenik işlemin etkilerinin belirlenebilmesi için numunelerin mikroyapı

görüntüleri alınmıştır. Yapılan mikroyapı analizlerinin sebebi uygulanan kriyojenik işlemden sonra mikro sertlik, makro sertlik, gibi mekanik özelliklerde oluşan artış değerlerinin açıklayabilmektir.

Çeliklere uygulanan geleneksel ısı işleminden sonra kriyojenik işlemin uygulanması durumunda yapıdaki kalıntı östenitin martenzite dönüştüğü bilinmektedir. Kriyojenik işlem uygulanmış malzemelerin yapıları gözlemlendiğinde yapılarının daha yoğun ve düzenli olduğu görülmüştür. Kriyojenik işlemin etkilerinden bir başkası ise yapıda meydana gelen martenzitin ayrışması ve karbür çökmesidir [27].

Bu çalışmada araştırma malzemesi olarak kullanılan Sleipner soğuk iş takım çeliğinin CHT numunesinin mikroyapısı incelendiğinde östenit ve martenzit fazları görülmüştür. Uygulanan kriyojenik işlemden sonra SCT-18 numunesi incelendiğinde mikroyapıdaki görüntüler Şekil 8'deki gibi değişiklik göstermiştir.



Şekil 8. Sleipner soğuk iş takım çeliği mikro yapı görüntüleri (Micro structure images of Sleipner cold work tool steel)

CHT numuneleri uniform birincil olmayan karbür dağılımı göstermişken, SCT-18 numunesinde ise mikroyapıdaki karbürlerin daha homojen bir dağılım

gösterdiği, daha ince karbür çökmesinin gerçekleştiği görülmektedir. Numuneler üzerinde kriyojenik işlem uygulanmış ve ardından temperleme

işlemi gerçekleştirilmiş çalışmada, mikroyapı incelemelerinde çok daha ince partikül dağılımı görülmüştür [7]. Mikroyapı üzerine yapılan araştırmalara bakıldığında, farklı bekletme sürelerinde uygulanan kriyojenik işlemin karbür yüzdesinde artışa neden olduğu tespit edilmiştir [25]. Genel bir değerlendirmeye mikroyapı görüntüleri incelendiğinde, uygulanan sığ kriyojenik işlemin çelik üzerinde daha homojen bir yapı sağladığı görülmüştür. Kriyojenik işlem ardından yapılan temperlemenin ise ikinci ince karbürlerin çökmesinde etkili olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar literatürde yapılan çalışmalar ile benzerlik göstermektedir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, Sleipner soğuk iş takım çeliğinin iki farklı varyantı CHT ve SCT-18 numuneleri oluşturularak kalıntı östenit hacim oranları, makro ve mikro sertlikleri, mikroyapıları üzerinde oluşan farklılıklar araştırılmıştır. Kalıntı östenit ölçümleri XRD yöntemiyle incelenmiş, mekanik özellikler makro ve mikro sertlik yönünden araştırılmış olup, mikroyapı değişiklikleri ise SEM analizleri ile incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Kalıntı östenit hacim oranı analizi sonunca, SCT-18 numunelerinde yaklaşık olarak % 61'lik bir iyileşme görülmüştür.
- Metalografik sonuçlara göre kalıntı östenit ve mikroyapılar incelendiğinde SCT-18 numunelerinde daha homojen bir mikro yapı ve daha iyi bir ikincil karbür çökmesi görülmüştür.
- CHT ve SCT numunelerinin mikroyapıları incelendiğinde SCT numunelerine ait SEM görüntülerinde östenit fazının martenzite dönüştürülmesinde başarılı bir sonuç elde edilmiştir.
- SCT-18 numunesindeki martenzit fazı miktarı CHT numunesine görülen martenzit fazından daha fazla olduğu görülmüştür. Bu durum kriyojenik işlemin kalıntı östenit miktarının martenzite dönüştürülmesinde başarılı bir sonuç elde edilmiştir.
- Kriyojenik işlem görmüş SCT-18 numuneleri kriyojenik işlemin başarılı uygulanması sonucunda elde edilen yüksek martenzit fazına bağlı olarak mekanik özellikler yönünden daha başarılı sonuçlar vermiştir. Sertlik deneyleri ile bu durum desteklenmektedir.
- Makro sertlik sonuçlarına göre CHT numunelerinde 60,2 HRC, SCT-18 numunelerinde 61,4 HRC sertlik değeri

ölçülmüştür. Mikro sertlik sonuçlarına göre CHT numunelerinde 708,7 HV, SCT-18 numunelerinde 755,6 HV sertlik değeri ölçülmüştür. SCT-18 numunelerinde makro sertlik ve mikro sertlikte sırasıyla yaklaşık olarak % 2 ve % 7 oranında bir artış görülmüştür.

Bu çalışmada yapılan araştırmalar sonucunda Sleipner soğuk iş takım çeliğine uygulanan sığ kriyojenik işlem ile kalıntı östenit oranları, sertlik ve mikroyapıda olumlu iyileştirmeler görülmüştür. Kriyojenik işlem üzerine yapılacak yeni çalışmalarda, Sleipner soğuk iş takım çeliği için farklı bekletme süreleri ve sıcaklıklarda sığ ve derin kriyojenik işlemin etkileri araştırılabilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (DÜBAP) Koordinatörlüğü tarafından 2019.07.04.1046 no'lu proje ile desteklenmiştir. Kuruma desteklerinden ötürü teşekkür ederiz.

ÇIKAR TARTIŞMASI BİLDİRİMİ (CONFLICT OF INTEREST STATEMENT)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] N. Altan Özbek and E. Saraç, "Temperleme ısıl işlem sıcaklıklarının AISI 1020 ve AISI 1040 karbon çeliklerin mekanik özellikleri üzerine etkileri," *Gazi Mühendislik Bilim. Derg.*, vol. 7, no. 1, pp. 17-25, 2021.
- [2] E. Demir and İ. Toktaş, "AISI D2 çeliğine uygulanan farklı bekletme sürelerindeki derin kriyojenik işlemin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin incelenmesi," in *2. International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, Istanbul*, 2014, pp. 2038-2049.
- [3] H. Gökçe and M. Yavuz, "Ticari saflıktaki molibden malzemesine HSS kılavuzla vida açma işleminde kesme hızının etkisi," *Gazi Mühendislik Bilim. Derg.*, vol. 5, no. 3, pp. 237-243, 2019.
- [4] G. Höke, İ. Şahin, H. Çinici, and T. Fındık, "Kriyojenik işlemin SAE 4140 çeliğinin mekanik özellikleri üzerine etkisi," *Selçuk Üniversitesi Selçuk-Teknik Dergisi*, vol. 13, no. 2, pp. 25-37, 2014.

- [5] D. Akgümüş Gök and V. Öztürk, "Kriyojenik işlemin Vanadis 8 çeliğinin mekanik özellikleri ve mikroyapısı üzerindeki etkisi," *Uluslararası Doğu Anadolu Fen Mühendislik ve Tasarım Derg.*, vol. 2, no. 1, pp. 22-32, 2020.
- [6] A. Çiçek, E. Ekici, İ. Uygur, S. Akıncıoğlu, and T. Kıvak, "AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin delinmesinde derin kriyojenik işlemin takım ömrü üzerindeki etkilerinin araştırılması," *Süleyman Demirel Üniversitesi Uluslararası Teknoloji Bilim. Derg.*, vol. 4, no. 1, pp. 1-9, 2012.
- [7] M. Özer, "AISI H13 takım çeliğine uygulanan derin kriyojenik işlem ve temperleme ısıl işleminin mikroyapı, sertlik ve darbe enerjisine etkisi," *Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknoloji*, vol. 7, no. 3, pp. 688-699, 2019.
- [8] İ. D. K. Demir and İ. Uygur, "AZ63 magnezyum alaşımının korozyon direncine kriyojenik işlemin etkisi," *İleri Teknoloji Bilim. Derg.*, vol. 8, no. 2, pp. 17-27, 2019.
- [9] S. S. Gill, R. Singh, H. Singh, and J. Singh, "Wear behaviour of cryogenically treated tungsten carbide inserts under dry and wet turning conditions," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 49, no. 3-4, pp. 256-260, 2009.
- [10] P. Paulin, "Frozen Gears," *Gear Technol.*, pp. 26-29, 1993.
- [11] P. Baldissera and C. Delprete, "Effects of deep cryogenic treatment on static mechanical properties of 18NiCrMo5 carburized steel," *Mater. Des.*, vol. 30, no. 5, pp. 1435-1440, 2009, [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2008.08.015>
- [12] A. Akhbarizadeh, A. Shafyeyi, and M. A. Golozar, "Effects of cryogenic treatment on wear behavior of D6 tool steel," *Mater. Des.*, vol. 30, no. 8, pp. 3259-3264, 2009, [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2008.11.016>
- [13] A. Bensely, A. Prabhakaran, D. Mohan Lal, and G. Nagarajan, "Enhancing the wear resistance of case carburized steel (En 353) by cryogenic treatment," *Cryogenics (Guildf.)*, vol. 45, no. 12, pp. 747-754, 2005.
- [14] J. Y. Huang, Y. T. Zhu, X. Z. Liao, I. J. Beyerlein, M. A. Bourke, and T. E. Mitchell, "Microstructure of cryogenic treated M2 tool steel," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 339, no. 1-2, pp. 241-244, 2003. doi: [https://dx.doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00165-X](https://dx.doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00165-X)
- [15] A. A. Khan and M. I. Ahmed, "Improving tool life using cryogenic cooling," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 196, no. 1-3, pp. 149-154, 2008.
- [16] F. K. Arslan, I. Altınsoy, A. Hatman, M. Ipek, S. Zeytin, and C. Bindal, "Characterization of cryogenic heat treated Vanadis 4 PM cold work tool steel," *Vacuum*, vol. 86, no. 4, pp. 370-373, 2011.
- [17] K. Amini, A. Akhbarizadeh, and S. Javadpour, "Investigating the effect of the quench environment on the final microstructure and wear behavior of 1.2080 tool steel after deep cryogenic heat treatment," *Mater. Des.*, vol. 45, pp. 316-322, 2013, doi: <https://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2012.08.006>
- [18] R. Sola, R. Giovanardi, G. Parigi, and P. Veronesi, "A novel method for fracture toughness evaluation of tool steels with post-tempering cryogenic treatment," *Metals (Basel)*, vol. 7, no. 3, pp. 1-9, 2017.
- [19] K. Amini, S. Nategh, and A. Shafyeyi, "Influence of different cryotreatments on tribological behavior of 80CrMo12 5 cold work tool steel," *Mater. Des.*, vol. 31, no. 10, pp. 4666-4675, 2010. doi: <https://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2010.05.028>
- [20] F. Kara, "AISI 52100 çeliğinin yorulma ömrü ve taşlanabilirliğine kriyojenik işlem parametrelerinin etkilerinin araştırılması," Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 2014.
- [21] H. Li, W. Tong, J. Cui, H. Zhang, L. Chen, and L. Zuo, "The influence of deep cryogenic treatment on the properties of high-vanadium alloy steel," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 662, pp. 356-362, 2016. doi: <https://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2016.03.039>
- [22] H. S. Yang, W. Jun, S. Bao-Luo, L. Hao-Huai, G. Sheng-Ji, and H. Si-Jiu, "Effect of cryogenic treatment on the matrix structure and abrasion resistance of white cast iron subjected to destabilization treatment," *Wear*, vol. 261, no. 10, pp. 1150-1154, 2006. doi: <https://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2006.03.021>
- [23] A. Akhbarizadeh, S. Javadpour, K. Amini, and A. H. Yaghtin, "Investigating the effect of ball milling during the deep cryogenic heat treatment of the 1.2080 tool steel," *Vacuum*, vol. 90, no. 1, pp. 70-74, 2013.

[24] J. Yi *et al.*, “Enhanced toughness and hardness at cryogenic temperatures of silicon carbide sintered by SPS,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 569, pp. 13–17, 2013.

doi: <https://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2013.01.053>

[25] K. Amini, A. Akhbarizadeh, and S. Javadpour, “Investigating the effect of holding duration on the microstructure of 1.2080 tool steel during the deep cryogenic heat treatment,” *Vacuum*, vol. 86, no. 10, pp. 1534-1540, 2012.

doi: <https://dx.doi.org/10.1016/j.vacuum.2012.02.013>

[26] D. Das, A. K. Dutta, and K. K. Ray, “Influence of varied cryotreatment on the wear behavior of AISI D2 steel,” *Wear*, vol. 266, no. 1–2, pp. 297–309, 2009.

doi: <https://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2008.07.001>

[27] Y. Dong, X. Lin, and H. Xiao, “Deep cryogenic treatment of high-speed steel and its mechanism,” *Heat Treat. Met.*, vol. 25, no. 3, pp. 55–59, 1998.

Kumaş Polisaj Tezgâhında Gürültü ve Titreşim Azaltım Çalışması

Hüseyin DAL^{*a}, Murat BAKLACI^b

^a Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

^b Milli Savunma Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 07.04.2021
Kabul: 06.08.2021

Anahtar Kelimeler:

Tekstil tezgahı
gürültüsü, gürültü
azaltımı, titreşim
azaltımı, gürültü
kontrolü

ÖZ

Sanayileşme ile artan gürültü seviyeleri insan sağlığını olumsuz etkilemektedir. Özellikle yüksek gürültülü işyerlerinde çalışanların yüksek gürültüye maruz kalması işçi sağlığını olumsuz etkilemektedir. Bu çalışmada, bir tekstil firmasında dokuma tezgahı türü olarak kullanılan kumaş polisaj tezgahının gürültü ve titreşim problemini azaltmak için bir dizi çalışmalar yapılmıştır. Çalışanların gürültüye maruz kaldıkları çalışma alanında bulunan tezgahlardan kumaş polisaj makinesi, pilot çalışma tezgahı olarak seçildi. Polisaj tezgahı ve çevresinin bazı noktalarından gürültü ve titreşim ölçümleri alınmıştır. Alınan titreşim ve gürültü ölçümleri analiz edilerek polisaj tezgahının gürültü ve titreşim seviyeleri ve karakteristikleri belirlendi. Makinenin gürültü emisyonlarını azaltmak için çeşitli gürültü ve titreşim izolasyon uygulamaları yapılmıştır. Ofis çalışma alanına gürültü iletimini azaltmak için ofisler ile kumaş işleme alanı arasında gürültü duvarı kuruldu. Fan kanalları ise ses yalıtım malzemeleri ile kaplanmıştır. Titreşim kaynaklı gürültüyü azaltmak için tezgah ayaklarının altına titreşim izolasyonlu kauçuk takozlar yerleştirilmiştir. Aynı koşullarda tekrarlanan ölçüm ve analizler sonrasında, polisaj makinesinin gürültü ve titreşim seviyelerinin önemli ölçüde azaldığı görülmüştür.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.02.05>

Noise and Vibration Abatement Study on a Fabric Polishing Machine

ARTICLE INFO

Received: 07.04.2021
Accepted: 06.08.2021

Keywords:

Textile machine
noise,
noise abatement,
vibration reduction,
noise control

ABSTRACT

Increasing noise levels with industrialization adversely affect human health. Especially in high noisy workplaces, the exposure of workers to high noise negatively affects worker health. In this study, a series of studies have been carried out to reduce the noise and vibration problem of a polishing bench, a weaving loom in a textile company. A fabric polishing bench in the working area where workers are exposed to its loud noise was chosen as the pilot fabric machine. Noise and vibration measurements were taken from some points of the polishing bench and its surroundings. By analyzing the vibration and noise measurements taken, the polishing bench noise and vibration characteristics were determined. Some noise and vibration isolation applications have been implemented to reduce the noise emission of the bench. In order to reduce noise transmission to the office workplace, a noise wall was set up between offices and the fabric processing area. The fan ducts were covered with sound insulation materials. For reducing vibration-induced noise, vibration isolation rubber pads are placed under the bench legs. After repeated measurements and analyzes under the same conditions, it was observed that the noise and vibration levels of the polishing bench were significantly reduced.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.02.05>

*Corresponding author: hdal@sakarya.edu.tr

To cite this article: Dal, H. and Baklaci, M. "Noise and Vibration Abatement Study on a Fabric Polishing Machine", *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol.7, no.2, pp. 121-133, 2021. doi:<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.02.05>

1. INTRODUCTION (*GİRİŞ*)

The increase in high mechanization and heavy industry has brought the noise problem with it. Each country has its own laws to protect workers from exposure to noise. These laws require workplaces to take the necessary precautions to protect the health of employees from noise. Serious adverse effects of workplace noise are physical, physiological, psychological, performance loss, etc. It reveals effects such as [1]. Especially noise-based disturbances are common in iron and steel, printing and rolling workers in addition to textile workers. Many improvements have been made to regulate these adverse situations occurring in the working environments of industry employees around the world [2].

Due to all these negative effects, many studies have been carried out on the negative effects of noise caused by machinery and equipment. Noise-based hearing loss is seen as an occupational disease that occurs especially in textile workers. This situation occurs with prolonged exposure to high sound levels. In the industry, noise-based ailments are tackled by using protective equipment such as hearing protection equipment. In a study carried out by Jayawardana et al., the quality of the noise level existing in a textile factory and the distribution of the noise within the factory are examined. Then, a mathematical model was developed to estimate the noise distribution in the factory, and the mathematical model was verified with the noise data obtained in the factory by standard methods. Finally, suitable noise control panels were designed to prove the effectiveness of the noise control method experimentally, and a pilot application was carried out [3]. In another study, Noweir and Jamil took noise measurements in different octave bands in textile, printing, and paper production industries and then identified the sectors with the highest noise pollution.

As a result, based on the experimental results obtained, recommendations for appropriate noise control and worker protection for the sectors are presented [4,5]. In another study, Talukdar conducted a study on noise pollution and control in textile factories in India [6,7]. Johnson proposed an analytical model for the noise generated by the vibrations of a weaving machine in his thesis. It has been observed that the proposed analytical model does not fully comply with experimental data obtained at low frequencies but gives good results for octave bands between 1000 Hz and 31500 Hz [8]. Alimohammadi and et al. researched the disturbances caused by noise in workers working in the textile

industry. In the study under consideration, 162 textile workers who were exposed to excessive noise were selected. When the results obtained were evaluated, it showed that educational intervention could cause an increase in the noise problem by affecting their attitudes among workers [9]. Navarro et al. examined the acoustic performance of microcapsule reinforced woven textile products using the filling technique. Then, the sound absorption effects of 6 different woven textile products with the same microcapsule concentration were examined. The results obtained showed that the change of sound absorption coefficient of doped woven fabric was dependent on the experimental setup, microcapsule concentration, and fabric type [10]. In another study, Zaw et al. conducted an experimental study on 226 employees working in the weaving department of a textile company to determine their exposure to noise levels and their hearing loss. When the results obtained were evaluated, it was determined that 66.4% of the employees were exposed to noise above 85 dB and hearing loss occurred in 25.7% of the employees [11,12].

In addition to the textile industry, noise pollution occurs in iron and steel factories due to the vibration in machinery and equipment. As a result, workers working in iron and steel companies are exposed to this noise pollution. In a study conducted on employees exposed to noise in iron and steel companies, 468 employees who were exposed to noise were selected. When the results obtained are examined, 89% of the employees are exposed to noise above acceptable sound levels. At the same time, it is understood that 45% of these employees do not use any protective equipment [13,14]. In another study conducted in the iron and steel industry, Harmadji and Kabullah conducted an experimental study to prove that chronic exposure to high machine noise can lead to noise-induced hearing loss in the employee. They took sound measurements on randomly selected 50 workers (25 production employees, 25 management employees) in the environment where they worked for six months. When the results obtained are examined, the average sound level in the production section was measured as 102 dB and 60.4 dB in the control section. It was determined that 4% more noise-based hearing loss occurred in workers working in the production department compared to the workers in the management department [15,16,17].

Finally, Sriopas et al. conducted an experimental study on hearing loss occurring in workers working in the welding department of an automobile part manufacturing company. When the results are

examined, it confirms that exposure to noise levels of 90 dB and above increases the risk of hearing loss in both ears. In addition to the results obtained, it has been revealed that people who have worked for ten years or more have a significant hearing loss in both ears [18]. It is an obligation to control workplace noise due to its stated negative effects on human health [2]. For this reason, legal regulations have been made in many countries in order to keep the noise level in the workplaces below the danger limits. Noise limit values have been determined in most industrial countries to control the noise and be protected from the negative effects of noise in the workplaces. The OSHA (Occupational Safety and Health Administration), which was implemented in the USA in 1970 and is constantly updated, is taken as a reference or applied by many countries. OSHA states that the noise level in the workplace must be known. At the same time, according to OSHA, if you feel the need to raise your voice to be heard in 3 steps in the workplace, the noise level of your environment may be above 85 dB [19,20]. In this arrangement, the periods that can be worked under the effect of different levels of noise are given in Table 1.

Table 1. Permissible noise exposures in workplaces
(İşyerlerinde izin verilen gürültü seviyesi)

Duration per day	Sound level dba slow response
8	90
6	92
4	95
3	97
2	100
1 or ½	102
1	105
½	110
¼ or less	115

According to CDC (The Center for Disease Control), the health of 22 million workers worldwide is affected by excessively noisy workplaces every year. Even the loudest noises are preventable [21]. In this study, noise and vibration analyzes of a loom used for fabric polishing in a fabric production facility were carried out. Various experimental setups have been prepared to reduce the noise and vibration of the counter. For this purpose, fans and air ducts are covered with sound-absorbing materials. A noise isolation wall was placed between the office and the polishing machine in order to reduce noise transmission. With the help of vibration measurement and analysis results, in parallel with theoretical calculations, antivibration rubber pad selection was

made for machine feet, and vibration-based machine basic design was realized. According to the vibration and noise measurements taken again after the improvement works, it was determined that the noise and vibration levels of the bench decreased significantly.

2. MATERIAL AND METHOD (MATERİYAL VE METOD)

2.1. Study Area and Definition of the Case (Çalışma Alanı ve Problemin Tanımlanması)

In this study, the noise and vibration of a textile polishing machine, which is an important source of noise in terms of occupational and worker health in an industrial textile factory, was selected as a research subject. There are a large number of looms and machines used for various purposes in the textile production industry. An average of 3 workers works at each workbench. The selected pilot worksite is the noisiest work area in the company. Most of the machines in the working area consist of benches such as shearing, brushing, finishing, polishing, which are used to give the fabrics a polished and shiny appearance. There is also a work office in an area close to the benches. Among these benches, the position of the polrotor polishing bench, which is close to the work office and where the most complaints are concerned, is shown in Figure 1.

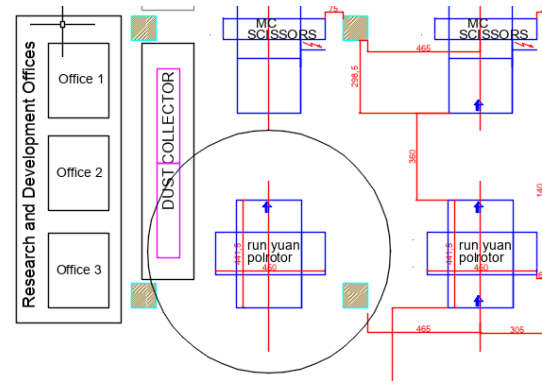


Figure 1. Location of polrotor polishing machine
(Polrotor polisaj makinesinin konumu)

The task of the Polrotor polishing machine is to make the pile (polishing) and lift (embossing) of the velvet-style pile (pile) fabrics. The machine under consideration is the RN420A model of the Runian company. The polishing bench is approximately 4150x4415 mm in size, with double polrotor cylinders (rotating channel cylinder (see Figure 2), a mass of approximately 6500 kg, and a power of 144 kW [22]. These polrotor cylinders can be rotated in both

directions and can be operated independently or together.

Babyface velvet fabric has been chosen for the polishing process. R The fabric given to the loom in rolls enters the polrotor cylinders with polishing blades on it, rotating at 1000 rpm and heated up to 180-200 oC, and leaves the loom in the direction of the arrow shown in Figure 1 at a speed of 18 m / min. Moreover, the working parameters of the machine are given in Figure 3. Fabric particles coming out of dust from the polrotor roller and sanding rollers are transferred from the air ducts to the dust collecting units near the machine by means of fans (Figure 4).

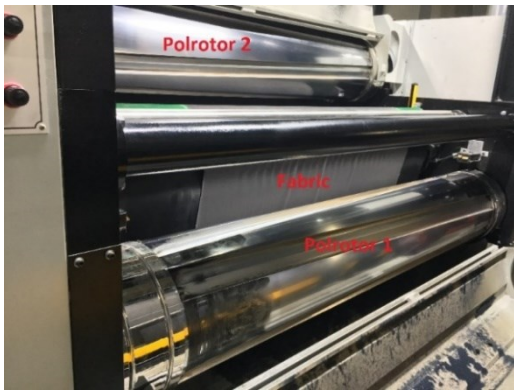


Figure 2. Fabric feeding input of the loom
(Tezgahın kumaş besleme girişi)



Figure 3. Working parameters of the polishing machine
(Polisaj makinesinin çalışma parametreleri)

Imbalances in the polrotor cylinder and other parts of the machine, vibrations that occur due to the machine being placed both directly and unevenly on the floor, vibrations transmitted by other machines to the floor, as well as the fan and air ducts are important noise sources.

In order to make a preliminary evaluation, the background noise levels of the work area and noise measurements were taken on all benches, and it was confirmed that the polrotor polishing machine was the

dominant noise source. In addition to that, it is known from the literature that the most accurate noise reduction technique is to reduce the noise of the loudest machine. [23]. For this reason, noise reduction studies have been carried out on this polishing machine.



Figure 4. Polishing bench work area (Polisaj tezgahının çalışma alanı)

Bruel & Kjaer 2250 series sound level meters and hand-held analyzer were used for noise measurement and analysis on the bench. Bruel&Kjaer 2250 and its noise analysis software conforms with the relevant standards IEC 61672-1 (2013) Class 1 [24], ANSI/ASA S1.4-2014 Class 1 [25] and IEC 61260-1 (2014) 1/1-octave bands and 1/3-octave bands, Class 1 [26]. The microphone used for noise measurements is Bruel&Kjaer 4189, capable of measuring up to 140 dB. Before the noise measurement periods, the microphone used was calibrated with the Bruel & Kjaer 4231 microphone calibrator. The type of 4231 calibrator device is Class 1 according to EN/IEC 60942 (2003) [24] and ANSI S1.40-2006 [27].

As seen in Figure 5, noise analyzes were made by taking logarithmic averages of the noise measurements taken from each corner of the polishing machine three times for 60 seconds. The microphone was placed 120 cm above the ground and 1 m away from the corners of the polishing machine by means of a tripod. During all measurements, the measurement and environmental conditions were kept the same. A-weighted equivalent sound level (LAeq in dBA), which is closest to the sensitivity of the human ear, was used for noise measurements. For frequency analysis of machine noise, a 1/3 octave band filter was chosen.

The noise components of the Polrotor polishing machine were determined as the noise of the machine itself, the front and rear polrotor noise, the fan noise, the fabric noise, and the noise of the other machines.

In order to determine the noise characteristic of the machine, it is necessary to know the noise levels of all the mentioned noise sources. For this purpose, nine different measurement scenarios were applied to detect all noise components (Table 2). In stable working conditions of the machine, noise measurements were taken after each machine component operated for 5 minutes.



Figure 5. Noise and vibration measurement points of the polishing machine (*Polisaj makinesinin gürültü ve titreşim ölçüm noktaları*)

Accordingly, without operating any of the polrotors, fabric feeding rollers, fans, and other machines, only the machine itself was operated, and noise measurements were taken from A, B, C, and D corners of the machine (Figure 6). The noise level of the machine itself (motor+electrical noise) was determined by taking the logarithmic average of the noise levels taken from the four corners of the machine with the help of Equation 1. Similarly, only the fan group was operated, and the fan and noise levels of dust-air suction ducts were determined. Then, by operating the machine and polrotor one together, the total noise level of the machine and

polrotor one was recorded. With Equation 2, the noise level of Polrotor one was determined by subtracting the machine's own noise from the total noise level. With similar measurement and calculation methods, individual noise levels of the total noise components (machine, polrotor 1, polrotor 2, fan, fabric, all machines) of the polishing machine were calculated separately.



Figure 6. Noise levels measurement at point B of polishing machine (*Polisaj makinesinin B noktasındaki gürültü seviyesi ölçümleri*)

$$LA_{eq_{machine}} = 10 \log \left(\frac{10^{LA_{eq_i}/10}}{n} \right) \quad (1)$$

$$LA_{eq_{polrotor1}} = 10 \log (10^{LA_{eq_t}/10} - 10^{LA_{eq_{machine}}/10}) \quad (2)$$

Table 2. Noise measurement scenarios (*Gürültü ölçüm senaryoları*)

	Machine (M)	Polrotor 1 (P1)	Polrotor 2 (P2)	Fan (F)	Fabric (T)	All machines
1.Meas.	✓					
2.Meas.				✓		
3.Meas.	✓	✓				
4.Meas.	✓		✓			
5.Meas.	✓	✓	✓			
6.Meas.	✓	✓	✓	✓		
7.Meas.	✓	✓	✓		✓	
8.Meas.	✓	✓	✓	✓	✓	
9.Meas.	✓	✓	✓	✓	✓	✓

2.1. Vibration Measurements (*Titreşim Ölçümleri*)

It is also important to determine the vibration-induced noise levels of the polishing machine. Vibration-induced noises generally occur in low-frequency regions. It is known that the human ear is

more sensitive to low-frequency noise than to high-frequency noise. This shows that vibration-originated noise is important in terms of noise exposure of workers. In addition, machine vibrations are important for product quality.

Bruel&Kjaer Photon+ vibration analysis device (DAQ), and RT Pro Photon vibration analysis software were used for vibration measurements (Figure 7). Bruel&Kjaer 4533-B-002 accelerometer with 482.7 mV/g sensitivity was used for acceleration measurements. When the machine reaches a stable operating period, vibration measurements were taken for 60 seconds at a frequency resolution of 0.1 Hz. The maximum sampling frequency is 1000 Hz.

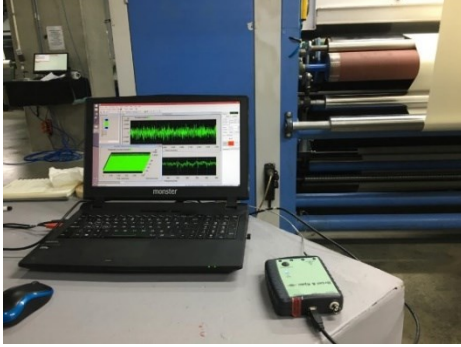


Figure 7. Vibration measurement setup (*Titreşim ölçüm düzeniği*)

The vibration measurement plan given in Table 3 was applied to determine the vibration components of the polishing machine. Unlike noise measurements, vibration measurements are taken, while other machines are constantly in operation because the factory is in the non-stop production phase. Nevertheless, unlike noise measurements, vibration levels and vibration isolation performances of each machine foot were evaluated separately.

In order to determine the vibration intensity of the polishing machine, vibration measurements were taken from the four legs of the machine and from the points where the feet touch the ground (Figure 8). The time and frequency responses of the vibration measurements taken were recorded. The vibration isolation performance between the machine and the ground was evaluated by examining the time and frequency responses. In order to evaluate the vibration intensity, RMS (Root Mean Square) acceleration values of the time responses of each measurement were calculated using Equation 3.

$$a_{RMS} = \frac{\sqrt{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}}{n} \quad (3)$$

In Equation 3, x_1, x_2, \dots, x_n are the acceleration amplitudes, and n is the total sampling number.

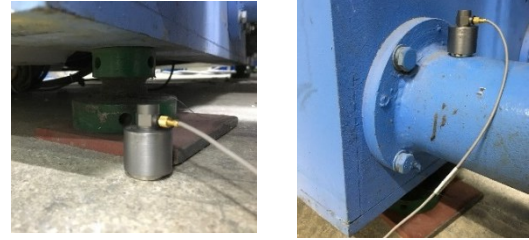


Figure 8. (a) Machine foundation vibration measurement and (b) Machine foot vibration measurement (*(a)Makine temelinin titreşim ölçümü ve (b)makine ayağının titreşim ölçümü*)

Using the relationship between the machine feet and the acceleration amplitudes a_{RMS} taken from the machine base, the vibration isolation performance of the machine can be calculated. For this purpose, how much of the machine vibrations are transferred to the ground or how much of the ground vibrations are transferred to the machine is calculated with the help of Equation 4.

$$T_r = \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{2\xi\omega}{\omega_n}\right)^2}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + \left(\frac{2\xi\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (4)$$

In Equation 4, T_r is the vibration transmission amount, ξ is the damping ratio, ω machine polrotor cycle, and ω_n is the natural frequency of the machine. In the current situation, there is no vibration isolation as the machine is placed directly on the ground. For this reason, it has been observed that the amount of vibration insulation is very bad. This situation creates an extra source of the noise.

Table 3. Vibration measurement scenarios (*Titreşim ölçüm senaryoları*)

	Machine (M)	Polrotor 1 (P1)	Polrotor 2 (P2)	Fan (F)	Fabric (T)	All Machines
1.Meas.	✓	✓				✓
2.Meas.	✓		✓			✓
3.Meas.	✓	✓	✓			✓
4.Meas.	✓	✓	✓	✓		✓
5.Meas.	✓	✓	✓	✓	✓	✓

2.2. Noise and Vibration Abatement Studies (Gürültü ve Titreşim Azaltım Çalışmaları)

Three different insulation applications have been made to improve the noise and vibration performance of the polishing machine. Two of them are insulation applications for noise control and the other for vibration control. For noise control, first of all, fan suction ducts are covered with 19 mm thickness IzocamFlex acoustic insulation blanket.

The acoustic insulation materials used are elastomeric rubber-based, closed-pore, homogeneous sheet-shaped material with a cell structure. The insulation material was attached to the suction pipes by means of adhesive elastic bands, as shown in Figure 9.

The second acoustic insulation application is the noise wall application. For this, a trapezoidal sheet wall with a thickness of 0.7 mm was installed between the polishing machine and the working office. In order to increase the noise absorption of the wall, acoustic foams were placed between the trapezoidal profile plates, as shown in Figure 10.

Antivibration rubber pads were placed on the machine's feet, as shown in Figure 11, for the last application performed to improve the vibration and noise performance of the polishing machine. The stiffness of the vibration pads was calculated using Equation 4 for a 10% vibration isolation and a damping ratio of 0.1.



Figure 9. Dust suction ducts covered with IzocamFlex acoustic insulation material (*İzocamFlex akustik yalıtım malzemesi ile kaplanmış toz emiş kanalları*)

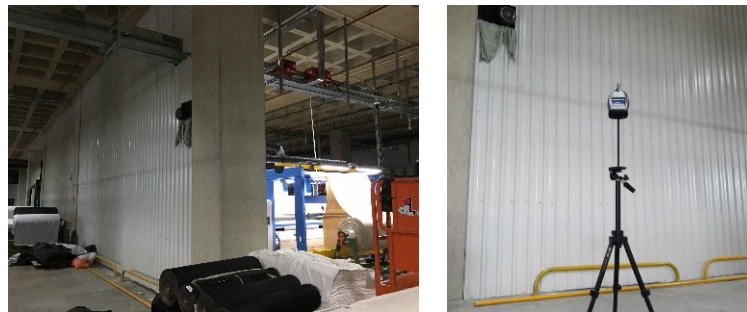


Figure 10. Noise wall application between machine and offices (*Makine ve ofis arasında gürültü duvarı uygulanması*)

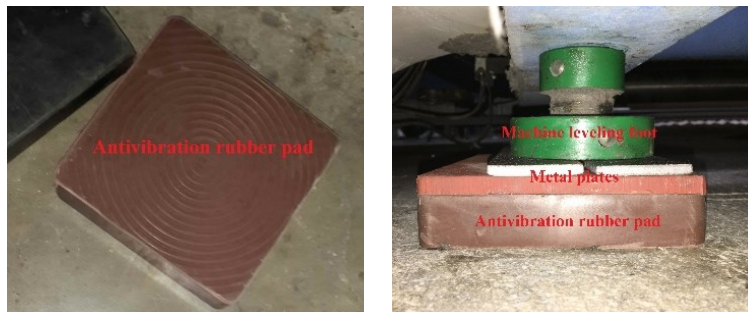


Figure 11. Antivibration rubber pad and its assembly (*Titreşim önleyici kauçuk takoz ve montajı*)

3. RESULTS AND DISCUSSIONS (SONUÇLAR ve TARTIŞMA)

For reducing machine noise, noise measurements were taken before any insulation was applied. The noise levels of each noise component were obtained by taking the logarithmic average of the noise measurements taken three times from each corner of the machine. 1/3 octave band analysis results of the effect of each noise component on the total noise level are shown in Figure 12. According to Table 1, as the effect of new noise components is included in each measurement stage, the total noise level increases. In the first measurement, the noise level is lower than other measurements at all octave band center frequencies because only the machine is operating. In the last measurement, the total noise level is maximized as all noise components, and all other machines are working. According to 1/3 Octave band analysis, it is understood that the noise frequency range of the machine is between approximately 50-12500 Hz. The dominant frequency band is seen to be between 125-2500 Hz.

The vibration-induced noise level of the polishing machine should be determined. For this

reason, the vibration isolation performance of the machine with the floor has also been examined. In this way, vibration levels from the machine to the ground and from the ground to the machine can be determined. For the vibration isolation performance, vibration measurements of all the feet of the machine as well as the ground where the feet of the machine touch were taken.

Vibration isolation performances of each foot were determined by using RMS values of floor and machine feet vibrations. According to the first vibration measurements, it was determined that there was no vibration isolation application and the vibration isolation of the machine was quite bad. Most of the machine vibrations are transmitted to the floor. However, ground vibrations originating from other machines are transmitted directly to the machine (Figure 13). In addition, it has been determined that the vibration levels of all machine feet are not equal and are very different from each other. This difference shows that different antivibration rubber is required for each machine foot.

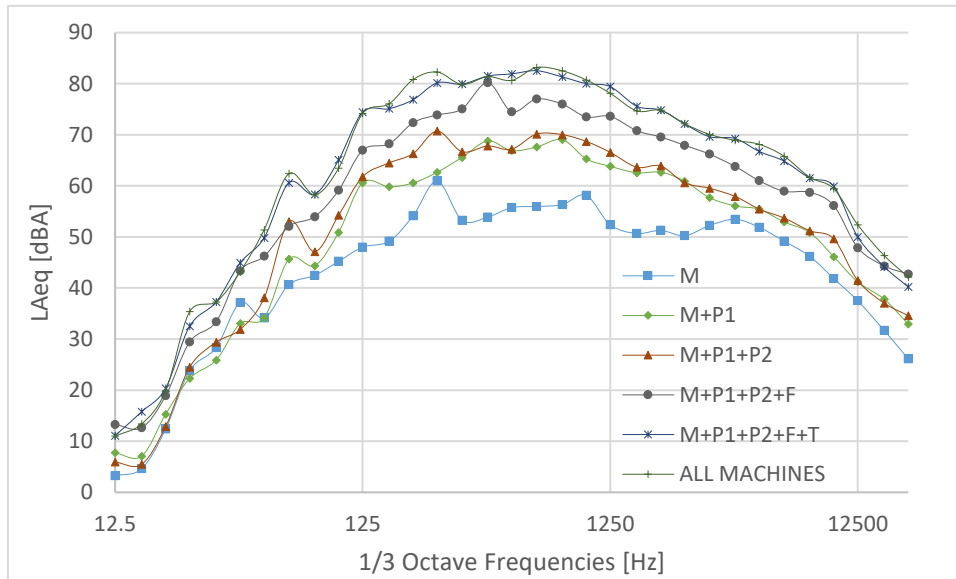


Figure 12. 1/3 Octave band frequency response of the polishing machine before insulation applications (*Yalıtım uygulamasından önce polisaj makinesinin 1/3 octave band frekans cevabı*)

The vibration-induced noise level of the polishing machine should be determined. For this reason, the vibration isolation performance of the machine with the floor has also been examined. In this way, vibration levels from the machine to the ground and from the ground to the machine can be

determined. For the vibration isolation performance, vibration measurements of all the feet of the machine as well as the ground where the feet of the machine touch were taken. Vibration isolation performances of each foot were determined by using RMS values of floor and machine feet vibrations. According to

the first vibration measurements, it was determined that there was no vibration isolation application and the vibration isolation of the machine was quite bad.

Most of the machine vibrations are transmitted to the floor. However, ground vibrations originating from other machines are transmitted directly to the machine (Figure 13). In addition, it has been determined that the vibration levels of all machine feet are not equal and are very different from each other.

This difference shows that different antivibration rubber is required for each machine foot. Elastic

coefficients of vibration isolation pads were calculated by using Equation 4 to improve the vibration isolation performance of the machine. Accordingly, the stiffness of the vibration rubber pad to be placed on each machine foot in order to provide 10% vibration isolation was calculated as in Figure 14.

After the antivibration rubbers, whose elastic rigidity was computed, were placed under the machine feet, significant vibration isolation for the machine was observed (Figure 15).

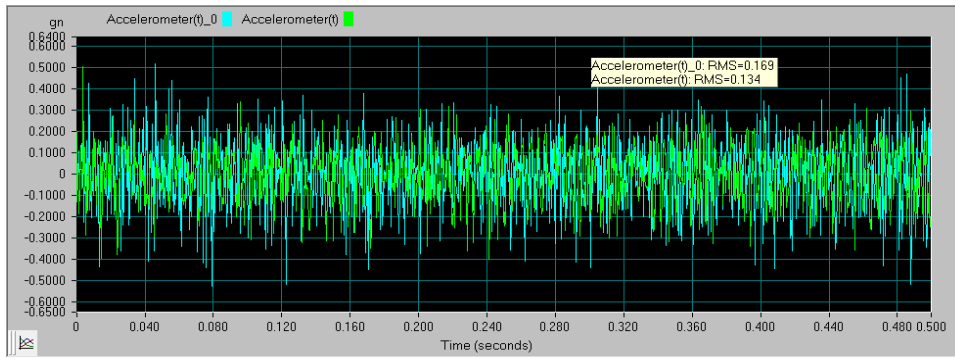


Figure 13. Vibration response of the machine for the A foot and the foundation before vibration isolation
(*Titreşim izolasyonundan önce makinenin A ayağı ve temeli için titreşim cevabı*)

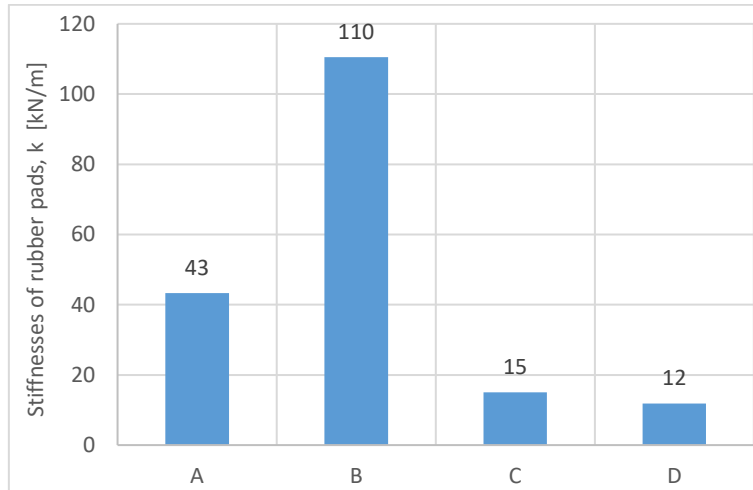


Figure 14. Stiffnesses of antivibration rubber pads placed under feet of the machine
(*Makinenin ayaklarına yerleştirilen titreşim önleyici kauçuk takozların rijitliği*)

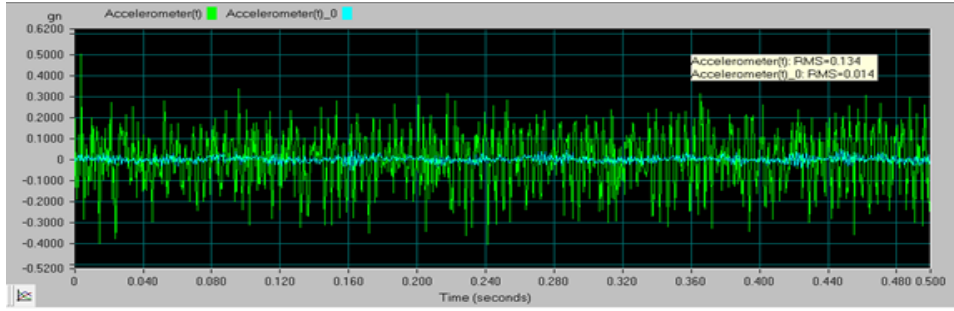


Figure 15. Vibration response of the machine for the A foot and the foundation after vibration isolation (*Titreşim izolasyonundan sonra makinenin A ayağı ve temeli için titreşim cevabı*)

In order to reduce the noise levels of the polishing machine, after the fan suction pipes were covered with acoustic insulation material and after the vibration rubber pad was placed on the machine's feet, all measurements were repeated under the same conditions. Thus, the effects of both noise and vibration insulation on the noise levels of the polishing machine were determined separately (Figure 16). Accordingly, it was determined that the component with the least impact was the idle noise of the machine. It is understood that the fan and fabric noise components are the dominant noise sources. For the polishing process, polishing polrotors apply pressure to the fabric fed to the loom and apply rapid shearing force at each turn. This causes low-frequency fabric cutting noise.

According to the measurement results, it is seen that fabric noise is the most dominant source of the noise. For this reason, it is understood that the fabric noise should be reduced first in order to reduce the total noise of the machine. However, the ability to reduce fabric cutting noise is related to the structural design of the machine. Since it is not effective to interfere with the structural design and manufacturing processes of the machine, no measures have been taken to reduce fabric noise. Nevertheless, it is clear that the measures are taken to reduce fan noise, and vibration-induced noise is quite beneficial. During the active operation of all the machines in the work area, a significant noise reduction of 7 dBA approximately has been achieved. This is an important level for workers exposed to noise.

Vibration-induced noises affect employees more because they are low frequency and high amplitude. The application of the vibration pads significantly reduced the vibrations caused by the polrotor cylinder. It is seen that vibration-induced high

amplitude noise components decrease as vibration pads reduce machine vibrations.

There are working offices in the back of the fabric processing area where the polishing machine is located. Office workers, as well as production workers, are disturbed by the noise level of the fabric processing area. In order to reduce the transmission of the noise coming from the production line to the work area, a noise abatement wall was installed between the benches and the offices. In order to see the effect of the noise abatement wall, measurements were taken before and after the application of the wall, at a distance of 2 m from the wall, while all the machines were working actively. Results regarding the noise abatement of the wall are given in Figure 17. It was observed that the noise level on the fabric processing area was reduced up to 10 dBA approximately by the installed noise wall. The 10 dBA noise reduction is a significant improvement in terms of noise exposure of office workers.

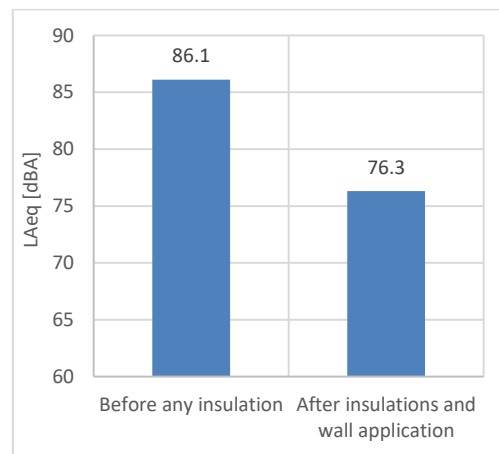


Figure 16. Comparisons of noise levels in the office area (*Ofis alanındaki gürültü seviyelerinin kıyaslanması*)

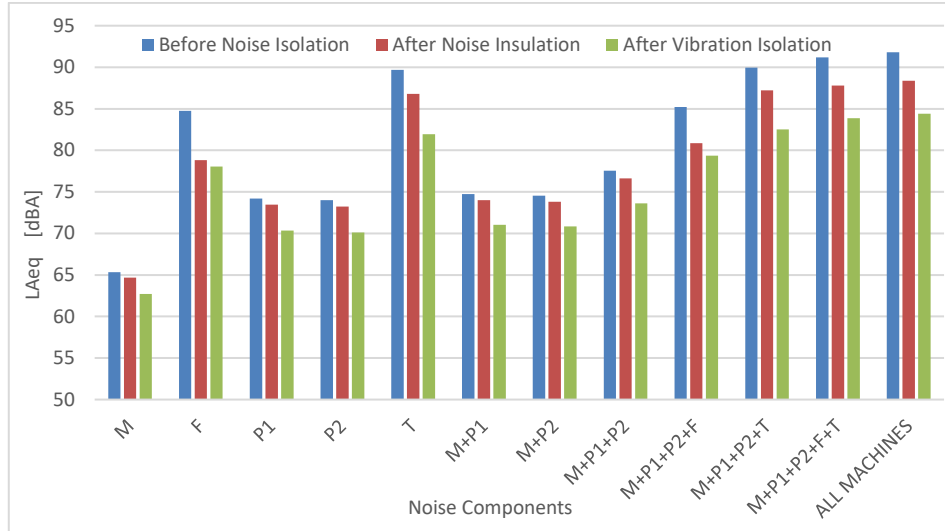


Figure 17. Comparisons of the noise levels after noise and vibration insulation application (*Gürültü ve titreşim izolasyon uygulamasından sonra gürültü seviyelerinin kıyaslanması*)

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In the research study, noise and vibration reduction studies of the polishing machine, one of the loudest benches in a textile factory where the velvet fabric production is made, were carried out.

For noise and vibration abatements, the noise and vibration levels of each machine component contributing to the machine's total noise level were determined by experimental measurements and calculations. When the measurement data were examined, it was seen that each machine element contributed to the total noise level of the machine separately. The noise and vibration analysis determined that the dominant noise sources were fan noise, fabric polishing noise, and vibration originated noise. For reducing the noise effects of the dominant noise components, fan air inlet ducts are covered with special acoustic insulation material to reduce fan noise.

Interestingly, according to the vibration measurements, it was understood that each machine foot produced different vibration levels. Significant differences between the vibration levels of the machine feet were an indication of increased machine noise and the need for vibration isolation of the machine. In order to reduce the vibration of the machine and the noise level caused by vibration, firstly were calculated vibration insulation ratios of the machine feet. Next, the required rigidity and damping ratios of the vibration wedges placed on the machine feet were calculated for vibration isolation. Then suitable rubber pads were determined and applied to the machine's feet. According to the noise and vibration measurements before and after the

insulation applications, approximately 7 dBA noise abatement was achieved. At the same time, an acoustic panel wall was built between the noisy production line and the working office. As a result, the noise transmission to the office areas has been reduced by approximately 10 dBA by noise cutting panel.

According to the results of the study, vibration and noise isolation applications of the machines must be made to protect the health of workers and employees. Work offices should be located as far away from noisy areas as possible. Various applications should be made to reduce noise transmission between noisy areas and work offices if this is not possible. Furthermore, this study will quickly guide the steps to be followed for noise and vibration reduction studies of noisy production machines in industrial areas.

CONFLICT OF INTEREST STATEMENT (ÇIKAR ÇATIŞMASI BİLDİRİMİ)

No potential conflict of interest was reported by the authors.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] E. Atmaca, I. Peker and A. Altın, "Industrial noise and its effects on humans," *Polish Journal of Environmental Studies*, vol. 14, no. 6, pp. 721-726, April 2005.
- [2] World Health Organization (WHO), "Addressing the rising prevalence of hearing loss," *apps.who.int*, February 2018. [Online]. Available: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/26>

0336/9789241550260-eng.pdf?sequence=1&isAll
[Accessed: Aug. 5, 2021].

- [3] T. S. S. Jayawardana, M. Y. A. Perera and G. H. D. Wijesena, "Analysis and control of noise in a textile factory," *International Journal of Scientific and Research Publications*, vol. 4, no. 12, pp. 1-7, December 2014.
- [4] M. H. Noweir and A. T. M. Jamil, "Noise Pollution in Textile, Printing and Publishing Industries in Saudi Arabia," *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 83, no. 1, pp. 103–111, March 2003.
- [5] N. Parvin, M. Nabiollah and R. Negar, "Survey of noise pollution in weaving unit of parsabaft textile factory and providing some noise control ways," *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*, vol. 10, no. 7, pp. 876-881, 2016.
- [6] M. K. Talukdar, "Noise pollution and its control in textile industry," *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, vol. 26, no.1-2, pp. 44-49, March 2001.
- [7] Z. Duran, M. Genç, T. Doğan and B. Erdem, "Evaluation of noise emission in a textile plant," *NATURENGS, MTU Journal of Engineering and Natural Sciences*, vol. 1, no. 1, pp. 53-63, June 2020. doi:<https://dx.doi.org/10.46572/nat.2020.6>
- [8] G. E. Johnson, "An investigation of picking noise in an automatic loom," M.Sc. thesis, Dept of Mec. Eng., Georgia Inst. of Tech., Atlanta, Georgia, United States, 1974.
- [9] F. Shabani, I. Alimohammadi, J. Abolghasemi, T. Dehdari and R. Ghasemi, "The study of effect of educational intervention on noise annoyance among workers in a textile industry," *Applied Acoustics*, vol. 170, pp. 107515, December 2020. doi: 10.1016/j.apacoust.2020.107515
- [10] R. Atiénzar-Navarro, M. Bonet-Aracil, J. Gisbert-Payá, R. del Rey and R. Picó, "Sound absorption of textile fabrics doped with microcapsules," *Applied Acoustics*, vol. 164, pp. 107285, February 2020.
- [11] K. Z. Aung, M. M. Aung, M. Thandar, Y. M. Htun, T. H. Aung, M. K. Tun and M. H. Zaw, "Assessment of noise exposure and hearing loss among workers in textile mill (Thamine), Myanmar: a cross-sectional study," *Safety and Health at Work*, vol. 11, no. 2, pp. 199-206, June 2020. doi: <https://dx.doi.org/10.1016/j.shaw.2020.04.002>
- [12] A. Osibogun, I. Igweze and L. Adeniran, "Noise-induced hearing loss among textile workers in Lagos metropolis," *The Nigerian Postgraduate Medical Journal*, vol. 7, no. 3, pp. 104–111, Sep 2000.
- [13] H. O. Ahmed. "Noise exposure, awareness, practice and noise annoyance among steel workers in United Arab Emirates," *The Open Public Health Journal*, vol. 5, no. 1, pp. 28-35, July 2012. doi:<https://dx.doi.org/10.2174/1874944501205010028>
- [14] F. E. Ologe, T. M. Akande and T. G. Olajide, "Occupational noise exposure and sensorineural hearing loss among workers of a steel rolling mill," *Eur Arch Otorhinolaryngol*, vol. 263, no. 7, pp. 618-621, July 2006. doi: 10.1007/s00405-006-0043-9
- [15] S. Harmadji and H. Kabullah, "Noise induced hearing loss in steel factory workers," *Folia Medica Indonesiana*, vol. 40, no.4, pp. 171-174, October-December 2004.
- [16] G. Agarwal, P.S. Nagpure and S.V. Gadge, "Noise Induced Hearing Loss in Steel Factory Workers," *International Journal of Occupational Safety and Health*, vol. 4, no. 2, pp. 34-43, March 2015. doi:10.3126/ijosh.v4i2.12544
- [17] T. N. Wu, F. S. Chou and P. Y. Chang, "A study of noise-induced hearing loss and blood pressure in steel mill workers," *International Archives of Occupational and Environmental Health*, vol. 59, no. 6, pp. 529-36, September 1987. doi: <https://dx.doi.org/10.1007/BF00377915>
- [18] A. Sriopas, R. S. Chapman, S. Sutamma and W. Siriwong, "Occupational noise-induced hearing loss in auto part factory workers in welding units in Thailand," *Journal of Occupational Health*, vol. 59, no. 1, pp. 55-62, January 2017. doi: <https://dx.doi.org/10.1539/joh.15-0291-OA>
- [19] Occupational Safety and Health Administration (OSHA), "Hearing conservation," *osha.gov*, 2002. [Online]. Available: <https://www.osha.gov/sites/default/files/publication/s/osha3074.pdf>. [Accessed: Aug. 5, 2021].
- [20] W. J. Murphy and John Franks, "Criteria for a recommended standard, occupational noise exposure, revised criteria," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 111, no. 5, pp. 2397, May 2002. doi:<https://dx.doi.org/10.1121/1.4778162>
- [21] World Health Organization (WHO), "Situation review and update on deafness, hearing loss and

intervention programmes: Proposed Plans of Action for Prevention and Alleviation of Hearing Impairment in Countries of the South-East Asia Region," *apps.who.int*, December 2007. [Online]. Available:

<https://apps.who.int/iris/handle/10665/205895>.

[Accessed: Aug. 5, 2021].

[22] Runian Company, "Runian Machine: RN420A," *lygrn.com*, 2020. [Online], Accessed: April 07, 2021]. Available: http://www.lygrn.com/en/Products/POLISHING_MACHINE/2016111211.html. [Accessed: Aug. 5, 2021].

[23] H. N. Özgüven, *Gürültü Kontrolü: Endüstriyel ve Çevresel Gürültü*. Türk Akustik Derneği Yayınları, Ankara, Turkey, 2008.


[24] International Electrotechnical Commission (IEC), "IEC 61672-1:2013 - Electroacoustics - Sound level meters - Part 1: Specifications," *webstore.iec.ch*, Sept. 30, 2013. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/publication/5708>. [Accessed: Aug. 5, 2021].

[25] American National Standard (ANS), "ANSI/ASA S1.4-2014: Electroacoustics-Sound Level Meters - Part 1: Specifications (A Nationally Adopted International Standard)," *webstore.ansi.org*, 2014. [Online]. Available: <https://webstore.ansi.org/standards/asa/ansiasas12014partiec616722013>. [Accessed: Aug. 5, 2021].

[26] International Electrotechnical Commission (IEC), "IEC 61260-1:2014 - Electroacoustics - Octave-band and fractional-octave-band filters - Part 1: Specifications," *webstore.iec.ch*, Feb 14, 2014. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/publication/5063#additionalinfo>. [Accessed: Aug. 5, 2021].

[27] American National Standard (ANS), "ANSI/ASA S1.40-2006 (R2016): Electroacoustics-Specifications and Verification Procedures for Sound Calibrators," *webstore.ansi.org*, 2016. [Online]. Available: <https://webstore.ansi.org/standards/asa/ansiasas1402006r2016>. [Accessed: Aug. 5, 2021].

The Synthesis Copper-doped Nickel Oxide and Application of Hybrid Nano-lubricants as a Compressor Oil

Mustafa AKKAYA^{*a} , Erdi AKMAN^b 

^{a,*} Karamanoglu Mehmetbey University, Department of Energy System Engineering, 70200, Karaman, Türkiye

^b Karamanoglu Mehmetbey University, Scientific and Technological Research & Application Center, 70200, Karaman, Türkiye

ARTICLE INFO

Received: 26.04.2021
Accepted: 07.05.2021

Keywords:

Compressor work, Cu-doped NiO synthesis, Hybrid nano-lubricant, Mineral oil

ABSTRACT

Nano-lubricants have perfect heat transfer properties due to having solid nanoparticles. In this report, 2.0% copper (Cu) were doped nickel oxide (NiO) nanoparticles by a facile chemical precipitation method. The synthesized nanoparticles were physically mixed with the base liquid mineral oil (MO) at 0.5% and 1.0% mass fraction. Sodium dodecyl benzene sulphonate (SDBS) surface active material at 0.5% mass fraction was also used in the prepared suspension in order to overcome the surface tension. In this way, nano-lubricants prepared with different concentrations of NiO and Cu-doped NiO nanoparticles were used in the refrigeration system. The compressor work was calculated as 24.971 kJ/h when nano-lubricant prepared with NiO nanoparticles at 0.5% mass fraction was used in the refrigeration system. Compressor work was calculated as 23.313 kJ/h and 23.058 kJ/h when using nano-lubricant prepared with NiO nanoparticles with Cu added in 0.5% and 1.0% mass fraction, respectively, as the compressor oil. The NiO-based nanoparticles can be a promising material for high-performance hybrid nano-lubricants applications.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.02.06>

Bakır Katkılı Nikel Oksit Sentezi ve Hibrit Nano-yağlayıcıların Kompresör Yağı Olarak Uygulaması

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 26.04.2021
Kabul: 07.05.2021

Anahtar Kelimeler:

Kompresör işi, Cu katkılı NiO sentezi, Hibrit nanoyağlayıcı, Mineral Yağ

ÖZ

Nanoyağlayıcılar, katı nanopartiküllere sahip oldukları için mükemmel ısı transfer özelliklerine sahiptir. Bu çalışmada, %2,0 oranında bakır (Cu), basit bir kimyasal çökeltme yöntemi ile nikel oksit (NiO) nanopartiküllerine katılanmıştır. Sentezlenen nanopartiküller, ağırlıkça %0,5 ve % 1,0 oranlarında baz sıvısı mineral yağ (MO) ile fiziksel olarak karıştırılmıştır. Hazırlanan süspansiyonda, yüzey geriliminin üstesinden gelmek için ağırlıkça %0,5 oranında sodyum dodesil benzen sülfanat (SDBS) yüzey aktif malzemesi kullanıldı. Bu şekilde, soğutma sisteminde farklı konsantrasyonlarda NiO ve Cu katkılı NiO nanopartiküller ile hazırlanan nanoyağlayıcılar kullanılmıştır. Soğutma sisteminde ağırlıkça %0,5 oranında NiO nanopartiküller ile hazırlanan nanoyağlayıcı kullanıldığında kompresör işi 24,971 kJ/h olarak hesaplanmıştır. Kompresör yağı olarak sırasıyla; %0,5 ve %1,0 kütle oranlarında eklenmiş, Cu katkılı NiO nanopartiküller ile hazırlanan nanoyağlayıcı kullanıldığında kompresör işi 23,313 kJ/h ve 23,058 kJ/h olarak hesaplanmıştır. NiO tabanlı nanopartiküller, yüksek performanslı hibrit nanoyağlayıcı uygulamaları için umut verici bir malzeme olabilir.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.02.06>

*Corresponding author: makkaya@kmu.edu.tr

To cite this article: M. Akkaya ve E. Akman, "The Synthesis Copper-doped Nickel Oxide and Application of Hybrid Nano-lubricants as a Compressor Oil," *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol.7, no.2, pp. 134-142, 2021.
doi:<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.02.06>

1. INTRODUCTION (*Giriş*)

As a result of research conducted in recent years, it was predicted that non-renewable energy sources will be exhausted by the end of the 22nd century. For this reason, large budgets were allocated to the development of renewable energy sources and renewable energy systems in all world societies [1,2]. In addition to these measures for energy resources, efficient use of energy is extremely important. It is known that energy use has increased significantly in recent years throughout the world. Buildings consume more than 40% of the global energy amount and industrial systems consume the other part of the energy amount [3-5].

A significant part of the energy was used by cooling systems in industry and in our daily life. Compressors consume most of the electricity in cooling systems. In this period when we were faced with the energy crisis, efficient use of energy has become a necessity. Therefore, efficiency studies in cooling systems will be beneficial. Instead of oils used as working fluid in compressors, nano-lubricants with better heat transfer properties can be preferred. In recent studies, nano-lubricants prepared with base liquid oil and solid nanoparticles were used as compressor oil. In these prepared suspensions, solid nanoparticles in nano-lubricant are the main factor in determining the heat transfer properties [6-8].

Abbas et al. drew attention to the fact that nanofluids were used as cooling fluids in heat transfer applications. Recently, they reported that hybrid nanofluids were also used extensively in these applications. In this article, the authors have used hybrid nanofluid as the working fluid in aluminium tube radiators. They were used a new type of hybrid nanofluid containing $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ (50:50) nanoparticles as the working fluid in the automotive radiator. Ultimately, it was determined that the heat transfer rate increased by 26.7% compared to water. In addition, with the new type of nanofluid used, the number of nusselt increased by 20.03% compared to water. However, a significant amount of agglomeration and sedimentation was observed when the suspension was kept for up to 20 hours after preparation [9]. One of the biggest problems in nanofluid, nano-lubricant and nano-refrigerant suspensions have seen as these agglomerations that occur in suspension after waiting for a while. Tlili et al. prepared a hybrid nanofluid by adding Ti-Cu nanoparticles into the base liquid water-ethylene. They were investigated the fluid flow and energy transport properties of the hybrid nanofluids prepared.

In the experiments, they were examined the propulsion, thermal transport, and surface friction properties of the prepared nanofluids. They were investigated numerical and graphical results for the nusselt number. It has been reported that the heat transfer rate of Ti-Cu/EG-Water hybrid nanofluid was higher than that of Ti/EG-water [10].

Sundar et al. were analyzed the entropy and exergy efficiency of nanodiamond (ND) / Fe_3O_4 /60:40% W/EG hybrid nanofluids in their experimental studies. They were used the in-situ/chemical co-precipitation synthesis method while synthesizing the nanoparticles. The authors were prepared hybrid nanoparticles by adding Fe_3O_4 nanoparticles to the surface of nanodiamond nanoparticles. They were predicted the magnetic properties of the prepared nanoparticles by characterization by X-ray Diffraction (XRD) and Transmission Electron Microscopy (TEM). The authors were reported that the maximum thermal conductivity performance increased up to 12.79% at $T = 60^\circ\text{C}$, at a nanoparticle concentration of 0.2% by volume. They were also stated that at the same concentration the nusselt number increased by 15.65% [11].

Huang et al. stated that one of the common research topics in the industry is the boiling heat transfer process. In this experimental study, a hybrid nanofluid was prepared by adding silicon oxide/graphene nanoparticles in pure water to the work nanofluid. In the experiments, the boiling heat transfer properties of hybrid nanofluids were investigated. As an effect of the study, it was noticed that the boiling heat transfer coefficient decreased [12]. Li et al. were used the hybrid nanofluid prepared in their studies as the fluid in the heat exchanger. The authors were used water as work fluid and Ag-MgO as nanoparticle while preparing nanofluid. In the experiments, the hydrothermal and irreversible properties in the forced convection flow by the heat exchanger were analysed numerically. In this study, it was stated that the heat transfer rate and the total heat transfer coefficient increased in direct proportion to the Reynolds number. It has been reported that heat exchanger efficiency, pressure loss, pumping power, and performance index are inversely proportional to Reynold's number [13]. Urmi et al. were examined the thermophysical properties of hybrid nanofluids, which they prepared in their experimental studies. They were used 40% ethylene glycol base liquid and $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ hybrid nanofluids while preparing nanofluid. In the experiments, they were investigated the Newtonian behavior of hybrid nanofluids depending on temperature and concentrations. The authors were

reported that the general thermal conductivity increased by 40.86% at a temperature of 80 °C and a concentration of 0.1%. In addition, it has been observed that the thermal conductivity of hybrid nanofluids is superior to single nanofluids [14].

In this study, Cu nanoparticles were added to pure NiO nanoparticles by a facile chemical precipitation method. It is known that Cu nanoparticles were frequently used in nanofluid applications and successful results were obtained [15-17]. In addition, there are experimental studies made with nanofluid prepared using NiO material [18,19]. It is seen that Cu and NiO nanoparticles were used in nanofluid applications due to their high heat transfer properties. In this experimental study, Cu-doped NiO nanoparticles synthesized by a chemical method were used to prepare hybrid nano-lubricant. [20,21]. The use of hybrid nano-lubricant were prepared with synthesized Cu-doped NiO nanoparticle in this study makes a difference. Hybrid nanoparticles are not yet common to use in nano-lubricant applications. In addition, nanoparticles were physically mixed in (50:50) ratios in general in hybrid nanofluid applications [9]. In order to prevent nanoparticle aggregation, 0.5% by weight SDBS surfactant was also added to the suspension. In the experimental study, it was aimed to show the effects of Cu-doped NiO particles synthesized by chemical methods and forming a hybrid combination on the working efficiency of the compressor in the cooling system.

2. MATERIAL and METHOD (MATERİYAL ve METOT)

2.1. Experiential Procedure (Deneyisel Prosedür)

2.1.1. Materials (Malzemeler)

Nickel (II) nitrate hexahydrate ($\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) (99.0%), copper (II) nitrate hydrate ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$) (99.99%) and sodium hydroxide (NaOH) ($\geq 99.0\%$) was obtained by Sigma Aldrich. Surfactant was used to overcome the surface tension of solid nanoparticles while preparing the suspension. Chemical structure of the used surfactant SDBS ($\text{C}_{18}\text{H}_{29}\text{NaO}_3\text{S}$) was given the scheme in Fig.1 [22,23].

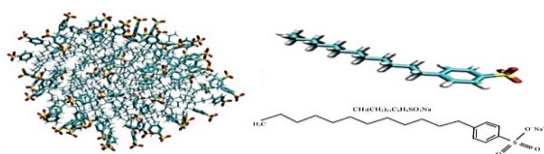


Figure 1. SDBS chemical structure. [22,23]
(SDBS kimyasal yapısı)

2.1.2. Synthesis of pure NiO and Cu-doped NiO nanoparticles (Saf NiO ve Cu katkılı NiO nanopartiküllerinin sentezi)

Pure NiO nanoparticles were synthesized by a chemical precipitation method by modifying this report [24]. Firstly, 712.5 mg ($\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) as precursor materials was dissolved in deionized water (500 mL). After 30 min of mixing, pH degree of NiO solution was adjusted to 9.2 by 0.16 g powder of NaOH and stirred for 1 hour at room temperature. Then, obtained NiO nanoparticles were centrifuged with both water and ethanol two times at a constant rotation of 6.500 rpm. Later, obtained 40-nm sized NiO nanoparticles were dried at 80 °C for 3 h and annealed at 300 °C for 1 h. The same processes were carried out for 2% Cu-doped NiO nanoparticles. The obtained pure NiO and Cu-doped NiO nanoparticles were added in certain proportions in the oil and mixed with a homogenizer for 1 hour at room temperature.

2.1.3. Characterization techniques (Karakterizasyon teknikleri)

The crystallite properties of the nanoparticles were determined by Bruker D8 Advance X-ray Diffractometer (XRD). The morphologies of the pure NiO and Cu-doped NiO nanoparticles were studied using Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM) (Hitachi SU5000).

2.2. Experimental Setup and Uncertainty Analysis (Deneyisel Kurulum ve Belirsizlik Analizi)

Stage Compressed Intermediate Cooling Training Set (Deneyset) was used in the experiments. Prepared nano-lubricants were used as operating oil in the compressor in a simple cooling system. Experimental setup was shown in Fig. 2.

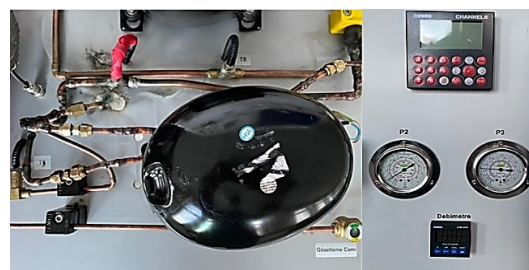


Figure 2. Image of experimental setup.
(Deneyisel kurulumun resmi)

Pt-100 type thermocouples operating in the range of - 200 °C ~ +850 °C were used for temperature measurements in the experiment set. In the experiments, Refco Type (mr-205,305-ds) oil manometers were used to measure the pressure values.

According to the Holman [25] model, the uncertainties of the measurement elements were calculated as ± 1.41 and ± 0.10 , respectively.

2.3. Preparation of Nano-lubricant (Nano-yağlayıcının hazırlanması)

When preparing nano-lubricant, 100 ml of MO was used as the base fluid. Solid-liquid suspension was obtained by adding NiO and Cu-doped NiO into mineral oil in different mass fractions. In the first stage, in the suspension, 0.5% by weight NiO was used as the nanoparticle. In the next step, Cu-doped NiO nanoparticles were used in 0.5% and 1.0% mass fractions by weight. In order to prevent flocculations in the suspensions, 0.5% by weight SDBS surfactant was added. Solid-liquid mixture was mixed with Ultrasonic homogenizer to ensure a homogeneous distribution in the suspension. Ultrasonic homogenizer is a good tool for even distribution of solid particles in the liquid. Then, the prepared nano-lubricants were mixed in an ultrasonic water bath (Kudos-Model: SK2210HP) for 3 hours. Finally, the suspension was also stirred in magnetic stirrer (Jeio Tech MS-32M) for 3 hours. These stages were shown in the Fig. 3.

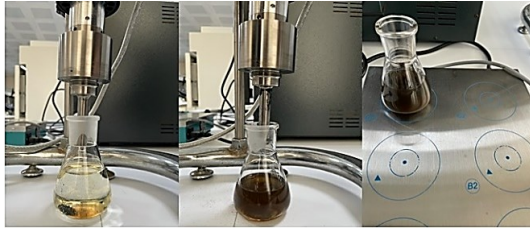


Figure 3. Preparation of different concentrations of nano-lubricants. (Farklı nano yağlayıcı konsantrasyonlarının hazırlanması)

3. RESULTS and DISCUSSION (SONUÇLAR ve TARTIŞMA)

3.1. XRD and SEM Results for Cu-doped NiO Nanoparticles (Cu katkılı NiO Nanopartikülleri için XRD ve SEM Sonuçları)

To reveal the crystallite properties of the synthesized pure NiO and Cu-doped NiO nanoparticles, XRD analysis were carried out, as shown in Fig. 4. The 37.37°, 43.38°, 62.85°, 75.26 and 79.39° characteristic peaks for (111), (200), (220), (311) and (222) orientations of the pure NiO powder in XRD pattern were shown in Fig. 4a. Peaks from XRD are well matched with primary status of 00-047-1049 JCPDS card number of pure NiO. The well matched with the related JCPDS card indicated that NiO was high pure [26,27] On the other hand, in the case of 2.0% Cu incorporation into NiO structure, the

peak intensity of Cu-doped NiO powder was raised, which indicates the improvement of the crystallite properties [28,29]. In addition to crystallite improvement, in the case of 2.0% Cu incorporation into NiO structure, the position of the corresponding peak was shifted to up to $\sim 0.4^\circ$ higher points, as shown in Fig. 4b. The position shift of Cu-doped NiO sample reveals that the Cu ions was successfully incorporated into NiO structure and which may mentioned improvements a lots of properties the pure NiO sample [30]. Moreover, the average crystallite size of obtained pure NiO and Cu-doped NiO nanoparticles was calculated from the Debye-Scherrer equation [31-34]. The calculated average crystallite size for pure NiO was approximately 4.57 nm for dominant peak (the position of 43.37°), while average crystallite size for pure Cu-doped NiO was approximately 7.34 nm for dominant peak (the position of 43.76°).

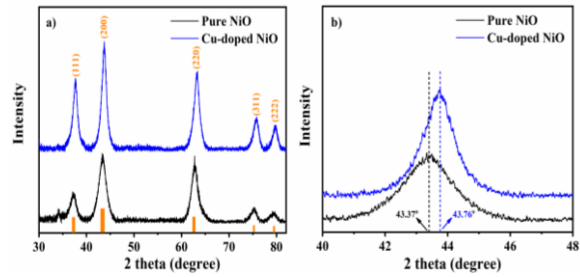


Figure 4. (a) XRD pattern of pure NiO and Cu-doped NiO. (b) XRD shift of pure NiO and Cu-doped NiO at 43.37° position. (a) Saf NiO ve Cu katkılı NiO'nun XRD modeli b) 43.37° konumunda saf NiO ve Cu katkılı NiO'nun XRD kayması)

To observe the morphologies properties of the pure NiO and Cu-doped NiO nanoparticles, SEM measurements were made, as shown in Fig. 5. Fig. 5a shows the pure NiO SEM images while the Fig. 5b shows Cu-doped NiO SEM images. As seen in Fig. 5, the grains of both nanoparticles were dispersed without clustering. Comparing surface images of nanoparticles, the surface images of produced nanoparticles have been not changed significantly with Cu doping effect. On the other hand, the grain size in both samples is below 50 nm, which is an important parameter for oil performance. In addition to SEM images, energy dispersive X-ray (EDX)-mapping method was used to detect the distribution of Cu ions in the structure of NiO host materials. Obtained EDX-mapping results of Cu and Ni ions showed in Fig. 5(c-d). As can be seen from the EDX-mapping results in Fig. 5d, Cu ions are distributed homogeneously in the structure of NiO.

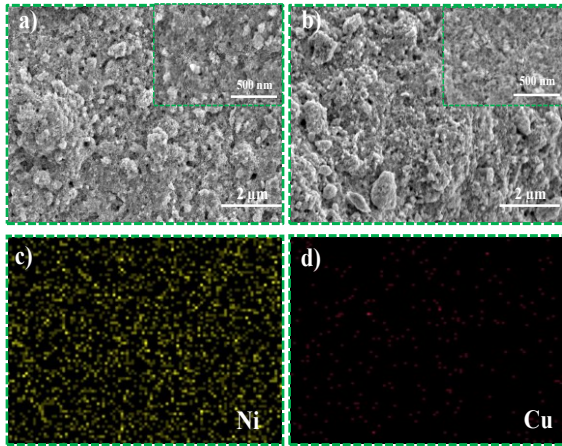


Figure 5. SEM images of a) pure, b) Cu-doped NiO powders at different magnificient. (*Saf ve Cu katkılı NiO tozlarının SEM görüntüleri*). EDX-mapping images of c) Ni, d) Cu in synthesized Cu-doped NiO powders. (*Sentezlenmiş Cu-katkılı NiO tozu için EDX-haritalama sonucu*)

3.2. Investigation of Compressor Capacity and Coefficient of Performance (*Kompresör Kapasitesi ve Soğutma Etkinlik Katsayısının İncelenmesi*)

In this paper, different concentrations of nano-lubricants have been prepared with base fluid oil, hybrid nanoparticles and surfactant material. These prepared nano-lubricants were used as compressor oil in the cooling cycle and the thermodynamic parameters for the cycle were evaluated. In the cooling cycle; the inlet-outlet temperatures of the compressor, evaporator and condenser elements and the pressure values of the system were measured. Based on these measurement results, enthalpy values were determined thermodynamically. Depending on the temperature, pressure and flow rate of the refrigerant, the compressor capacity, the amount of heat the evaporator absorbs from the ambience and the COP values were calculated based on the following formulas [35].

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_E}{\dot{W}_C} \quad (1)$$

$$\dot{W}_C = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (2)$$

$$\dot{Q}_E = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad (3)$$

Condenser outlet and evaporator inlet enthalpy values were averaged while calculations were made. Also, the performance of cooling systems was affected by the ambient temperature. While conducting the experiments, the ambient temperature was measured between 14 and 16 °C. In the experiments, firstly, pure MO was utilized as the operating fluid in the compressor. Then, experiments

were carried out with nano-lubricants prepared with different concentrations of NiO nanoparticles and hybrid Cu-doped NiO nanoparticles. In line with the data obtained as a result of the experiments, the compressor work and coefficient of performance were calculated as given in Fig. 6. When pure MO was utilized as the compressor operating oil, the compressor duty was calculated as 26.836 kJ/h, while the coefficient of performance was calculated as 4.66. Then, when the nano-lubricant prepared with NiO nanoparticles at 0.5% ratio by weight was utilized as compressor oil, the compressor capacity was calculated as 24.971 kJ/h, and the coefficient of performance was calculated as 5.09. When hybrid Cu-doped NiO nanoparticles were used while preparing the nano-lubricant, the compressor work was calculated as 23.313 kJ/h and the coefficient of performance was calculated as 5.45. When we compare the use of hybrid nano-lubricant with the use of pure MO oil, the compressor work has decreased by 13.12%.

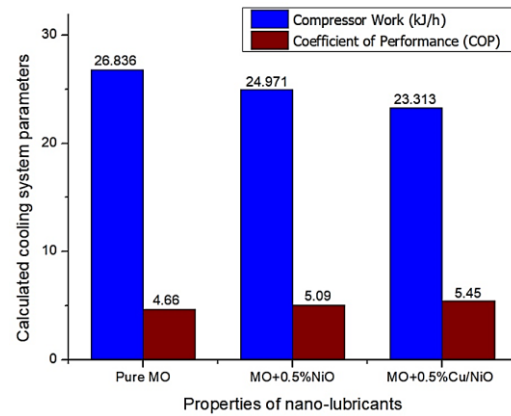


Figure 6. Compressor work and COP values (MO/NiO/Cu-doped NiO) (*Kompresör çalışması ve COP değerleri (MO/NiO/Cu katkılı NiO)*).

The effects of using hybrid nano-lubricants in different mass fractions in the vapor compression cooling system were also shown in Fig. 7. As a conclusion of the use of pure MO as compressor work fluid, the compressor capacity was calculated as 26.836 kJ/h and the coefficient of performance was calculated as 4.66. When the mass fraction of Cu-doped NiO nanoparticles used in preparing hybrid nano-lubricants was made 1.0%, the compressor work was calculated as 23.058 kJ/h and the coefficient of performance was calculated as 5.52. When we compare the use of hybrid nano-lubricants at 1.0% mass fraction with the use of pure MO, the compressor work has decreased by 14.07%. Precipitation was observed when the suspension was prepared with

more than 1.0% by weight of nanoparticles while preparing the nano-lubricant.

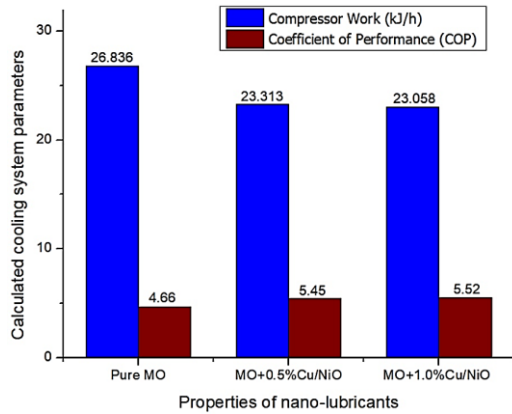


Figure 7. Compressor work and COP values (MO and different mass fraction Cu doped NiO)
(Kompresör çalışması ve COP değerleri (MO ve farklı kütle fraksiyonu Cu katkılı NiO))

The performance of the cooling system depends on the ambient conditions. However, a comparison has been made with a previous study. Akkaya et al. in their experimental study, a different type of compressor was used. The COP value was calculated as 4.70 when nano-lubricant prepared with base liquid polyol ester (POE) and 1.0% Titanium dioxide (TiO_2) was used [7]. In this study, the highest COP value was calculated as 5.52. However, the ambient conditions differed in this study. In addition, different types of compressors and nano-lubricants were used.

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In this study, NiO nanoparticles were synthesized and then Cu nanoparticles were added by a facile chemical precipitation method. While synthesizing the nanoparticles, 2.0% by weight of Cu nanoparticles in NiO were used. Hybrid nanoparticles synthesized were tested in the cooling system. While preparing the nano-lubricant, nanoparticles in 0.5% and 1.0% mass fractions and surface active material in 0.5% mass fraction were used. Studies have been carried out with pure MO oil and different concentrations of nano-lubricants and the experimental results have been compared.

- When SEM and XRD results were examined, it is seen that the hybrid nanoparticles synthesized are synthesized as pure and homogeneously. The presence of Cu particles in NiO nanoparticles is seen in these analyses.
- All nano-lubricants different proportions by weight operated the refrigeration machine more efficiently than pure MO.

- When pure MO was utilized as compressor work fluid, the compressor capacity was calculated as 26.836 kJ/h. When utilized as nano-lubricant compressor oil prepared with base liquid MO and 1.0% Cu doped NiO, the compressor work was calculated as 23.058 kJ/h. When using hybrid nano-lubricant as compressor oil, compressor work has been reduced by approximately 14.07%.
- When pure MO was used in the compressor, the COP value was calculated as 4.66. COP rate was calculated as 5.52 when used as nano-lubricant compressor work fluid prepared with base liquid MO and 1.0% Cu-doped NiO. When the hybrid nano-lubricant was utilized as the compressor work fluid, the COP value has increased by 18.45%.
- In the experiments, it has been concluded that hybrid nano-lubricants can be used safely in the cooling system. It can also be suggested that hybrid nano-lubricants with different properties can be used.

ABBREVIATIONS

\dot{Q}_E	The amount of heat absorbed by the evaporator (kJ/h)
\dot{W}_C	Compressor work (kJ/h)
\dot{m}	Mass flow rate (kg/h)
$h_{1,2,4}$	Enthalpy values (kJ/kg)
T	Temperature [K]
Cu	Copper
NiO	Nickel oxide
Ag	Silver
MgO	Magnesium oxide
Ti_2O	Titanium dioxide
Al_2O_3	Alumina oxide
ND	Nanodiamond
MO	Mineral oil
SDBS	Sodium dodecyl benzene sulphonate
COP	Coefficient of performance
XRD	X-Ray diffraction
FESEM	Field emission scanning electron microscopy
TEM	Transmission electron microscopy

Acknowledgments

No potential conflict of interest was reported by the authors.





REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] A. Shahsavari, P. Jha, M. Arici and P. Estelle, "Experimental investigation of the usability of the rifled serpentine tube to improve energy and energy performances of a nano fluid based photovoltaic thermal system," *Renewable Energy*, vol. 170, pp. 410-425, 2021. doi:<https://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.17>.
- [2] C. Zou, Q. Zhao, G. Zhang and B. Xiong, "Energy revolution: From a fossil energy era to a new energy era," *Natural Gas Industry B*, vol. 3, no. 1, pp. 1-11, 2016.
- [3] X. Cao, X. Dai and J. Liu, "Building energy consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero energy buildings during the past decade," *Energy and Buildings*, vol.128, pp.198-213, 2016.
- [4] Y. Himeur, A. Alsalemi, F. Bensaali and A. Amira, "Robust event-based nonintrusive appliance recognition using multi-scale wavelet packet tree and ensemble bagging tree," *Applied Energy*, vol. 267, no. 114877, 2020.
- [5] Y. Himeur, A. Alsalemi, A. Al-Kababji, F. Bensaali, A. Amira, C. Sardianos and I. Varlamis, "A survey of recommender systems for energy efficiency in buildings: Principles, challenges and prospects," *Information Fusion*, vol. 72, pp.1-21,2021. doi: <https://dx.doi.org/10.1016/j.inffus.2021.02.002>
- [6] M. Akkaya, T. Menlik, A. Sözen and M. Gürü, "The effects of triton X-100 and tween 80 surfactants on the thermal performance of a nanolubricant: An experimental study," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing Green Technology*, vol. 8, pp. 955-967, 2021. doi:<https://dx.doi.org/10.1007/s40684-020-00280-w>.
- [7] M. Akkaya, T. Menlik, A. Sözen and M. Gürü, "Experimental investigation of nanolubricant usage in a cooling system at different nanoparticle concentrations," *Heat Transfer Research*, vol. 51, no. 10, pp. 949-965, 2020. doi:<https://doi.org/10.1615/HeatTransRes.2020033812>
- [8] M. Akkaya, T. Menlik and A. Sözen, "Performance enhancement of a vapor compression cooling system: an application of POE/Al₂O₃," *Journal of Polytechnic*, 2021. <https://dx.doi.org/10.2339/politeknik.679563>
- [9] F. Abbas, H. Ali, M. Shaban, M. Janjua, T. Shah, M.H. Doranehgard and F. Farukh, "Towards convective heat transfer optimization in aluminum tube automotive radiators: Potential assessment of novel Fe₃O₄-TiO₂/water hybrid nanofluid," *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2021. doi: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jtice.2021.02.002>
- [10] I. Tlili, H.A. Nabwey, M.G. Reddy, N. Sandeep, and M. Pasupula, "Effect of resistive heating on incessantly poignant thin needle in magneto hydrodynamic sakiadis hybrid nanofluid," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 12, no. 1, pp. 1025-1032, 2021. doi:<https://dx.doi.org/10.1016/j.jtice.2021.02.002>.
- [11] L. Sundar, S. Mesfin, E.V. Ramana, Z. Said and A.C. Sousa, "Experimental investigation of thermo physical properties, heat transfer, pumping power, entropy generation, and exergy efficiency of nanodiamond+Fe₃O₄/60:40% water-ethylene glycol hybrid nano fluid flow in a tube," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 21, 100799, 2021. doi:<https://dx.doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100799>
- [12] M. Huang, H. Borzoei, A. Abdollahi, Z. Li and A. Karimipour, "Effect of concentration and sedimentation on boiling heat transfer coefficient of GNPs-SiO₂/deionized water hybrid nano fluid: An experimental investigation," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 122, 105141, 2021. doi:<https://dx.doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105141>
- [13] Z. Li, A. Shahsavari, K. Niazi, A.A. Al-Rashed and S. Rostami, "Numerical assessment on the hydro-thermal behavior and irreversibility of MgO-Ag/water hybrid nano fluid flow through a sinusoidal hair-pin heat-exchanger," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 115, 104628, 2020. doi:<https://dx.doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104628>
- [14] W. Urmi, M.M. Rahman and W.A.W. Hamzah, "An experimental investigation on the thermo physical properties of 40% ethylene glycol based TiO₂-Al₂O₃ hybrid nano fluids," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 116, 104663, 2020. doi:<https://dx.doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104663>

- [15] M. Sheikholeslami and D.D. Ganji, "Heat transfer of Cu water nano fluid flow between parallel plates," *Powder Technology*, vol. 235, pp. 873-879, 2013.
doi:<https://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2012.11.030>
- [16] R. Nasrin and S. Parvin, "Investigation of buoyancy-driven flow and heat transfer in a trapezoidal cavity filled with water-Cu nano fluid," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 39, no. 2, pp. 270-274, 2012.
doi:<https://dx.doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2011.11.004>
- [17] M.S. Liu, M.C.C. Lin, C.Y. Tsai and C. Wang, "Enhancement of thermal conductivity with Cu for nano fluids using chemical reduction method," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 49, no. 17-18, pp. 3028-3033, 2006.
doi:<https://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.02.012>
- [18] P. Puspitasari, A. Permanasari, M.S. Shaharun and D.I. Tsamroh, "Heat transfer characteristics of NiO nanofluid in heat exchanger," *AIP Conference Proceedings*, vol. 2228, no. 030023, 2020.
- [19] S. Rostami, E. Raki, A. Abdollahi and A.S. Goldanlou, "Effects of different magnetic fields on the boiling heat transfer coefficient of the NiO/deionized water nanofluid, an experimental investigation," *Powder Technology*, vol. 376, pp. 398-409, 2020.
doi:<https://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2020.08.045>
- [20] K. Muhammad, T. Hayat, A. Alsaedi and B. Ahmad, "Melting heat transfer in squeezing flow of base fluid (water), nano fluid (CNTs+water) and hybrid nano fluid (CNTs+CuO+water)," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 143, pp. 1157-1174, 2020.
doi:<https://dx.doi.org/10.1007/s10973-020-09391-7>.
- [21] M. Ghalambaz, A. Doostani, E. Izadpanahi and A.J. Chamkha, "Conjugate natural convection flow of Ag-MgO/water hybrid nano fluid in a square cavity," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 139, no. 3, pp. 2321-2336, 2020.
- [22] U. Özdemir, B. Özbay, S. Veli and S. Zor, "Modeling adsorption of sodium dodecyl benzene sulfonate (SDBS) onto polyaniline (PANI) by using multi linear regression and artificial neural networks," *Chemical Engineering Journal*, vol. 178, pp. 183-190, 2011.
- [23] F. Palazzesi, M. Calvaresi and F. Zerbetto, "A molecular dynamics investigation of structure and dynamics of SDS and SDBS micelles," *Soft Matter*, vol. 7, no. 19, pp. 9148-9156, 2011.
doi:<https://dx.doi.org/10.1039/C1SM05708A>
- [24] F. Jiang, W.C. Choy, X. Li, D. Zhang, J. Cheng, "Post-treatment-free solution-processed non-stoichiometric NiOx nanoparticles for efficient hole-transport layers of organic optoelectronic devices," *Advances Materials*, vol. 27, no. 18, pp. 2930-2937, 2015.
doi:<https://dx.doi.org/10.1002/adma.201405391>
- [25] J.P. Holman, *Experimental Methods for Engineers*, 7th ed. McGraw-Hill, 2001.
- [26] A.S. Ethiraj, P. Uttam, K. Varunkumar, K.F. Chong and G.A. Ali, "Photocatalytic performance of a novel semiconductor nanocatalyst: Copper doped nickel oxide for phenol degradation," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 242, 122520, 2020.
doi:<https://dx.doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122520>
- [27] G.A. Ali, "Photocatalytic performance of a novel semiconductor nanocatalyst: Copper doped nickel oxide for phenol degradation," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 242, 122520, 2020.
doi:<https://dx.doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122520>
- [28] M. Aliahmad, A. Rahdar and Y. Azizi, "Synthesis of Cu doped NiO nanoparticles by chemical method," *Journal of Nanostructures*, vol. 4, no.2, pp.145-152, 2014.
doi:<https://dx.doi.org/10.7508/JNS.2014.02.003>
- [29] E. Akman, "Enhanced photovoltaic performance and stability of dye-sensitized solar cells by utilizing manganese-doped ZnO photoanode with europium compact layer," *Journal of Molecular Liquids*, vol. 317, 114223, 2020.
doi:<https://dx.doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114223>
- [30] M. Yang, Z. Shi, J. Feng, H. Pu, G. Li, J. Zhou and Q. Zhang, "Copper doped nickel oxide transparent p-type conductive thin films deposited by pulsed plasma deposition," *Thin Solid Films*, vol.519, no.10, pp. 3021-3025, 2011.
doi:<https://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2010.12.009>

- [31] E. Akman, S. Akin, "Poly (N, N'-bis-4-butyl phenyl-N, N'-bisphenyl) benzidine-based interfacial passivation strategy promoting efficiency and operational stability of perovskite solar cells in regular architecture," *Advanced Materials*, vol. 33, no. 2, 2006087, 2021. doi:<https://dx.doi.org/10.1002/adma.202006087>
- [32] E. Akman, S. Akin, T. Ozturk, B. Gulveren and S. Sonmezoglu, "Europium and terbium lanthanide ions co-doping in TiO₂ photoanode to synchronously improve light-harvesting and open-circuit voltage for high-efficiency dye-sensitized solar cells," *Solar Energy*, vol. 202, pp. 227-237, 2020. doi:<https://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2020.03.108>
- [33] T. Ozturk, B. Gulveren, M. Gulen, E. Akman and S. Sonmezoglu, "An insight into titania nanopowders modifying with manganese ions: A promising route for highly efficient and stable photoelectrochemical solar cells," *Solar Energy*, vol. 157, pp. 47-57, 2017. doi:<https://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2017.08.010>
- [34] E. Akman, A.E. Shalan, F. Sadegh and S. Akin, "Moisture-Resistant FAPbI₃ perovskite solar cell with 22.25% power conversion efficiency through pentafluorobenzyl phosphonic acid passivation," *ChemSusChem*, vol. 14, no. 4, pp. 1176-1183, 2021. doi:<https://dx.doi.org/10.1002/cssc.202002707>
- [35] Y.A. Cengel and M.A. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach 6th Edition*, The McGraw-Hill Companies, Inc., New York, 2007.

Derin Kriyojenik İşlemin Kalıntı Gerilme ve Kalıntı Östenit Üzerindeki Etkisinin Araştırılması

Fuat Kara^{*a} , Onur Özbek^b , Nursel Altan Özbek^c , İlyas Uygur^a 

^{a,*} Düzce Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, Düzce, Türkiye

^b Düzce Üniversitesi Gümüşova Meslek Yüksekokulu Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Düzce, Türkiye

^c Düzce Üniversitesi Cumayeri Meslek Yüksekokulu Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Düzce, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 01.05.2021
Kabul: 04.08.2021

Anahtar Kelimeler:

Sleipner,
Kalıntı gerilme,
Kalıntı östenit,
Kriyojenik işlem

ÖZ

Sıfırın altındaki sıcaklıklarda malzemelerin bekletilmesi olarak bilinen kriyojenik işlem, son yıllarda metal ve metal olmayan malzemelerin özelliklerini iyileştirmek için uygulanan bir yöntemdir. Bu yöntem daha çok kalıp yapımında kullanılan takım çelikleri için uygulanmaktadır. Ülkemizde, birçok özel sektör kuruluşu tarafından öncelikle kalıp malzemeleri olmak üzere birçok üründe kriyojenik işlem kullanımı yaygınlaşmaya devam etmektedir. Savunma sanayiinden otomotiv sanayiine kadar birçok sektörde bu işlemin faydaları kabul görmüştür. Bu çalışmada, geleneksel ısıtma işlemi uygulanmış (CHT) ve 24 saat derin kriyojenik işlem uygulanmış (DCT-24) Sleipner soğuk iş takım çeliğinin makro sertlik, mikro sertlik ve mikroyapı özellikleri incelenerek, malzemenin mekanik özellikleri ve mikroyapısındaki değişimler tespit edilmiştir. Bununla birlikte, X-Işını Kırınımı (XRD) Yöntemi ile malzemelerdeki kalıntı gerilme ve kalıntı östenit miktarları ölçülerek, numuneler arasındaki fark belirlenmiştir. CHT ve DCT-24 numunelerinin makro sertliği sırasıyla 60,96 HRC ve 61,46 HRC olarak ölçülmüştür. Mikro sertlik değerleri de sırasıyla 734,26 HV ve 761,83 HV olarak ölçülmüştür. Derin kriyojenik işlem makro ve mikro sertliği sırasıyla 0,5 HRC ve 27,57 HV arttırmıştır. Kalıntı östenit miktarı derin kriyojenik işlemden sonra % 36 oranında düşmüştür. Eksenel ve çevresel kalıntı gerilme değerleri de sırasıyla % 48,84 ve % 36,52 oranında düşmüştür. Sonuç olarak derin kriyojenik işlem Sleipner soğuk iş takım çeliğinin sertliği arttırmış, mikroyapıyı homojenleştirmiş, kalıntı östenit ve kalıntı gerilme değerlerini düşürerek olumlu iyileşmeler sağlamıştır.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.02.07>

Investigation of the Effect of Deep Cryogenic Process on Residual Stress and Residual Austenite

ARTICLE INFO

Received: 01.05.2021
Accepted: 04.08.2021

Keywords:

Sleipner,
Residual stress,
Retained austenite,
Cryogenic treatment

ABSTRACT

The cryogenic treatment, known as holding materials at sub-zero temperatures, is a method used to improve the properties of metal and non-metallic materials in recent years. This method is mainly applied to tool steels used in mold making. In our country, the use of cryogenic processes continues to be widespread by many private sector organizations, primarily in mold materials. The benefits of this process have been recognized in many sectors, from the defense industry to the automotive industry. In this study, the macro hardness, micro hardness and microstructure properties of Sleipner cold work tool steel, which was applied traditional heat treatment and deep cryogenic process for 24 hours, were examined and the changes in the mechanical properties and microstructure of the material were determined. However, by measuring the residual stress and residual austenite amounts in the materials with the X-Ray Diffraction (XRD) Method, the difference between the samples was determined. The macro hardness of the CHT and DCT-24 samples was measured as 60.96 HRC and 61.46 HRC, respectively. Micro hardness values were

*Corresponding author: fuatkara@duzce.edu.tr

To cite this article: F. Kara, O. Özbek, N.A. Özbek and İ. Uygur, "Investigation of the Effect of Deep Cryogenic Process on Residual Stress and Residual Austenite," *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol.7, no.2, pp.143-151, 2021.

doi:<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.02.07>

also measured as 734.26 HV and 761.83 HV, respectively. Deep cryogenic treatment increased macro and microhardness by 0.5 HRC and 27.57 HV, respectively. The amount of residual austenite decreased by 36% after deep cryogenic treatment. Axial and circumferential residual stress values also decreased by 48.84% and 36.52%, respectively. As a result, deep cryogenic treatment increased the hardness of Slepner cold work tool steel, homogenized the microstructure, reduced residual austenite and residual stress values and provided positive improvements.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.02.07>

1. INTRODUCTION (*GİRİŞ*)

Tool steels are widely used in the processing and shaping of many tool materials such as metal, plastic and wood that we see around us. Tool steels corresponding to 8% of total steel production are divided into two as hot work and cold work tool steels. Tool steels with carbon content ranging from 0.3% to 2.5% and containing carbide-forming chromium, vanadium, molybdenum and tungsten as well as nickel and manganese as alloying elements are called cold work tool steels. Cold work tool steels have high initial hardness and this hardness value decreases rapidly when the working temperature exceeds 200 °C. For this reason, these steels are used for machining and non-chip forming processes of workpieces operating at temperatures of about 200 °C and below [1, 2]. Slepner cold work tool steel is widely used in blanking and fine blanking, shearing, forming, coining, cold forging, cold extrusion, thread rolling, drawing and deep drawing, powder pressing molds where high wear resistance, high chipping resistance and high compressive strength are required. It is also very good steel for any type of surface treatment. They have good wear resistance, good chipping resistance, good hardness (> 63 HRC) after high temperature tempering, good dimensional stability in heat treatment, good machinability and grindability, and good surface treatment properties. These steels are widely used in precision cutting, cutting and forming, sintering and cold work applications.

In general, heat treatment is defined as controlled heating and cooling processes applied to steel to impart desired properties. Heat treatments applied to the steel are related to the transformation of its microstructure. The compositions and structures of the products the conversion affect the mechanical properties of the steel directly. Numerous thermal methods have been developed. The use of these methods depends on the type of steel and the expected properties such as hardness, strength, toughness, abrasion resistance [3, 4]. In recent years, cryogenic process, which is a complementary process to heat treatment, has emerged especially to improve the mechanical properties of tool steels. Cryogenic process is known as the process of keeping materials

in liquid or gas environment in nitrogen up to -196°C [5-7]. This method is of great importance in terms of sustainable manufacturing since it does not have any negative impact on the environment. It has been subject to a lot of work due to its superior properties such as hardness increase, high wear, fatigue and impact resistance, homogeneous microstructure, low residual austenite ratio, low residual stress, high tensile strength, high dimensional accuracy [5, 6, 8-13]. Demir and Toktaş investigated the effect of deep cryogenic treatment on the microstructure, hardness, residual austenite and residual stresses of AISI D2 steel. Results showed that cryogenic treatment reduced the residual surface stresses in comparison to the conventional heat treatment. There was no significant difference in hardness values and retained austenite contents. However, more dense and homogeneous carbide precipitation was observed mainly for the cryo-treated sample for 24 h [8]. Yan and Li investigated the effect of subzero processing conditions on wear resistance, mechanical behavior and microstructure of W9Mo3Cr4V high speed steel. The samples were cryogenically treated at different holding temperatures (-80 °C, -120 °C, -160 °C and -196 °C). Hardness and wear resistance increased and microstructure improved after cryogenic treatment for all samples. The increase in wear resistance and hardness has been attributed to the conversion of residual austenite to martensite and secondary carbide precipitation by cryogenic treatment [14]. Altan Özbek et al. investigated the effects of cryogenic treatment on the mechanical properties of AISI H11 hot work tool steel. In the study, it was determined that deep cryogenic treatment greatly reduced the residual austenite phase. It has been reported that an increase in the hardness and wear resistance of the material is achieved with the cryogenic treatment [15].

When the studies in the literature are examined, it is seen that the cryogenic process is applied on many materials and positive results are obtained. However, there are no studies investigating the effects of cryogenic treatment on the mechanical properties and residual stress of Slepner cold work tool steel. In this study, macro hardness, micro hardness and microstructural properties of Slepner cold work tool steel, which was subjected to deep cryogenic

treatment in a 24-hour holding period, were examined and the changes in the mechanical properties and microstructure of the material were investigated. However, the residual stress and residual austenite amounts in the materials were measured by the X-Ray Diffraction (XRD) Method.

2. MATERIAL AND METHOD (MATERİYAL VE METOT)

In this study, Sleipner cold work tool steel patented by UDDEHOLM Company was used. Uddeholm Sleipner is a high alloyed tool steel with a very specific profile. Chemical components of Sleipner cold work tool steel are given in Table 1.

The application of deep cryogenic process to the test samples was carried out with the MMD Criyo 125 brand cryogenic process device in Duzce University Mechanical Engineering Department. The image of the device in Figure 1, the specifications are given in Table 3.

Test samples will be divided into two groups in the study. The samples in the first group were subjected to conventional heat treatment to 60-62 HRC hardness. The samples in the second group were subjected to deep cryogenic treatment (24 hours at -180 °C) and then tempering process (2 hours at 200 °C) after conventional heat treatment. Classification of test samples and heat treatments to be applied are given in Table 2.

To determine the effects of deep cryogenic process on the hardness of Sleipner steel, macro hardness and micro hardness measurements were carried out. In macro and micro hardness measurements, the measurement result reflects the average of at least 10 hardness measurements. Macro hardness measurements were carried out using Time TH 300 macro hardness device and Rockwell C (HRC) hardness measurement method. Micro hardness measurements were carried out with DUROLINE-M brand micro hardness device by applying a 1000 g load for 30 seconds with a diamond pyramid tip.

Table 1. Chemical components of Sleipner steel (%) (Sleipner çeliğinin kimyasal bileşimi (%))

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
0.90	0.90	0.50	7.8	2.5	0.50



Figure 1. Cryogenic process device (Kriyojenik işlem cihazı)

Table 2. Application of traditional heat treatment and deep cryogenic process (Geleneksel ısı işlem ve derin kriyojenik işlem uygulaması)

Sample Group	Sample Name	Heat Treatment to be Applied
1	CHT	Conventional heat treatment
2	DCT-24	Conventional heat treatment Deep cryogenic process (24 hours) Tempering process

Table 3. Technical specifications of the cryogenic process device (*Kriyojenik işlem cihazının teknik özellikleri*)

Internal dimensions	60cm L x 50cm W x 50cm D
Inner Chamber	304 stainless steels
Insulation	15cm multilayer insulation
Capacity	<100kg
Control	Programmable PLC control with touch screen
Temperature sensor	PT100
LN2 source	Can be used with medium or high pressure liquid nitrogen containers
LN2 Transfer Connection	180cm flexible, insulated cryogenic liquid transfer hose
LN2 Dosing	Solenoid valve
Process temperature	< -190 °C
Temperature distribution	± 2 °C
Cooling-Heating Speed	≥ 10 °C / min (depending on the material loading capacity)

Samples of 10 mm diameter and height were prepared to be used in microstructural studies. These samples were sanded with 120, 240, 600, 800 and 1200 grit SiC abrasives, respectively, after conventional heat treatment and deep cryogenic treatment. It was then etched with Nital solution and examined under an optical microscope.

Residual stresses in both circumferential and axial directions formed after heat treatment and deep cryogenic treatment in Slepner cold work tool steel samples were measured by X-Ray diffraction technique using the $\sin^2\Psi$ method. Residual austenite and residual stress measurements were performed on the SEIFERT Analytical X-ray MZ VI brand X-ray diffraction device.

3. RESULTS AND DISCUSSION (*SONUÇLAR VE TARTIŞMA*)

There are four main metallurgical cases that are claimed to explain the changes in the properties of materials that are cryogenically treated. These; transformation of residual austenite to martensite, the formation of eta carbides, the precipitation of fine carbides and a homogeneous microstructure [16, 17]. One of these situations, the transformation of residual austenite to martensite plays an important role on the mechanical properties of materials. The combination of soft residual austenite and hard martensite in the structure of steel is absolutely undesirable. Because the residual austenite in the structure negatively affects all the mechanical properties of the steel, especially the hardness. In addition, the presence of residual austenite decreases residual stresses, thus reducing fatigue resistance [18]. Therefore, the transformation of residual austenite to martensite is required. This transformation can be accomplished by the cryogenic process in which almost all of the residual austenite

is converted to martensite or by tempering process where martensite transformation is achieved at a lower rate [5, 15]. Figure 2 shows the change in the residual austenite volume ratios of the CHT and DCT-24 samples.

As seen in Figure 2, the residual austenite volume ratio of the conventional heat treated DCT sample was measured as 2.5%. The residual austenite volume ratio of DCT-24 sample, which was applied deep cryogenic treatment for 24 hours, was found to be 1.6%. After deep cryogenic processing, the residual austenite volume ratio decreased by 36%. This result once again demonstrated that the deep cryogenic process significantly improved the residual austenite content. In studies in the literature, it has been repeated many times that the deep cryogenic process reduces the residual austenite volume ratio [19-21]. In the study conducted by Das et al. in 2007, it was stated that the residual austenite volume ratio of AISI D2 cold work tool steel decreased from 9.8% to below 2% after deep cryogenic processing. This positive improvement was attributed to the Mf (Martensite finish) temperature of AISI D2 steel below room temperature [22]. In another study, it was emphasized that 30-40% decreases were detected in the residual austenite volume ratio after the cryogenic process applied to tool steel. This result was associated with the increase in the residual austenite content in the microstructure after quenching and the decrease in the Ms (Martensite starting) temperature [23].

Residual stresses are defined as the stresses remaining in the part because various manufacturing methods, heat treatment processes or application of non-homogeneous deformation to the materials. Since it remains in the material after the production of the part, the loads and forces to be applied

externally during operation affect the workpiece together with these stresses [5]. Therefore, residual or residual stresses directly affect the working life of the produced parts [24]. Residual stresses are classified into two types as compression and tension. Compressive stress delays crack initiation and crack growth. This delay makes residual compressive

stresses very important, especially on fatigue life and corrosion resistance. On the contrary, the tensile residual stress decreases the mechanical performance of the materials, so it is not a very desirable situation for materials [5, 25]. In Figure 3, the residual stress values in axial and circumferential directions of the CHT and DCT-24 samples were given.

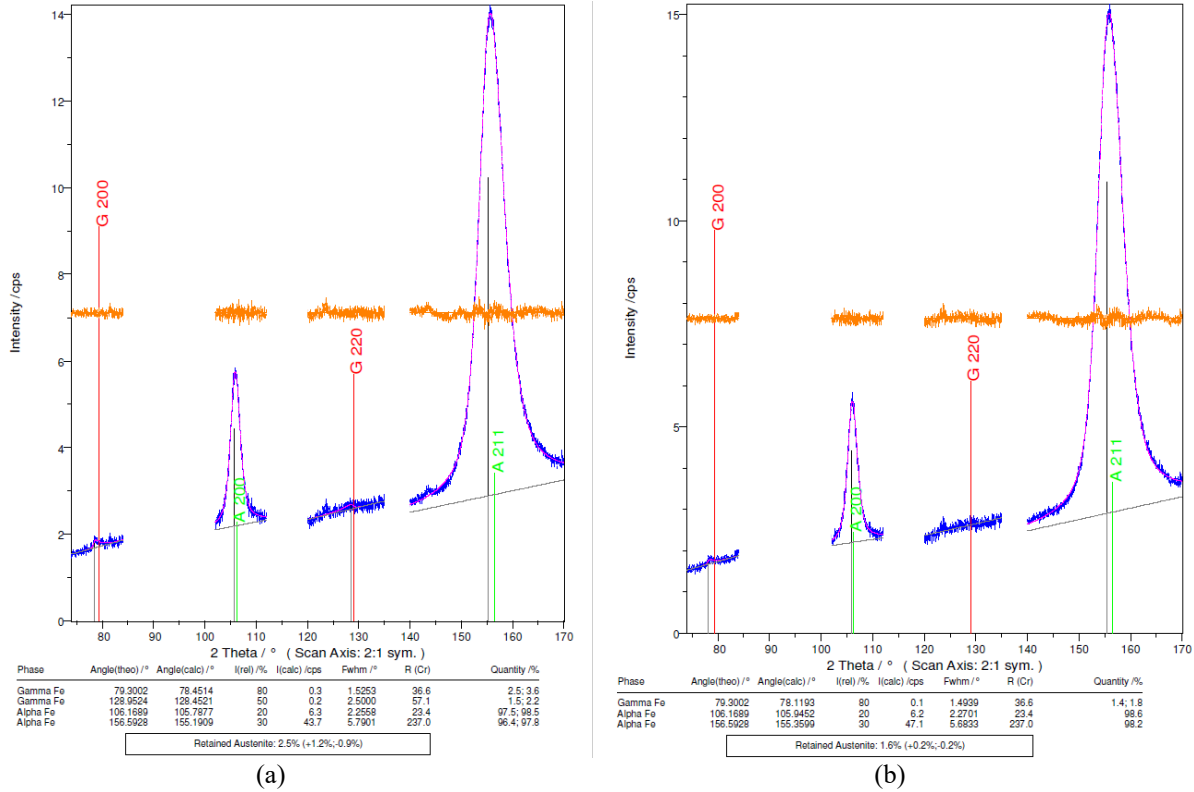


Figure 2. Residual austenite volume ratio changes of samples (a) CHT and (b) DCT-24 (Numunelerin kalıntı östenit hacim oranlarının değişimi (a) CHT ve (b) DCT-24)

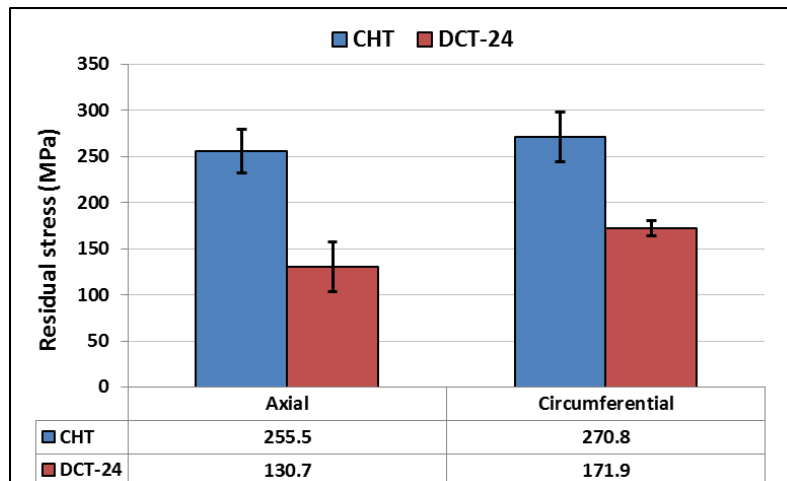


Figure 3. Residual stress changes of CHT and DCT-24 samples (CHT ve DCT-24 numunelerinin kalıntı gerilmelerindeki değişim)

While the axial residual stress value of the CHT sample was 255.5 MPa, the axial residual stress value of the DCT-24 sample was measured as 130.7

MPa. Deep cryogenic process reduced the axial residual stress value to 124.8 MPa, resulting in an improvement of 48.84%. It was found to be 270.8

MPa and 171.9 MPa for the CHT and DCT-24 samples, respectively. Deep cryogenic process has been positively effective in environmental residual stress values as well as in axial stresses. After the deep cryogenic process, environmental residual stress values decreased by 98.9 MPa, an improvement of 36.52% was obtained.

Microstructure images were taken under metal microscope in order to determine the changes in

microstructure caused by deep cryogenic process applied to Sleiþner cold work tool steel with 24 hour holding time compared to conventional heat treated tool steel. The purpose of this analysis is to explain the improvements in mechanical properties after deep cryogenic processing. Figure 4 shows the microstructure images of the CHT and DCT-24 samples.

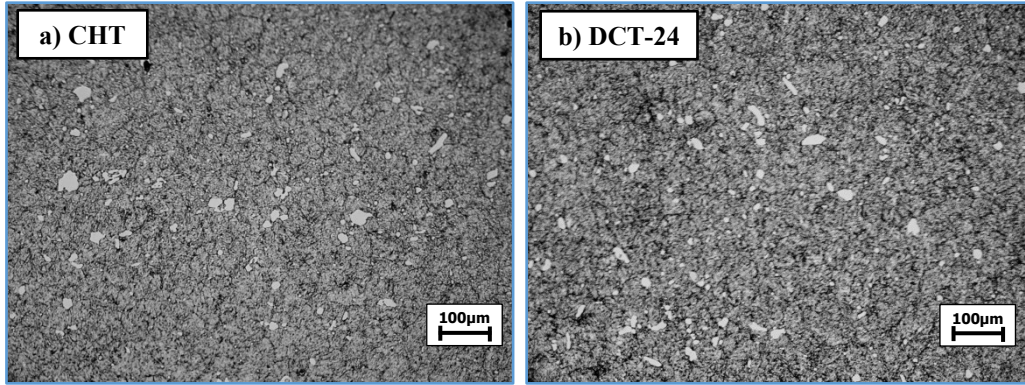


Figure 4. Microstructural images of (a) CHT, (b) DCT-24 samples
(Mikroyapı fotoğrafları (a) CHT, (b) DCT-24 numuneleri)

In Figure 4, while the CHT sample showed an inhomogeneous carbide distribution, the DCT-24 sample showed a more homogeneous carbide distribution than the CHT sample. However, after 24 hours of cryogenic treatment and subsequent tempering, it is seen that the carbide sizes in the microstructure of the samples decrease and a more uniform carbide distribution is realized.

Figure 5 shows the macro hardness values of the CHT and DCT-24 samples. The average macro hardness of the CHT and DCT-24 samples was measured as 60.96 HRC and 61.46 HRC, respectively. It was observed that the macro hardness value increased by 0.5 HRC after 24 hours of deep cryogenic treatment applied to Sleiþner cold work tool steel. This increase in macro hardness was attributed to the formation of a more brittle structure as a result of the transformation of the austenite phase, which has a soft structure in the internal structure of Sleiþner cold work tool steel, into the martensite phase with a hard structure, together with the deep cryogenic process [5, 26].

Figure 6 shows the micro hardness values of conventional heat treated CHT and 24 hours deep

cryogenic DCT-24 samples. The average micro hardness of the CHT and DCT-24 samples were measured as 734.26 HV and 761.83 HV, respectively. It was observed that the macro hardness value increased by 27.57 HV after 24 hours of deep cryogenic treatment applied to Sleiþner cold work tool steel. As with macro hardness, this improvement in micro hardness has been associated with the formation of a more brittle structure as a result of the transformation of the austenite phase, which has a soft structure in the internal structure of Sleiþner cold work tool steel, into the martensite phase with a hard structure with deep cryogenic process [27].

If a general evaluation is made for all output parameters, it is seen that the cryogenic process increases the macro and micro hardness, decreases the residual austenite volume ratio, makes the microstructure more homogeneous and reduces the residual stresses on the surface of the material. These improvements obtained in the literature studies have been renewed once again with this study. In addition, it has been shown that the mechanical and metallurgical properties of Sleiþner cold work tool steel have improved after deep cryogenic processing, as is the case with many tool steels.

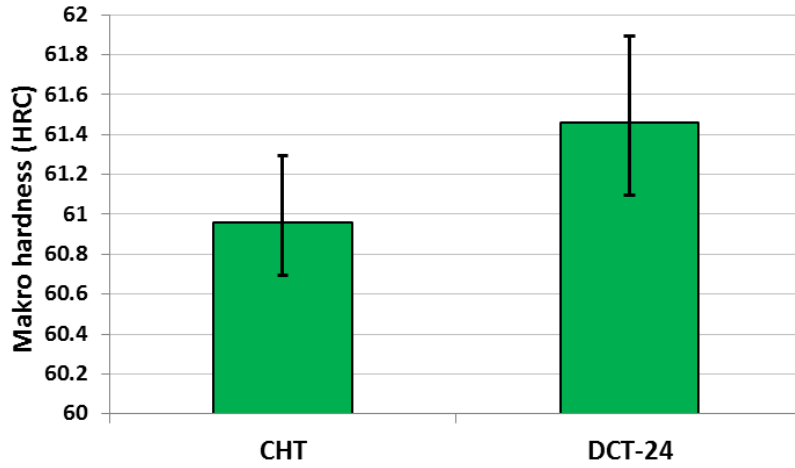


Figure 5. Macro hardness changes of CHT and DCT-24 samples (*CHT ve DCT-24 numunelerin makro sertliklerindeki değişim*)

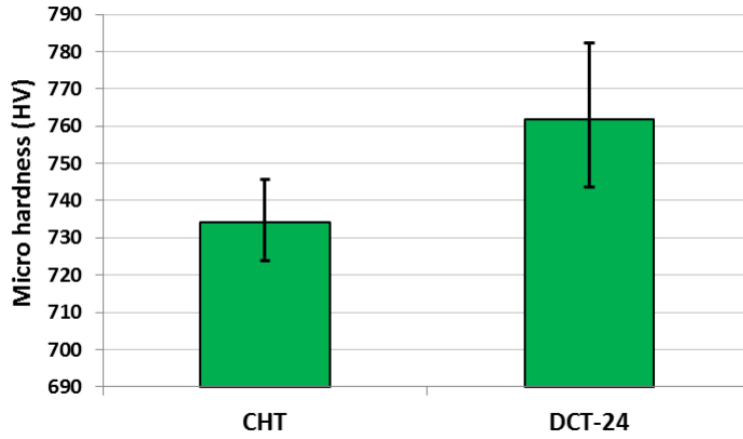


Figure 6. Micro hardness changes of CHT and DCT-24 samples (*CHT ve DCT-24 numunelerin mikro sertliklerindeki değişim*)

4. CONCLUSIONS (*SONUÇLAR*)

In this study, the effects of deep cryogenic process (-180 °C) applied for 24 hours on the microstructure, residual austenite volume ratio, residual stress values and mechanical properties of Sleipner cold work tool steel were investigated. At the end of this study, the following results were obtained.

- While the residual austenite volume ratio of the CHT sample was 2.5%, this ratio dropped to 1.6% in the DCT-24 sample after deep cryogenic processing. After deep cryogenic processing, the residual austenite volume ratio decreased in accordance with the studies in the literature.
- Residual stress values also decreased negatively after deep cryogenic processing.
- After conventional heat treatment, the hardness of 60.96 HRC increased to 61.46 HRC with 24 hours of deep cryogenic process and subsequent tempering.
- While the macro hardness of the CHT sample was 734.26 HV, the hardness of the DCT-24 sample was determined as 761.83 HV. Deep cryogenic processing resulted in an increase in microhardness of about 30 HV.
- Deep cryogenic process according to microstructure analysis made the inner structure of Sleipner cold work tool steel more homogeneous.

As a result, after Sleipner cold work tool steel was subjected to a 24-hour deep cryogenic process and subsequent tempering, it gained improvements in its mechanical and metallurgical properties.

ACKNOWLEDGEMENT (TEŞEKKÜR)

This study was supported by Düzce University Scientific Research Projects (DÜBAP) Coordinator with the project number 2017.07.04.662. We thank the institution for their support.

CONFLICT OF INTEREST STATEMENT (ÇIKAR ÇATIŞMASI BİLDİRİMİ)

No potential conflict of interest was reported by the authors.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] M.A.S. Bin Abdul Rahim, M.B. Minhat, N.I.S. Hussein, M.S.B. Salleh, “A comprehensive review on cold work of AISI D2 tool steel,” *Metallurgical Research and Technology*, vol. 115, pp. 104-116, 2018. doi:https://dx.doi.org/10.1051/metal/2017048.
- [2] O. Özbek and H. Saruhan, “The effect of vibration and cutting zone temperature on surface roughness and tool wear in eco-friendly MQL turning of AISI D2,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 3, pp. 2762-2772, 2020.
- [3] W.D. Jr. Callister and D.G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering*, Eight Edition, Asia: John Wiley & Sons, 2015.
- [4] N.A. Özbek and E. Saraç, “Effects of tempering heat treatment temperatures on mechanical properties of carbon steels,” *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol.7, no.1, pp. 17-25, 2021. doi:https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.01.03
- [5] F. Kara, “Investigation of the effects of cryogenic treatment parameters on fatigue life and grindability of AISI 52100 steel,” Karabük University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Karabük, 2014.
- [6] F. Kara, M. Karabatak, MAyyıldız and E. Nas, “Effect of machinability, microstructure and hardness of deep cryogenic treatment in hard turning of AISI D2 steel with ceramic cutting” *Journal of Materials Research and Technology* vol. 9 no. 1, pp. 969-983,2020. doi:https://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.11.037
- [7] N.A. Özbek, A. Cicek, M. Gülesin, O. Özbek, “Application of deep cryogenic treatment to uncoated tungsten carbide inserts in the turning of AISI 304 stainless steel” *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 47, no. 12, pp. 6270-6280, 2016.
- [8] H. Zhang, X. Yan, Q. Hou and Z. Chen, “Effect of cyclic cryogenic treatment on wear resistance, impact toughness, and microstructure of 42CrMo steel and its optimization,” *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2021, pp. 1-13, 2021. doi: https://dx.doi.org/10.1155/2021/8870282
- [9] E. Demir and I. Toktas, “Effects of cryogenic treatment on residual stresses of AISI D2 tool steel,” *Kovove Materialy*, vol. 56, pp. 153-161, 2018. doi:https://dx.doi.org/10.4149/km20183153
- [10] E. Nas and N. Altan Özbek, “Optimization of the machining parameters in turning of hardened hot work tool steel using cryogenically treated tools,” *Surface Review and Letters*, vol. 27, no. 05, pp.1-13,2020. doi:https://dx.doi.org/10.1142/S0218625X19501774
- [11] F. Kara and A. Takmaz, “Optimization by the Taguchi method of effect on the surface roughness of cryogenic treatment applied to cutting tools,” *Material Testing*, vol. 61, no. 11, pp. 1101-1104,2019. doi:https://dx.doi.org/10.3139/120.111427.
- [12] N. A. Özbek, “Investigation of the effects of cryogenic treatment applied on coated tungsten carbide tools on machinability of AISI H11 steel,” *Düzce University Journal of Science and Technology*, vol. 8, no. 2, pp. 1650-1660,2020. doi:https://dx.doi.org/10.29130/dubited.679129.
- [13] N. A. Özbek, “Effects of cryogenic treatment types on the performance of coated tungsten tools in the turning of AISI H11 steel” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 4, pp. 9442-9456, 2020. doi:https://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.03.038
- [14] X. G. Yan and D. Y. Li, “Effects of the sub-zero treatment condition on microstructure, mechanical behavior and wear resistance of W9Mo3Cr4V high speed steel,” *Wear*, vol. 302, no. 1-2, pp. 854-862, 2013. doi: https://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2012.12.037.
- [15] N. A. Özbek, O. Özbek, F. Kara, “Investigation of the Effects of Cryogenic Treatment on AISI H11 Steel” in *IMASCON 2018, Kocaeli, Turkey, November 23-25, 2018*, pp. 1945-1951.

- [16] P. I. Patil and R. G. Tated, "Comparison of effects of cryogenic treatment on different types of steels: A review," *International Journal of Computer Applications*, vol. 9, pp. 10-29, 2012.
- [17] N.A. Özbek, A. Cicek, M. Gülesin, O. Özbek, "Investigation of the effects of cryogenic treatment applied at different holding times to cemented carbide inserts on tool wear," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 86, pp. 34-43, 2014.
- [18] S. Bensely, D. Venkatesh, G.M. Lal, A. Nagara, A. Rajadurai, K. Junik, "Effect of cryogenic treatment on distribution of residual stress in case carburized EN 353 steel" *Materials Science and Engineering: A*, vol. 479, no. 1-2, pp. 229-235, 2008. doi:<https://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2007.07.035>
- [19] F. J. De Silva, S. D. Franco, A. R. Machado, E. O. Ezugwu and A. M. Souza Jr, "Performance of cryogenically treated HSS tools" *Wear*, vol. 261, no. 5-6, pp. 674-685, 2006. doi:<https://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2006.01.017>
- [20] V. Leskovsek and B. Podgornik, "Vacuum heat treatment, deep cryogenic treatment and simultaneous pulse plasma nitriding and tempering of P/M S390MC steel," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 531, pp. 119-129, 2012. doi:<https://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2011.10.044>
- [21] T. Vignesh Kumar, R. Thirumurugan and B. Viswanath, "Influence of cryogenic treatment on the metallurgy of ferrous alloys: A review," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 32, no. 16, pp. 1789-1805, 2017. doi:<https://dx.doi.org/10.1080/10426914.2017.131779>
- [22] D. Das, A. K. Dutta, V. Toppo and K. K. Ray, "The Effect of cryogenic treatment on the carbide precipitation and tribological behavior of D2 steel," *Material and Manufacturing Processes*, vol. 22, no. 4, pp. 474-480, 2007. doi:<https://dx.doi.org/10.1080/10426910701235934>
- [22] H. S. Yang, J. Wang, B. Shen, H. H. Liu, S. J. Gao and S. J. Huang, "Effect of cryogenic treatment on the matrix structure and abrasion resistance of white cast iron subjected to destabilization treatment," *Wear*, vol. 261, no. 10, pp. 1150-1154, 2006. doi:<https://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2006.03.021>
- [23] Z. Weng, X. Liu, K. Gu, J. Guo, C. Cui and J. Wang, "Modification of residual stress and microstructure in aluminium alloy by cryogenic treatment," *Materials Science and Technology*, vol. 36, no. 14, pp. 1547-1555, 2020. doi:<https://dx.doi.org/10.1080/02670836.2020.1800182>
- [24] M. Bicek, F. Dumont, C. Courbon, F. Pusaveca, J. Rech and J. Kopac, "Cryogenic machining as an alternative turning process of normalized and hardened AISI 52100 bearing steel," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 212, no. 12, pp. 2609-2618, 2012. doi:<https://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.07.022>
- [25] J. Yi, W.J. Xue, Z.P. Xie, W. Liu, L.X. Cheng, J. Chen, H. Cheng and Y.X. Gao, "Enhanced toughness and hardness at cryogenic temperatures of sil-iron carbide sintered by SPS," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 569, pp. 13-17, 2013. doi:<https://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2013.01.053>
- [26] A. Akhbarizadeh and S. Javadpour, "Investigating the effect of as-quenched vacancies in the final microstructure of 1.2080 tool steel during the deep cryogenic heat treatment," *Materials Letters*, vol. 93, pp. 247-250, 2013. doi:<https://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2012.11.081>

Karbon Elyaf Takviyeli Kompozitlerin İstifli Delinmesinde Delik Çıkış Hasarının Deneysel Araştırılması

Elif Özge KIRHASANOĞLU^{a,*}, Yakup TURGUT^{b,}

^{a,*} Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye

^b Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 31.05.2021
Kabul: 03.08.2021

Anahtar Kelimeler:
Karbon fiber takviyeli
kompozit malzeme,
Delik delme,
Delik çıkış hasarı

ÖZET

Bu çalışmada, karbon elyaf takviyeli polimer kompozitlerin (KETPK) istifli delinmesinde delik çıkış hasarı; matkap uç açısı, matkap helis açısı, kesme hızı ve ilerleme miktarına bağlı olarak deneysel araştırılmıştır. Çalışmada, KETPK malzeme Al 6013 malzeme ile alt-üst istifli olarak 90° ve 118° uç açısına ile 15° ve 22.5° helis açısına sahip kaplamasız HSS matkaplarla delinmiştir. Delme işleminde 0.05-0.1-0.2 mm/dev ilerleme miktarı ve 45, 67, 100 m/dak kesme hızı değerleri kullanılmıştır. Delik delme işlemleri sonucunda belirtilen şartlarda delik çıkış hasarları (delaminasyonları) araştırılmıştır. Deneyler sonucunda, kesme hızının artması ile delaminasyon oranının azaldığı aynı zamanda ilerleme miktarının artması ile delaminasyon oranının arttığı görülmüştür. Bununla beraber kesme hızının artması ile metal talaş yapışması/sıvanması eğiliminin azaldığı, bunun da delaminasyon oranında azalma sağladığı görülmüştür. Çalışma ile 118° uç açılı ve 22.5° helis açılı matkaplarla en yüksek kesme hızı 100 m/dak'da ve en düşük ilerleme miktarı olan 0.05 mm/dev'de en düşük delaminasyon oranı elde edilmiştir.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.02.08>

Experimental Investigation of Hole Exit Damage in Stacked Drilling of Carbon Fiber Reinforced Composites

ARTICLE INFO

Received: 31.05.2021
Accepted: 03.08.2021

Keywords:
Carbon fiber
reinforced
composite material,
Drilling,
Hole exit damage

ABSTRACT

In this study, the stack drilling of carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) composites was experimentally investigated in terms of exit damage, point angle, helix angle, cutting speed, and feed rate. During the experiments, the stacks consist of CFRP composite material and Al 6013 drilled with uncoated HSS drills. The drills had 90° and 118° point angles, 15° and 22.5° helix angles. The drilling experiments were performed with three different feed rates (0.05-0.1-0.2 mm/rev) and three different cutting speeds (45, 67, 100 m/min). The hole exit damages (delaminations) were investigated according to the drilling results. As a result of the experimental study, increasing cutting speed decreases the delamination ratio. Increasing feed rate increases the delamination ratio. Moreover, increasing cutting speed decreases the tendency of built-up edge. It is observed that this behavior assists the decreasing delamination ratio. In this study, the lowest delamination ratio was acquired at the highest cutting speed (100 m/min) and the lowest feed rate (0.05 mm/rev) with the drill which had 118° point angle and 22.5° helix angle.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.02.08>

*Corresponding author: yturgut@gazi.edu.tr

To cite this article: E.Ö. Kırhasanoğlu and Y. Turgut, "Experimental Investigation of Hole Exit Damage in Stacked Drilling of Carbon Fiber Reinforced Composites", *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol.7, no.2, pp. 152-159, 2021.
[doi:https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.02.08](https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.02.08)

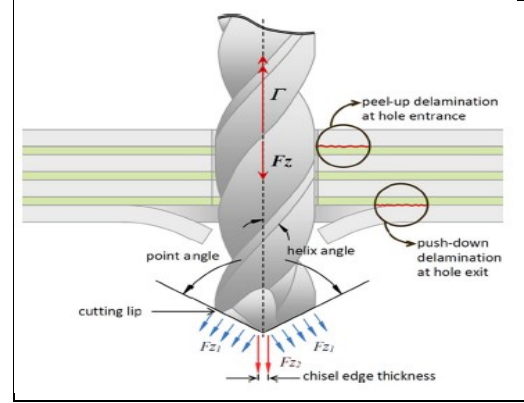
1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Malzemeler genel olarak metal ve metal olmayan malzemeler olmak üzere iki ana gruba ayrılırlar. Bu gruplar birbirlerine göre kendilerini üstün kılan farklı özellikler taşırlar. Metal ve metal olmayan malzemelerin yanında aynı ya da farklı gruplardan iki veya daha fazla malzemenin en iyi özelliklerini makro düzeyde bir araya getirilerek elde edilen malzemeler de kompozit (karma) malzemeler olarak adlandırılır. Kompozit malzemeler asırlardır pek çok farklı uygulamalarda kullanılmaktadır. İlk kullanım tarihleri kesin olarak bilinmemekle beraber en eski uygulamalara Mısırlılar, İnkâ ve Maya medeniyetlerinde rastlanmıştır. Bu malzemelerin geliştirilmesi ise 1940'lı yıllarda II. Dünya Savaşı ile olmuştur [1].

Kompozit malzemeler yapılarını oluşturan malzemelerin en iyi özelliklerini bünyesinde taşırlar. Kompozit malzemeler üretilirken mukavemet, yorulma dayanımı, aşınma dayanımı, korozyon dayanımı, kırılma tokluğu, yüksek sıcaklık özellikleri, ısı iletkenlik, elektrik iletkenliği, akustik iletkenlik, rijitlik, hafiflik, fiyat ve estetik görünüm gibi özelliklerin geliştirilmesi hedeflenmiştir [2].

Elyaf takviyeli polimer kompozitler (ETPK) yüksek mukavemet, hafiflik, korozyona karşı yüksek direnç, sönümleme, yüksek dayanım gibi üstün mühendislik özelliklerine sahiptirler. Bu özelliklerinde dolayı ETPK malzemeler uzay, havacılık, savunma sanayisinde, inşaat ve yapı sektöründe, otomotiv ve denizcilik sektöründe, gıda ve tarım sektörlerinde, spor malzemeleri üretimi gibi birçok uygulamada yoğunlukla tercih edilmektedirler [3-7]. Karbon elyaf takviyeli karbon matrisli kompozit malzemeler ise yüksek ısı direncinin gerektiği alanlarda tercih edilmektedir [8]. Elyaf takviyeli kompozit malzemeler, birbirleri arasında cıvata ve perçinli birleştirmelerin yapılabilmesi için delme operasyonlarına tabi tutulmaktadır. Ancak, homojen olmayan yapılarından dolayı delme işlemi esnasında, delaminasyon, elyaf kopması, elyaf-matris arayüz ve termal hasar, yüzey tamlığının bozulması gibi olumsuz durumlar meydana gelmektedir [9-11].

Uygun olmayan parametre seçimi, Şekil 1'de görüldüğü gibi delik yüzeyinde termal hasar, laminattan bir matkap ucu çıktığında aşağıya doğru delaminasyon ve elyaf kopması gibi istenmeyen durumlara sebep olmaktadır. Bu kusurlar üzerinde delaminasyon, en önemli etkiye sahiptir.



Şekil 1. Kompozit malzemede delme esnasındaki delaminasyon (Delamination during drilling in composite material) [12]

Delaminasyon, havacılık ve uzay endüstrisinde parçaların son montajlarının yapılması esnasında ölçüsel hatalara ve mekanik özelliklerin azalmasına sebep olmaktadır. Bu sebeplerle, delaminasyon oluşumunun azaltılması için kesme parametrelerinin yanı sıra matkap geometrisinin optimum bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Birçok çalışmada delaminasyon, optik tarama ve dijital görüntü alma işlemleri ile belirlendiği gözlenmektedir. Genellikle delaminasyon oranı, delme esnasında kompozit malzeme üzerinde oluşan maksimum hasar çapının matkap çapına oranlanması ile hesaplanmaktadır [13].

Delik delme, talaşlı imalat yöntemlerinden en sık kullanılan ve uzun zaman alan işlemdir. Genellikle delik delme işlemi son işlem adıdır. Bu nedenle yapılacak en ufak bir hata malzemenin hurdaya çıkmasına veya maliyetin artmasına neden olacaktır. Tüm delik delme işlemleri baz alındığında diğer operasyonlar içinde %36 oranla tek başına en çok gerçekleştirilen işlemdir [14,15].

Literatürde ETPK malzemelerin delinmesi üzerine çalışmaların olduğu görülmüştür. Bu çalışmaların çoğu matkap veya kesici geometrileri üzerine olduğu görülmüştür. Durao ve ark., beş farklı matkap geometrisinin (twist 120°, twist 85°, Brad, Dagger and Step) ilerleme kuvveti ve delaminasyon üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Twist 120° matkap ile delaminasyonun minimize edilebildiği ve ilerleme kuvvetinin Dagger ve Step matkaplarda diğer matkaplara göre daha az olduğunu belirtmişlerdir [16]. Abrao ve ark., CETPK'nin delinmesinde kullanılan "Brad&Spur", matkapların delik yüzey kalitesi ve mekanik yükler açısından iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir [17]. Davim ve Reis, KETP kompozitin delinmesinde, deney tasarımı tekniğini kullanarak kesme parametreleri ile

kesme gücü, kesme basıncı ve delaminasyon arasındaki korelasyonu araştırmışlardır [18]. Heisel ve Pfeifroth, farklı uç açılarına (155°-175°-185°-185°/178°) sahip sementit karbür matkaplar ile KETPK'nın delinmesinde, matkap uç açısının artması ile delik girişinde yüzey kalitesinin daha iyi olduğu, ancak delik çıkışında ise delaminasyonun arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca, 155° uç açılı matkapta kesme hızının artması ile ilerleme kuvveti arttığı, ancak delik yüzey kalitesinin etkilenmediğini ifade etmişlerdir [19].

Bu çalışmada ise, karbon elyaf takviyeli polimer kompozitlerin (KETPK) Al ile istifli (Al/KETPK/Al) delinmesinde delik çıkış delaminasyonu, literatür araştırmaları doğrultusunda belirlenen optimum parametrelerle; 2 farklı matkap uç açısı, 2 farklı matkap helis açısı, 3 farklı kesme hızı ve 3 farklı ilerleme miktarına bağlı olarak deneysel araştırılmıştır. Deneyler sonucunda, kesme hızının artması ile delaminasyon oranının azaldığı aynı

zamanda ilerleme miktarının artması ile delaminasyon oranının arttığı görülmüştür. En düşük delaminasyon 118° uç açısı, 22.5° helis açısına sahip matkaplarla en yüksek kesme hızı 100 m/dak'da ve en düşük ilerleme miktarı olan 0.05 mm/dev'de elde edilmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Bu çalışmada, KETPK malzeme Al 6013-T651 malzeme ile alt-üst istifli olarak 90° ve 118° uç açısına ve 15° ve 22,5° helis açısına sahip kaplamasız taşlanmış HSS matkaplar kullanılmıştır. Delme işleminde 0.05-0.1-0.2 mm/dev ilerleme miktarı ve 45, 67, 100 m/dak kesme hızı değerleri kullanılmıştır. Delik delme işlemleri sonucunda belirtilen şartlarda delik çıkış delaminasyonları araştırılmıştır. Tablo 1'de deneylerde kullanılan parametre tablosu verilmiştir.

Tablo 1. Deneylerde kullanılan kesme parametreleri (*Cutting parameters used in experiments*)

Tezgah	Johnfordh VMC 550 Fanuc		
Matkaplar (Ø7)	Taşlanmış kaplamasız HSS	90° Uç açısı	15° Helis açısı
			22.5° Helis açısı
	118° Uç açısı		15° Helis açısı
			22.5° Helis açısı
Deney malzemesi	Karbon elyaf takviyeli polimer kompozit Al 6013-T651 (istif malzemesi)		
Kesme parametreleri	Kesme hızı (m/dak)	45, 67, 100	
	İlerleme miktarı (mm/dev)	0.05-0.1-0.2	
Delik sayısı	Kesme parametreleri ve matkap kombinasyonları için toplam 36 adet		

Deneylerde kullanılan KETPK malzeme, 0°/45°/90°/45°/-45°/90°/45°/0° dizilimine sahip, 80x52x10 mm boyutlarında lamine olarak tasarlanmıştır. ASTM D 792'ye göre KETPK

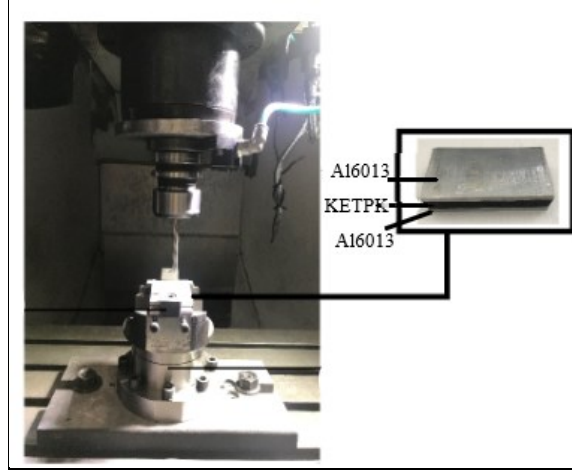
malzemesinin yoğunluk testi sonucu, mekanik, termal ve elektriksel özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. KETPK malzemenin ASTM D 792'ye göre fiziksel özellikleri (*Physical properties of KETPK material according to ASTM D 792*)

Malzeme	Yoğunluk (gr/cm ³)	Yüzde elyaf ağırlığı	Termal iletkenlik (W/mK)	Elyaf çapı (µm)	Elektriksel iletkenlik (µ-Ω-m)	Çekme modülü (GPa)	Çekme gerilmesi (GPa)
KETPK	1.59	%74.6	5	7	18	231	3.75





Deneyler, JOHNFORD VMC-550 marka CNC dik işleme merkezinde (Şekil 2), Makine takım

endüstrisinden temin edilen 7 mm çapında matkaplar (Tablo 3) kullanılarak yapılmıştır.



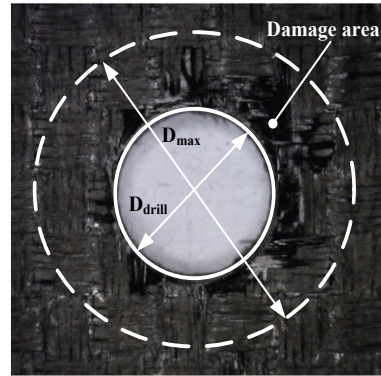
Şekil 2. Deneysel düzeneği (The experimental setup)

Tablo 3. Deneysel düzeneği kullanılan matkapların teknik özellikleri (Technical properties of drills used in experiments)

Matkaplar	Çap (mm)	Helis açısı	Uç açısı	Helis boyu (mm)	Boy (mm)	Matkap görünümü
Kaplamasız HSS	7	15°	90°	69	109	
Kaplamasız HSS	7	22.5°	90°	69	109	
Kaplamasız HSS	7	15°	118°	69	109	
Kaplamasız HSS	7	22.5°	118°	69	109	

Al6013/KETPK/Al6013 istifli yapı delme işlemi sonrasında KETPK malzemelerin görüntüleri taranıp Şekil 3'de görüldüğü gibi delik çapı (D_{drill}) ve hasar çapı (D_{max}) belirlenerek delaminasyon oranı (f_d)

hesaplanmıştır. Delaminasyon oranını hesaplamak için $f_d = D_{\text{max}}/D_{\text{drill}}$ eşitliği kullanılmıştır [11,20].

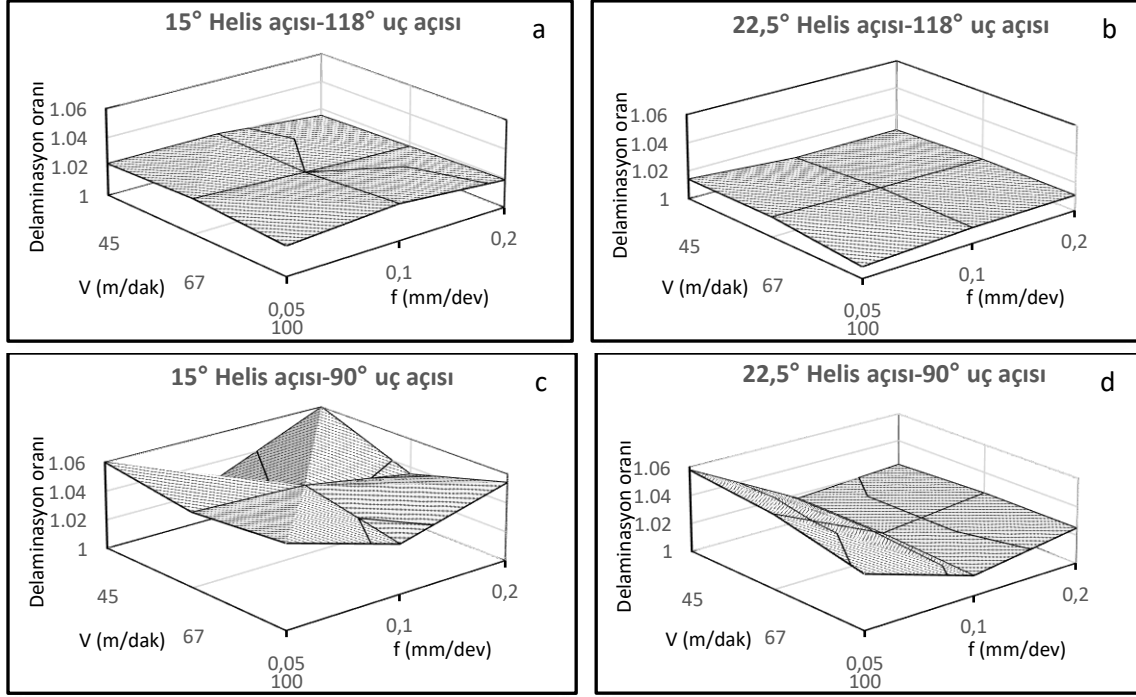


Şekil 3. Deneysel düzeneği kullanılan KETPK malzemenin delik çıkış delaminasyonu (Hole exit delamination of KETPK material)

3. DENEYSEL SONUÇLAR ve TARTIŞMA (EXPERIMENTAL RESULTS and DISCUSSION)

Karbon elyaf takviyeli kompozitlerin istifli delinmesinde delik çıkış delaminasyonunun

araştırıldığı bu çalışmada elde edilen verilerle grafikler oluşturulmuştur. Şekil 4'de farklı matkap uç açısı ve helis açısında her bir kesme şartında elde edilen verilerle oluşturulan grafikler verilmiştir.



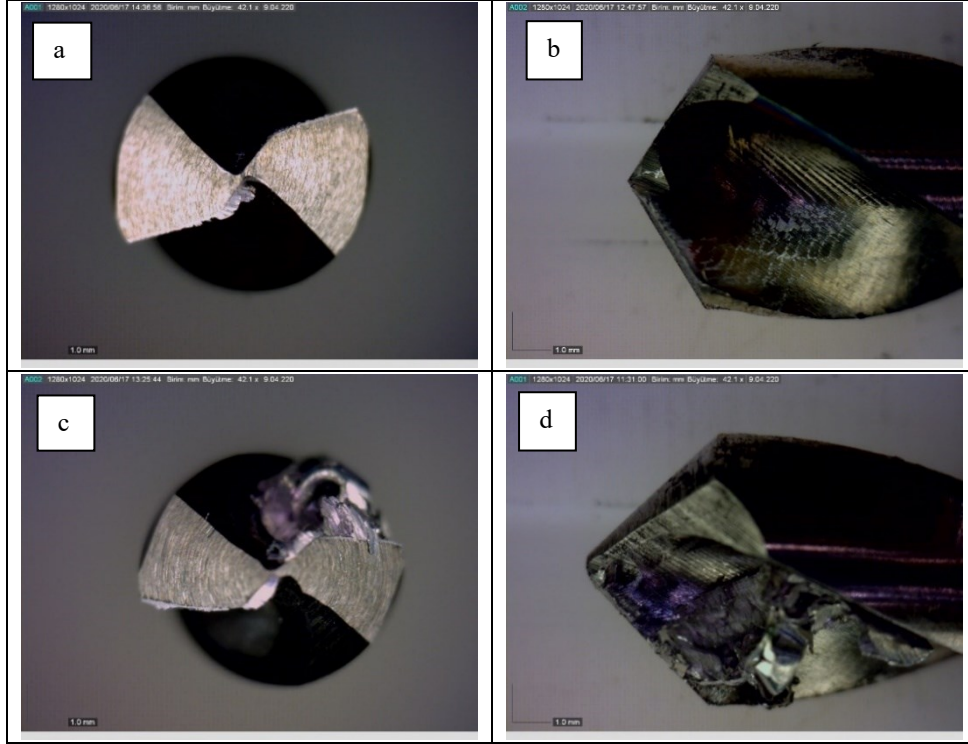
Şekil 4. Farklı matkap uç açısı ve helis açısında kesme parametrelerine bağlı delaminasyon oranları (Delaminations rates depending on cutting parameters in different drill point angle and helix angle)

Şekil 4 incelendiğinde, kesme hızının artması ile delaminasyon oranının azaldığı aynı zamanda ilerleme miktarının artması ile delaminasyon oranının arttığı görülmektedir. Kesme hızının artması kesme kuvvetlerini azalttığı ve delaminasyonların azaldığı, ilerleme miktarının artması ile de kesme kuvvetlerinin arttığı ve dolayısı ile delaminasyon oranının arttığı söylenebilir [16,19,21-23].

Genel olarak 118° uç açılı ve 22.5° helis açılı matkaplarla yapılan deneylerde delaminasyonların 90° uç açılı ve 15° helis açılı olanlara oranla daha az olduğu görülmektedir. Delik delme işlemlerinde kullanılan matkapların uç açısı değiştiğinde ilerleme kuvvetinin yönü değişmektedir (Şekil 1) [12]. Bu durum kesme bölgesinde deformasyonun yönünü değiştirmektedir. Daha büyük uç açılı matkaplarla yapılan deneylerde bu yön daha stabil olan alt plakaya doğru olurken uç açısı küçüldükçe yön, daha az stabil olan KETPK malzemeye yönelmektedir. Uç açısı büyük olan matkaplardaki delaminasyon

oranlarının az olması bu duruma bağlanabilir. Bu bağlamda düşük uç açısı ve düşük helis açısı delaminasyon oranını artırmıştır (Şekil 4-c).

Karbon fiber kompozit malzemeleri istifli delme işlemleri delaminasyon oranını azaltmakla birlikte istif malzemesi olarak metal esaslı malzemelerin kullanılması metal talaş oluşumu ve sıvanması karbon fiber tabakaya zarar vermektedir [24,25]. Kesme hızlarının artması ile delaminasyon oranının azalmasını kesme hızının artması ile metal talaş yapışması/sıvanması eğiliminin azalmasına bağlamak mümkündür. Şekil 5-a ve b'de 100 m/dak ve 0.05 mm/dev'de yapılan deneydeki matkap ucu gösterilirken Şekil 5-c ve d'de 45 m/dak ve 0.05 mm/dev'de yapılan deneydeki matkap ucu gösterilmiştir. Şekil 5'te gösterilen düşük kesme hızlarındaki bu talaş oluşumu/sıvanmasının delaminasyonları artırmıştır.



Şekil 5. Matkap uç görüntüleri (A-B: 100 m/dak ve 0,05 mm/dev, C-D: 45 m/dak ve 0,05 mm/dev) (Drill point images)

Bu çalışma için en düşük delaminasyon oranı 118° uç açılı, 22.5° helis açılı matkaplarla en yüksek kesme hızı 100 m/dak'da ve en düşük ilerleme miktarı olan 0.05 mm/dev'de elde edilmiştir (Şekil 4-b). En kötü delaminasyon oranları ise 90° uç açılı matkaplarla düşük kesme hızında (45 m/dak) yapılan deneylerde elde edilmiştir (Şekil 4 c ve d).

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Karbon elyaf takviyeli malzemenin istifli delme işleminde delik çıkış delaminasyonların araştırıldığı bu çalışma ile elde edilen önemli bulgular aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Kesme hızının artması ile delaminasyon oranının azaldığı aynı zamanda ilerleme miktarının artması ile delaminasyon oranının arttığı görülmüştür.

- Genel olarak 118° uç açılı ve 22.5° helis açılı matkaplarla yapılan deneylerde delaminasyonların 90° uç açılı ve 15° helis açılı olanlara oranla daha az olduğu görülmüş, düşük uç açısı ve düşük helis açısı delaminasyon oranını artırmıştır.

- Karbon fiber kompozit malzemeleri istifli delme işlemleri delaminasyon oranını azaltmakla birlikte istif malzemesi olarak metal esaslı malzemelerin kullanılması metal talaş oluşumu ve sıvanması karbon fiber tabakaya zarar verdiği görülmüştür.

- Kesme hızının artması ile metal talaş yapışması/sıvanması eğiliminin azaldığı bu da delaminasyon oranının azalmasını sağladığı görülmüştür.

- En küçük delaminasyon oranı 118° uç açılı, 22.5° helis açılı matkaplarla en yüksek kesme hızı 100 m/dak'da ve en düşük ilerleme miktarı olan 0.05 mm/dev'de elde edilmiştir.

- En kötü delaminasyon oranları ise 90° uç açılı matkaplarla düşük kesme hızında (45 m/dak) yapılan deneylerde ortaya çıkmıştır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI BİLDİRİMİ (CONFLICT OF INTEREST STATEMENT)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Ş. Bayraktar, "Karbon elyaf takviyeli polimer kompozit malzemelerin frezeleme işleminde işlenebilirliğinin deneysel araştırılması," Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üni., Ankara, Türkiye, 2011.

[2] K. Erbay, "Silah gövdeleri için polimer esaslı kompozit malzeme üretimi ve özelliklerinin incelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üni., Trabzon, Türkiye, 2009.

- [3] R. Teti, "Machining of composite materials" *Annals of the CIRP*, vol. 51, no. 2, pp. 611-634, 2002. doi:[https://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61703-X](https://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61703-X)
- [4] Y.H. Guu, H. Hocheng, N.H. Tai, S.Y. Liu, "Effect of electrical discharge machining on the characteristics of carbon fibre reinforced carbon composites" *Journal of Materials Science*, vol. 36, no.8, pp. 2037-2043, 2001. doi:<https://dx.doi.org/10.1023/A:1017539100832>
- [5] Ş. Bayraktar, "Elyaf takviyeli polimer kompozit malzemelerin farklı delme yöntemleri ile delinmesinde kesme performansının değerlendirilmesi: Literatür taraması," *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 33, no. 2, pp. 629-647, 2018.
- [6] D. Asi, "Polimer matrisli kompozit malzemelerde ilave olarak kullanılan parçacıkların geometrisinin kompozit malzemelerin fiziksel ve mekaniksel özelliklerine etkisinin araştırılması," Doktora Tezi, Uşak Üni., Uşak, Türkiye, 2018.
- [7] H. Özer, "Sürekli cam elyaf takviyeli termoplastik kompozit malzemelerin geliştirilmesi ve mekanik özelliklerinin deneysel olarak belirlenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üni., Bursa, Türkiye, 2015.
- [8] K.L. Luthra, "Oxidation of carbon/carbon composites-a theoretical analysis," *Carbon*, vol. 26 no. 2, pp. 217-224, 1988. doi:[https://dx.doi.org/10.1016/0008-6223\(88\)90040-1](https://dx.doi.org/10.1016/0008-6223(88)90040-1)
- [9] V.N. Gaitonde, S.R. Karnik, J. Campos Rubio, A. Esteves Correia, A.M. Abrão, J. Paulo Davim "A study aimed at minimizing delamination during drilling of CFRP composites," *Journal of Composite Materials*, vol. 45 no. 22, pp. 2359-2368, 2011. doi:<https://dx.doi.org/10.1177/0021998311401087>
- [10] CW. Wern, M. Ramulu, A. Shukla, "Investigation of stresses in the orthogonal cutting of fibre-reinforced plastics" *Experimental Mechanics*, vol.36, pp. 33-41, 1996. doi:<https://dx.doi.org/10.1007/BF02328695>
- [11] S. Arul, L. Vijayaraghavan, S.K. Malhotra, R. Krishnamurthy, "The effect of vibratory drilling on hole quality in polymeric composites" *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 46, no. 3-4, pp. 252-259, 2006. doi:<https://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.05.023>
- [12] S.Y. Park, W.J. Choi, C.H. Choi, H.S. Choi, "Effect of drilling parameters on hole quality and delamination of hybrid GLARE laminate," *Composite Structures*, vol. 185, pp. 684-698, 2018. doi:<https://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.11.073>
- [13] S.R. Karnik, V.N. Gaitonde, J. Campos Rubio, A. Esteves Correia, A.M. Abrão, J. Paulo Davim, "Delamination analysis in high speed drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using artificial neural network model," *Materials & Design* vol. 29 no. 9, pp. 1768-1776, 2008. doi:<https://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2008.03.014>
- [14] A.T. Kuzu, "Kompakt grafitli dökme demirin delik delme işleminin incelenmesi ve sıcaklık modelinin oluşturulması," Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üni., İstanbul, Türkiye, 2016.
- [15] T. Üstün, "Delik delmede farklı delme uygulamalarının takım performansı ve işleme ekonomisi açısından karşılaştırılması," Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üni., Ankara, Türkiye 2019.
- [16] L.M.P. Durão, D.J.S. Gonçalves, J.M.R.S Tavares, V.H.C. Albuquerque, A.A. Vieira, A.T. Marques, "Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates," *Composite Structures*, vol. 92 no. 7, pp. 1545-1550, 2010. doi:<https://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.10.035>
- [17] A.M. Abrão, J.C. Campos Rubio, P.E. Faria, J.P. Davim, "The effect of cutting tool geometry on thrust force and delamination when drilling glass fibre reinforced plastic composite" *Materials & Design* vol. 29 no.2, pp. 508-513, 2008. doi:<https://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2007.01.016>
- [18] J. P. Davim, P. Reis, "Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave-experimental and statistical study" *Materials & Design*, vol. 24 no. 5, pp. 315-324, 2003.
- [19] U. Heisel, T. Pfeifroth, "Influence of point angle on drill hole quality and machining forces when drilling CFRP" *Procedia CIRP*, vol. 1, pp. 471-476, 2012.
- [20] J.P. Davim, P. Reis, C.C., Antonio, "Experimental study of drilling glass fibre reinforced plastics (GFRP) manufactured by hand lay-up" *Composites Science and Technology*, vol. 64 no. 2, pp. 289-297, 2004.
- [21] N. Yaşar, M. Günay, "Experimental investigation on novel drilling strategy of CFRP laminates using variable feed rate" *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol.41, no.150, 2019. doi:<https://dx.doi.org/10.1007/s40430-019-1658-2>

[22] G. Basmacı, A.S. Yörük, “Karbon Fiber Takviyeli Kompozit Malzemenin Kuru ve Kriyojenik Şartlarda Delinebilirliğinin Deneysel Araştırılması,” *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 11 no.2, pp. 164-175, 2020. doi:<https://dx.doi.org/10.29048/makufebed.745998>

[23] S.O. Ismail, H.N. Dhakal, I. Popov, J. Beaugrand, “Comprehensive study on machinability of sustainable and conventional fibre reinforced polymer composites,” *Engineering Science and Technology an International Journal*, vol. 19 no. 4, pp. 2043-2052,2016. doi:<https://dx.doi.org/10.1016/j.jestch.2016.07.010>

[24] E. Aydın, “CFRP/Al istifli delmede matkap uç açısının itme kuvveti (Fz) ve takım aşınması üzerine etkilerinin araştırılması,” *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 9, no. 3, pp. 1574-1583,2019. doi:<https://dx.doi.org/10.21597/jist.521218>

[25] O. Pecat, B. Ekkard, “Low Damage Drilling of CFRP/Titanium Compound Materials for Fastening” *Procedia CIRP*, vol. 13, pp. 1-7, 2014. doi:<https://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2014.04.001>

Dielektrik Malzemelerin Yüzeyleri için İslanabilirlik ve Buharlaşma Hızının Analizine Yönelik Ayrık Kosinüs Dönüşümü Tabanlı Bir Yaklaşım

Mustafa KARHAN^{*,a} 

^{a,*} Çankırı Karatekin Üniversitesi, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, 18100, Çankırı, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 17.06.2021
Kabul: 06.08.2021

Anahtar Kelimeler:

Ayrık Kosinüs
Dönüşümü (AKD),
dielektrik malzeme,
ıslanabilirlik,
buharlaşma hızı,
görüntü işleme,
yaşlanma

ÖZ

Dielektrik malzemelerin yaşlanması, servis verdikleri süre boyunca kaçınılmaz bir durumdur. Dielektrik malzemelerin, elektriksel özelliklerinin yanısıra yüzey özellikleri de kararlı çalışmasına, performansına ve servis verme süresine etki eden önemli faktörler arasındadır. Elektrik alan ve nem varlığında elektriksel yaşlanma olaylarının başladığı ve hızlandığı ele alındığında, ıslanabilirliğin özellikle dış mekân uygulamalarında büyük önem arz eden yüzey özellikleri arasında olduğu aşikardır. İslanabilirlik, katı yüzeylerin karakterize edilmesine ve katı-sıvı etkileşimlerini belirlemeye imkan sağlamaktadır. Bu çalışmada dielektrik malzeme yüzeyine damlatılan 167,9 mS/cm iletkenliğe ve 20 µL hacme sahip tuzlu su damlacıklarının anlık görüntüleri dijital mikroskop kullanılarak 1., 10., 20., 30, 40. ve 50. dakikalar olmak üzere 5 farklı zaman noktası için alınmıştır. Elde edilen görüntüler, görüntü işleme teknikleri kullanılarak iyileştirilmiş ve damlacık görüntüsü bölütlenmiştir. Tuzlu su damlacık görüntülerine Ayrık Kosinüs Dönüşümü (AKD) uygulanmış ve AKD katsayıları çıkartılmıştır. Çıkartılan katsayıların standart sapması için zamana bağlı olarak saçılım grafiği çizdirilmiştir. Elde edilen zamana bağlı noktalar için eğriler (linear ve quadratic) uydurulmuş ve uydurulan eğrilerin matematiksel eşitlikleri elde edilmiştir. Dielektrik malzemelerinin yüzeyleri için ıslanabilirliği ve buharlaşma hızını değerlendirmeye ve yorumlamaya yönelik olarak AKD tabanlı bir yaklaşım sunulmuştur. Sonuç olarak görüntü işleme teknikleri kullanılarak buharlaşma, zaman, ıslanabilirlik ve temas açısı arasındaki ilişki gözlemlenmiştir.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.02.09>

A Discrete Cosine Transform Based Approach to Analysis of Evaporation Rate and Wettability for Dielectric Materials' Surfaces

ARTICLE INFO

Received: 17.06.2021
Accepted: 06.08.2021

Keywords:

Discrete Cosine
Transform (DCT),
dielektrik malzeme,
wettability,
evaporation rate,
image processing,
aging

ABSTRACT

The aging of dielectric materials is unavoidable during their service life. In addition to the electrical properties of dielectric materials, the surface properties that affect their stable operation, performance, and service life are among the important factors. Considering that the electrical aging phenomena initiate and grown in the presence of electric field and humidity, it is obvious that wettability is among the surface properties that are of great importance especially in outdoor applications. Wettability allows characterization of the solid surfaces and determination of solid-liquid interactions. In this study, snapshots of saltwater droplets with a conductivity of 167.9 mS/cm and a volume of 20 µL dropped onto the dielectric material surface were taken using a digital microscope for 5 different time points, 1st, 10th, 20th, 30th, 40th, and 50th minutes. The obtained images were enhanced using image processing techniques and the droplet image was segmented. Discrete Cosine Transform (DCT) was applied to the saline droplet images and the DCT coefficients were extracted. The standard deviation of the extracted coefficients was plotted as a time-dependent scatter graph. For the time-dependent points obtained, linear and quadratic polynomial curves were fitted and the mathematical equations of the fitted curves were obtained.

*Corresponding author: mustafakarhan@gmail.com

To cite this article: M. Karhan, "A Discrete Cosine Transform Based Approach to Analysis of Evaporation Rate and Wettability for Dielectric Materials' Surfaces", *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol.7, no.2, pp. 160-168, 2021. doi:<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.02.09>

A DCT-based approach is presented to evaluate and interpret the wettability and evaporation rate for the dielectric materials' surfaces. As a result, the relationship between evaporation rate, time, wettability, and contact angle is observed using image processing techniques.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.02.09>

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Islanabilirlik, bir sıvının bir yüzey üzerine yayılması, bir sıvının gözenekli bir ortama nüfuz etmesi veya bir sıvının diğeriyle yer değiştirmesi olabilir. Islanabilirlik, yüzeyleri karakterize etmeye ve katı/sıvı etkileşimlerini belirlemeye yardımcı olmaktadır. Islanabilirlik çoğunlukla durağan damla (sessile drop) ile tanımlanmaktadır [1]. Dielektrik malzemelerin yüzey özellikleri, malzemelerin kararlı çalışmasına, performansına ve servis ömürlerine önemli seviyede etki etmektedir. Dielektrik malzemelerin yüzey özellikleri arasında bulunan islanabilirlik karakteristiğinin (hidrofobisite ve hidrofilisite) belirlenmesi ve değerlendirilmesi temas açısı ölçümleri gerçekleştirilerek yapılmaktadır [2, 3]. Elektrik alan ve nem mevcudiyetinde elektriksel yaşlanma olaylarının başladığı ve büyüdüğü de dikkate alındığında dielektrik malzemelerin yüzey islanabilirlik davranışının önemi ortaya çıkmaktadır [4-8].

Islanabilirlik kavramı ile büyük bir ilintisi bulunan buharlaşma hızı çip üzerinde laboratuvar (lab-on-chip) gibi birçok modern teknolojide kendine yer bulmaktadır. Buharlaşma hızı, tuz çözeltileri içeren damlacıkların buharlaşmasında tuz konsantrasyonu zamanla birlikte değişmektedir. Tuz konsantrasyonundaki değişim damlacık buharlaşma hızını etkilemektedir [9]. Bu bağlamda, durağan damlanın buharlaşma hızı; damla yarıçapı, temas açısı, bağıl nem, ortam sıcaklığı, damlacık boyutu, pürüzlülük, atmosferik basınç, islanabilirlik ve difüzyon katsayısı gibi birçok faktöre bağlıdır [9-16].

Literatürde farklı sıvılar, farklı yüzey parametreleri, farklı çevre koşulları ve farklı dielektrik malzeme yüzeyleri için islanabilirlik ve buharlaşma hızı üzerine birçok çalışma bulunmaktadır. Almohammadi ve Amirfazli, elektrik alan olması ve olmaması durumunda PEMA, alüminyum, PS ve Teflon yüzeyler için durağan bir damlanın doğal (difüzyon sınırlı) buharlaşmasını incelemişlerdir. Elektrik alanının durağan su damlacığı geometrisi (temas açısı, taban çizgisi ve yüzey alanı) üzerindeki etkisini farklı yüzey islanabilirlikleri için incelemişlerdir. Buharlaşma süresini ve modunu araştırmak için buharlaşma hızını, temas açısını, yüzey alanını ve damlacığın taban çizgisini ölçmüşlerdir. Çok büyük temas açısı

histerezisi olan yüzeyler hariç, elektrik alanının buharlaşma oranını azalttığını (veya zamanı arttırdığını) gözlemlemişlerdir [17].

Hu ve Larson, şekli yerçekiminden etkilenmeyecek kadar küçük ve dolayısıyla küresel şekilde bir tepeciği andıran bir damlacık üzerindeki buhar konsantrasyonu dağılımını ve buharlaşma akışını çözmek için bir FEM modeli geliştirmişlerdir. Buhar fazı su konsantrasyonu alanı, damlacık yüksekliğindeki değişikliklere hızla uyum sağladığını ve yarı sabit olarak kabul edilebilir olduğunu belirtmişlerdir [14]. Rowan ve arkadaşları, PMMA malzeme yüzeyindeki su damlacıklarının buharlaşmasının incelenmesine yönelik olarak temas açısı ve yükseklik ölçümlerini kullanmışlardır. Kütle kaybı hızının küresel yarıçapla değil, damlacık yüksekliğiyle orantılı olduğunu belirtmişlerdir. Zaman içinde yükseklik ve temas açısı için doğrusallık gözlemlemişlerdir [18].

Erbil ve arkadaşları, bir video-mikroskopi tekniği kullanarak zamana bağlı damla buharlaşmasını izleyerek PMMA ve PET yüzeylerindeki su damlacıklarının gerileyen temas açılarını ölçmüşlerdir. Video-mikroskopi tekniği ve görüntü analizi ile PMMA ve PET yüzeylerdeki farklı hacimlerdeki su damlacıkları için zamanla temas çapı değişimini gözlemlemişlerdir. PMMA yüzeyindeki daha büyük damla boyutu için hem ilerleyen ("advancing") temas açısının θ_a hem de gerileyen ("receding") temas açısının θ_r daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. [19]. Wang ve arkadaşları, PMMA yüzeyi için etanol ve su karışımını içeren durağan damlanın buharlaşmasını incelemişlerdir. Saf su damlası ve etanol-su damlası testinin farklı buharlaşma davranışları sergilediklerini gözlemlemişlerdir [20].

Bu çalışmada, dielektrik malzeme yüzeyi üzerine tuzlu su çözeltisi damlatmak ve damlacık görüntüsü almak için bir platform tasarlanıp uygulanmıştır. Hazırlanan platform yardımıyla dielektrik malzeme yüzeyi üzerinden farklı zaman noktalarından alınan damlacık görüntüleri görüntü işleme teknikleri yardımıyla işlenmiştir. Literatürde durağan damlanın yükseklik, temas çapı, yüzey alanı ve hacim gibi damlacığın geometrisi ile ilişkili değerler ölçülüp buharlaşma hızına yönelik değerlendirmeler yapıldığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmada, dielektrik malzeme yüzeyi için islanabilirlik ve buharlaşma hızını

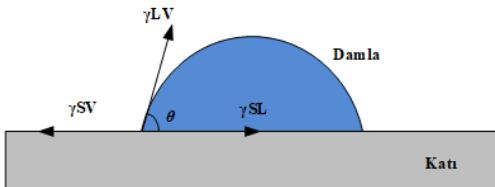
inceleyeme yönelik olarak görüntü işleme tabanlı yeni bir perspektif sunulmuştur.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

2.1 Temas Açısı (Contact Angle)

Thomas Young [21] tarafından tanımlanan ıslanabilirlik kavramı katı-sıvı etkileşimlerini belirlemeye imkân sağlamaktadır. Katı yüzeyleri karakterize etmeye yardımcı olan ıslanabilirlik kavramı malzemelerin temel özellikleri arasındadır ve yüzey mühendisliğinde aktif ve önemli bir rol oynamaktadır. Bir yüzeyin ıslanabilirliği (hidrofobikliği ve hidrofilikliği), üç yüzey geriliminin (sıvı yüzey gerilimi (γ_{LV}), katı yüzey gerilimi (γ_{SV}) ve sıvı-katı ara yüzey gerilimi (γ_{SL})) arasındaki mekanik bir dengenin sonucunda oluşan temas açısı ile açıklanmaktadır ve Young denklemi ile ifade edilmektedir. İfade edilen bu eşitlik Eş. 1'de verilmiştir. Aynı zamanda Young açısı veya statik temas açısı olarak tanımlanan temas açısı için eşitlik Eş. 1'de verilmiştir [22]. Şekil 1'de katı bir yüzey üzerine bırakılan damla için temas açısı ve yüzey gerilimlerine yer verilmiştir. Şekil 1'de gösterildiği üzere ölçülen temas açısının (θ) 90° 'den küçük veya büyük olma durumuna göre malzeme yüzeyinin hidrofobisitesi veya hidrofobisitesi hakkında değerlendirme yapılabilmektedir.

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \quad (1)$$



Şekil 1. Durağan damla ve temas açısı (Sessile drop and contact angle)

2.2. Damlacık Görüntülerinin Alınması ve Temas Açısı Ölçümü (Acquisition of Droplet Images and Contact Angle Measurement)

Görüntü işleme tabanlı ıslanabilirliğin ve buharlaşma hızının incelenmesine yönelik olarak sunulan bu yaklaşımda, dielektrik malzemeleri temsilen mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan elektriksel yalıtkan bir malzeme olan Poly (methyl methacrylate) (PMMA) dielektrik malzeme kullanılmıştır. PMMA malzeme, elektrik mühendisliği uygulamalarında, yüksek gerilim uygulamalarında, biyomedikal uygulamalarda ve optik uygulamalarda aktif rol oynayan önemli ve çok yönlü bir polimerik malzemedir [2, 23-26].

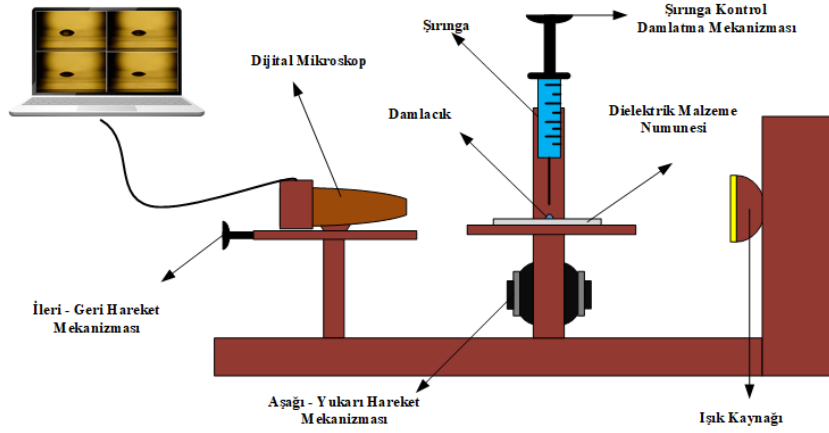
Dielektrik malzemenin yüzeyinin ortalama yüzey pürüzlülük değeri (R_a) $0.008 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. Ortalama yüzey pürüzlülük değerini (R_a) ölçmek için Mitutoyo SJ-410 profilometre kullanılmıştır. Yüzey üzerine bırakılacak damla için 167.9 mS/cm iletkenliğe sahip bir NaCl çözelti hazırlanmıştır. Hazırlanan çözeltinin iletkenlik değerleri gerçek hayatta elektriksel yalıtkanların, sıvı anlamında karşılaşılabileceği veya maruz kalabileceği değerlere yakın değerler olarak öngörülmüştür. Hazırlanan tuzlu su çözeltisinin iletkenlik değeri SG78 – SevenGo Duo pro pH/Ion/Conductivity Meter, Mettler Toledo, Spain) yardımıyla ölçülmüştür. Numune yüzeyine bırakılan tuzlu su damlacıklarının hacmi yaklaşık $20 \mu\text{L}$ 'dir. Tuzlu su çözeltilerinin damlatıldığı şırınga yaklaşık olarak 0.80 mm eğim uzunluğuna ('bevel length') ve 29.69° eğim açısına ('bevel angle') sahiptir. Islanabilirlik ve buharlaşma hızı analizi için damlacık görüntüleri ve temas açısı ölçümü yapılmadan önce dielektrik malzeme numune yüzeyinin düzgün ve temiz olmasına dikkat edilmiştir. Her dielektrik malzeme numune yüzeyine tuzlu su çözeltisi damlatılmadan önce numune yüzeyi alkol ile temizlenmiş ve sonra kurutulmuştur.

Belirlenen farklı zaman noktalarında dielektrik malzeme yüzeyi üzerinden damlacık görüntüsü almak ve temas açısı ölçümleri gerçekleştirmek için tasarlanan sistemin donanım kısmı Şekil 2'de verilmiştir. Tuzlu su damlacık görüntüleri Celestron 44308 dijital mikroskop yardımıyla alınmıştır. Alınan damlacık görüntülerinden temas açısı ölçümleri Karhan'ın [2] geliştirdiği MATLAB yazılım platformunda hazırlanan GUI (graphical user interface-grafiksel kullanıcı arayüz) üzerinden gerçekleştirilmiştir. Temas açısı ölçümlerinin gerçekleştirildiği bu GUI'de ölçümler yarım açı metodu ($\theta/2$) yöntemine dayanmaktadır. Yarım açı yöntemi, sabit damlanın ideal bir kürenin parçası olduğunu ve damlanın yandan görünümünün bir daire olduğunu varsayar. Sonuç olarak, bu yöntem yardımıyla damlanın yarıçapına ve yüksekliğine bağlı olarak temas açısı hesaplanır [22,27]. Şekil 2' de dielektrik malzeme yüzeyindeki tuzlu su damlacık görüntülerinin alındığı platforma yer verilmiştir.

2.3. Ayrık Kosinüs Dönüşümü (Discrete Cosine Transform)

Ahmed ve arkadaşları [28] Ayrık Kosinüs Dönüşümünü (AKD) ilk olarak yetmişli yılların başlarında tanıttı. AKD, işaret ayrıştırma ve sıkıştırma için yaygın olarak kullanılan popüler bir yöntemdir. AKD, temel olarak bir işareti değişen büyüklük ve frekanslardaki sinüzoidlerin toplamı olarak temsil eder. Böylelikle bu dönüşüm yardımıyla, görüntünün piksel değerleri bir alandan diğerine aktarılır. AKD dönüşümü, bir DC katsayısı ve AC katsayılarından oluşur. Birkaç düşük seviyeli frekans

katsayısında saklanan dönüştürülmüş görüntü bilgilerinin çoğu görüntünün sol üst köşesinde bulunur [29,30].



Şekil 2. Damlacık görüntüsü almak için tasarlanıp uygulanan platform
(The designed and implemented platform to take the droplet image)

Bir $M \times N$ 'lik bir X görüntüsünün Ayırık Kosinüs Dönüşümü Eş. 2 ve Eş. 3'te tanımlanmıştır.

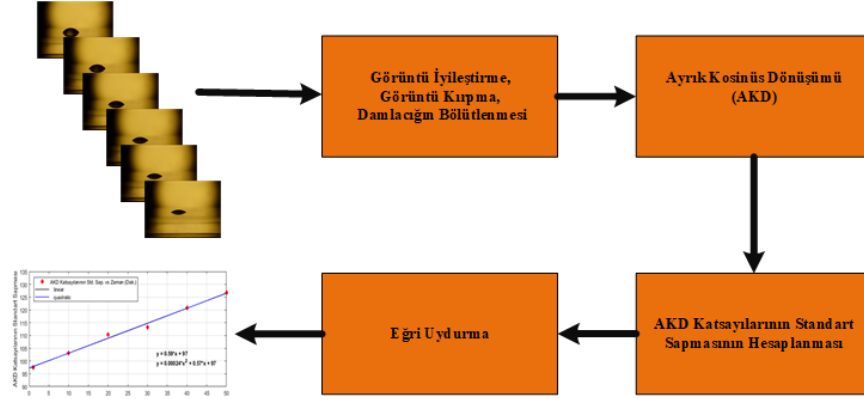
C_{pq} değerlerine X 'in AKD katsayıları denir.

$$C_{pq} = a_p a_q \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} X_{mn} \cos \frac{\pi(2m+1)p}{2M} \cos \frac{\pi(2n+1)q}{2N}, \quad \begin{matrix} 0 \leq p \leq M-1 \\ 0 \leq q \leq N-1 \end{matrix} \quad (2)$$

$$a_p = \begin{cases} 1/\sqrt{M}, & p=0 \\ \sqrt{2/M}, & 1 \leq p \leq M-1 \end{cases} \quad a_q = \begin{cases} 1/\sqrt{N}, & q=0 \\ \sqrt{2/N}, & 1 \leq q \leq N-1 \end{cases} \quad (3)$$

Bu çalışma kapsamında dielektrik malzeme yüzeyine bırakılan damlacık görüntülerinden çıkartılan AKD katsayıları ve bu katsayıların standart sapmaları öznitelik çıkartma işlem basamağını

oluşturmaktadır. Dielektrik malzeme yüzeyleri için ıslanabilirlik ve buharlaşma hızının analizine yönelik önerilen AKD tabanlı yaklaşımın işlem basamakları Şekil 3' te verilmiştir.



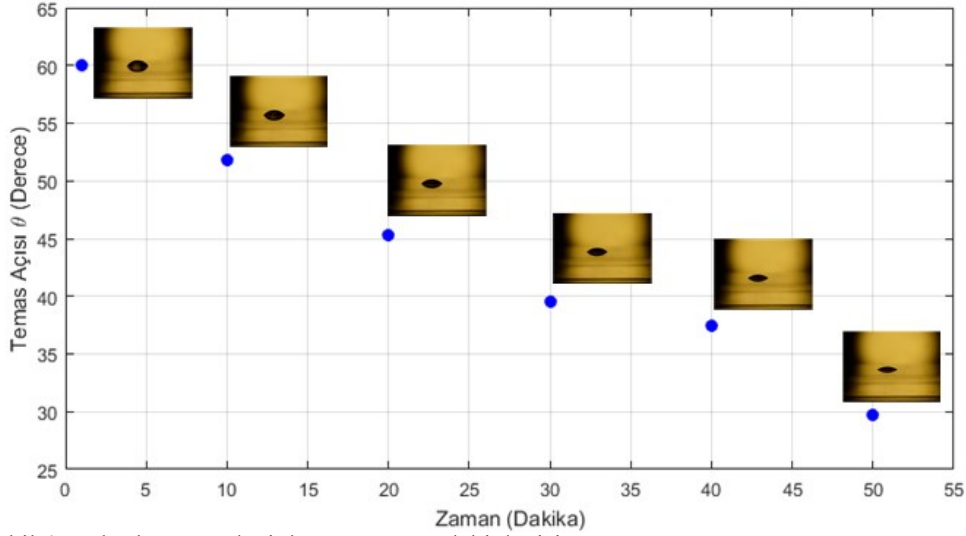
Şekil 3. Islanabilirlik ve buharlaşma hızının analizine yönelik önerilen AKD tabanlı yaklaşımın blok diyagramı
(Block diagram of the proposed DCT-based approach to analysis of wettability and evaporation rate)

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Temas açısı ölçümleri yapılırken Karhan'ın [2] geliştirdiği MATLAB yazılım platformunda hazırlanan kullanıcı arayüzü kullanılmıştır. Kullanılan bu GUI temas açısı hesaplamalarını yarım açı yöntemini kullanarak yapmaktadır. Dielektrik malzeme yüzeyine damlatılan 167.9 mS/cm iletkenliğe ve 20 μ L hacime sahip tuzlu su

damlacığının damla şekli değişimi ve temas açısı değerleri Şekil 4'te gösterilmiştir. Temas açısı değerleri hesaplanırken ve damlacık görüntüleri alınırken ortam sıcaklığı $23.5^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, nem ise RH %34 \pm 2 olarak ölçülmüştür. Doğal buharlaşma nedeniyle damlacığının taban yarıçapında ve yüksekliğinde değişiklikler gözlemlenmiştir. Damlacığının taban çapındaki değişim, damlacığının

yüksekliğindeki değişimin yanında ihmal edilebilecek seviyelerdedir.

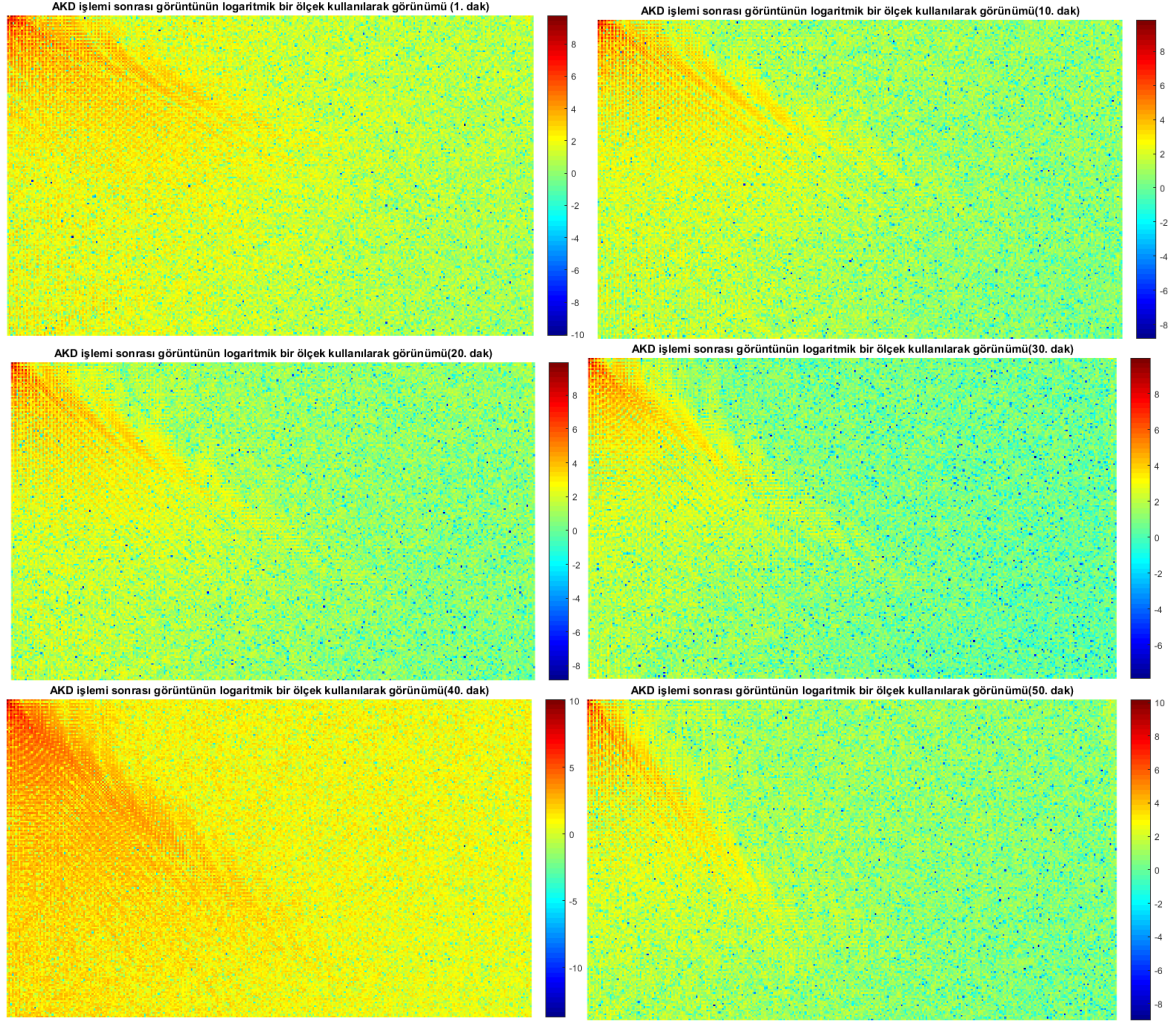


Şekil 4. Buharlaşma nedeniyle temas açısındaki değişim (*Change in contact angle due to evaporation*)

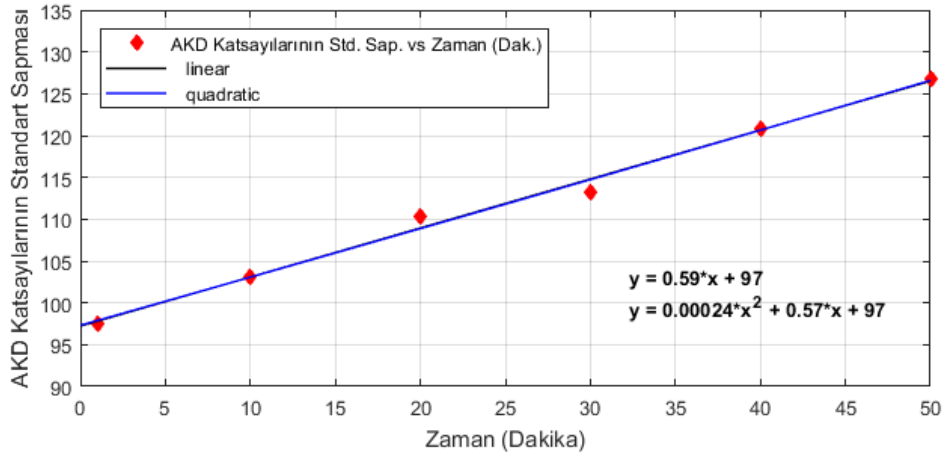
Buharlaşma hızını analiz etmek adına önceden belirlenen farklı zaman noktalarında (1., 10., 20., 30., 40. ve 50. dakikalar) malzeme yüzeyinden damlacık görüntüleri dijital mikroskop yardımıyla alınmıştır. Görüntü alımı için seçilen zaman noktaları, temas açısındaki değişimi, damlacık hacmindeki değişimi ve damlacık yüksekliğindeki değişimi net bir şekilde gözlemleyebilmek için deneysel olarak belirlenmiştir. Elde edilen görüntülerden damlacık görüntüleri bölütlenip kırıldıktan sonra her bir görüntüye ayrık kosinüs dönüşümü uygulanarak AKD katsayıları elde edilmiştir. Şekil 5'te sırasıyla 1., 10., 20., 30., 40. ve 50. dakikalarda dielektrik malzeme yüzeyi üzerinden alınan 167.9 mS/cm iletkenliğe sahip tuzlu su damlacık görüntülerinin AKD işlemi sonrası

logaritmik ölçek kullanılarak görünümlerine yer verilmiştir.

Şekil 6'da sırasıyla 1., 10., 20., 30., 40. ve 50. dakikalarda dielektrik malzeme yüzeyi üzerinden alınan 167.9 mS/cm iletkenliğe sahip tuzlu su damlacık görüntülerinin AKD katsayılarının standart sapmalarına yer verilmiştir. Şekil 6'da da görüldüğü üzere katsayılar temas açılarıyla ilintili bir şekilde doğrusal şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Bu anlamda ıslanabilirlik ve buharlaşma hızına yönelik olarak AKD katsayılarının anlamlı bilgiler içerdiği gözlemlenmiştir. Şekil 6'da AKD katsayılarının standart sapmaları için uydurulan eğrilere (linear ve quadratic) yer verilmiştir.



Şekil 5. AKD işlemi sonrası görüntülerin logaritmik bir ölçek kullanılarak görünümü (The view of images after the DCT process using a logarithmic scale)



Şekil 6. AKD katsayılarının standart sapması için uydurulan eğriler (linear ve quadratic) (The fitted curves (linear and quadratic) for the standard deviation of the DCT coefficients)

AKD katsayılarının standart sapmaları için elde edilen bu eğriler, dielektrik malzemelerin yüzey özellikleri, ıslanabilirlik davranışı ve buharlaşma hızı arasındaki korelasyona ışık tutmaktadır. Böylece bu parametreler üzerinden zamana bağlı olarak

değerlendirmeler yapılabilmektedir. Tablo 1'de uydurulan eğrilerin eşitliklerine ve R^2 değerlerine yer verilmiştir. Uydurulan eğrilerin R^2 değerlerinin birbirine çok yakın değerler aldığı gözlemlenmiştir.

Tablo 1. AKD katsayılarının standart sapmaları için uydurulan eğriler
(Fitted curves for the standard deviations of the DCT coefficients)

Eğri Uydurma Yöntemi	Derece	Eşitlik	R ²
Polinomsal	1 (Linear)	$y = 0.59x + 97$	(4) 0.9919
Polinomsal	2 (Quadratic)	$y = 0.00024x^2 + 0.57x + 97$	(5) 0.9921

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Dielektrik malzemeler hizmet verdikleri sürece yaşlanma kaçınılmaz bir olaydır. Bu çalışmada, dielektrik malzemelerin, elektriksel özelliklerinin yanı sıra kararlı çalışmasına, performansına ve servis verme süresine etki eden temel yüzey özelliklerinden biri olan ıslanabilirlik davranışının görüntü işleme tabanlı analizi gerçekleştirilmiştir. Dielektrik malzeme yüzeyine 167.9 mS/cm iletkenliğe ve 20 µL hacme sahip tuzlu su damlacığı bırakılmıştır. 1., 10., 20., 30, 40. ve 50. dakikalarda yüzey üzerindeki tuzlu su damlacığından aynı şartlarda alınan görüntülerin Ayırık Kosinüs Dönüşümü katsayıları çıkartılmıştır. Çıkartılan katsayıların standart sapmalarına ait saçılım grafiği zamana bağlı olarak çizdirilmiştir. Elde edilen zamana bağlı noktalar için 1. derece ve 2. derece (linear ve quadratic) eğriler uydurulmuştur. Elde edilen eğriler yüksek R2 değerlerine sahiptir. Zamana bağlı olarak farklı zaman noktalarında elde edilen temas açılarının doğrusal bir şekilde azaldığı gözlemlenirken, AKD sonrası elde edilen katsayıların standart sapması da ilintili olarak doğrusal bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak damlacık görüntülerinden AKD kaynaklı elde edilen noktalar, temas açısı ile yüksek seviyede ilintili olduğu gözlemlenmiştir. Sunulan bu yaklaşım ile birlikte, sadece damlacık görüntülerinden malzemelerin yüzeyleri için ıslanabilirlik davranışı ve buharlaşma hızı hakkında değerlendirme ve yorum yapılabilmektedir.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda, damlacık görüntüleri alımı için zaman nokta aralıkları kısaltılıp daha fazla görüntü alınarak direkt olarak temas açısı tahmini yapılması planlanmaktadır. Temas açısı ölçümü yapılmadan farklı algoritmalar kullanarak, temas açısı değerlerinin tahmininin yapılması planlanmaktadır. Yapılan bu çalışma, AKD kaynaklı öznelikler kullanılarak temas açısı tahminlerinin doğru bir algoritmayla yapılabileceğine temel oluşturmaktadır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI BİLDİRİMİ (CONFLICT OF INTEREST STATEMENT)

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] R. E. Johnson and R. H. Dettre, *Wetting of low-energy surfaces*, Vol. 49, Marcel Dekker, Inc.: New York, 1993.
- [2] M. Karhan, "Experimental investigation of wettability and evaporation for the surface of PMMA dielectric material used in high-voltage applications and outdoor electrical applications," *Applied Physics A*, vol. 127, no.6, pp.1-11, 2021. doi: <https://doi.org/10.1007/s00339-021-04630-6>
- [3] A. Ersoy and A. Kuntman, "Polimerik yalıtkanlarda yüzey özelliklerinin temas açısı ile incelenmesi," *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu (ELECO2008)*, Bursa, Turkey, 2008, pp. 107-111.
- [4] M.C. Lanca, "Electrical ageing studies of polymeric insulation for power cables," Ph.D. dissertation, Universidade Nova De Lisboa, Portugal, 2002.
- [5] M. Karhan, M. F. Çakır and M. Uğur, "A New Approach to the Analysis of Water Treeing Using Feature Extraction of Vented Type Water Tree Images," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol.16, no. 3, pp. 1241-1252, 2021. doi: <https://doi.org/10.1007/s42835-021-00667-y>
- [6] L. Hui, L. S. Schadler and J. K. Nelson, "The influence of moisture on the electrical properties of crosslinked polyethylene/silica nanocomposites," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 20, no. 2, pp. 641-653, 2013. doi: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2013.6508768>
- [7] M. Karhan, A. E. Yılmaz and M. Uğur, "Investigation the effect of solution conductivity on the growth rate and shape of water trees observed in distribution cables," *Istanbul University-Journal of Electrical & Electronics Engineering*, vol. 17, no. 2, pp. 3445-3451, 2017.
- [8] Y. Fan, R. X. Yang, H. Chen and H. L. Zhang, "The impact of air relative humidity on corona-resistant polyimide film", *6th International Forum on Strategic Technology IEEE*, 2011, Vol. 1, pp.80-83.

- [9] S. Y. Misyura, "The dependence of drop evaporation rate and wettability on corrosion kinetics," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 610, no. 125735, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125735>
- [10] S. Y. Misyura, G. V. Kuznetsov, D. V. Feoktistov, R. S. Volkov, V. S. Morozov and E. G. Orlova, "The influence of the surface microtexture on wettability properties and drop evaporation", *Surface and Coatings Technology*, vol. 375, pp. 458-467, 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.07.058>
- [11] S. Y. Misyura, "Heat transfer and convection of evaporating sessile droplets in transition from superhydrophilic to superhydrophobic structured wall: Optimization of functional properties", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 112, pp. 104474, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.104474>
- [12] S. Chakraborty, M. A. Rosen and B. D. MacDonald, "Analysis and feasibility of an evaporative cooling system with diffusion-based sessile droplet evaporation for cooling microprocessors", *Applied Thermal Engineering*, vol. 125, pp. 104-110, 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.appltherg.2017.07.006>
- [13] S. Semenov, A. Trybala, R. G. Rubio, N., Starov, V. Kovalchuk and M. G. Velarde, "Simultaneous spreading and evaporation: Recent developments," *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 206, pp. 382-398, 2014. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2013.08.006>
- [14] H. Hu and R. G. Larson, "Evaporation of a sessile droplet on a substrate," *The Journal of Physical Chemistry B*, vol. 106, no. 6, pp. 1334-1344, 2002. doi: <https://doi.org/10.1021/jp0118322>
- [15] F. Girard, M. Antoni, S. Faure and A. Steinchen, "Influence of heating temperature and relative humidity in the evaporation of pinned droplets," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 323, no. 1-3, pp. 36-49, 2008. doi: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2007.12.022>
- [16] D. Hu, H. Wu and Z. Liu, "Effect of liquid-vapor interface area on the evaporation rate of small sessile droplets," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 84, pp. 300-308, 2014. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2014.05.024>
- [17] H. Almohammadi and A. Amirfazli, "Sessile drop evaporation under an electric field," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 555, pp. 580-585, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.07.022>
- [18] S. M. Rowan, M. I. Newton and G. McHale, "Evaporation of microdroplets and the wetting of solid surfaces," *The Journal of Physical Chemistry*, vol. 99, no. 35, pp. 13268-13271, 1995. doi: <https://doi.org/10.1021/j100035a034>
- [19] H. Y. Erbil, G. McHale, S. M. Rowan and M. I. Newton, "Determination of the receding contact angle of sessile drops on polymer surfaces by evaporation," *Langmuir*, vol. 15, no. 21, pp. 7378-7385, 1999. doi: <https://doi.org/10.1021/la9900831>
- [20] Z. Wang, X. F. Peng, A. S. Mujumdar, A. Su and D. J. Lee, "Evaporation of ethanol-water mixture drop on horizontal substrate," *Drying Technology*, vol. 26, no. 6, pp. 806-810, 2008. doi: <https://doi.org/10.1080/07373930802046526>
- [21] T. Young, "III. An essay on the cohesion of fluids," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 95, pp. 65-87, 1805. doi: <https://doi.org/10.1098/rstl.1805.0005>
- [22] K. Y. Law and H. Zhao, *Surface wetting: characterization, contact angle, and Fundamentals*. Basel, Switzerland: Springer International Publishing, 2016.
- [23] U. Ali, K. J. B. A. Karim and N. A. Buang, "A review of the properties and applications of poly (methyl methacrylate) (PMMA)," *Polymer Reviews*, vol. 55, no. 4, pp. 678-705, 2015. doi: <https://doi.org/10.1080/15583724.2015.1031377>
- [24] H. S. Park, H. S. Park, M. S. Gong, "Preparation of silver/poly (methyl methacrylate) nanocomposites by in-situ radical polymerization using silver carbamate complex," *Macromolecular Research*, vol. 18, no. 9, pp. 897-903, 2010. doi: <https://doi.org/10.1007/s13233-010-0913-2>
- [25] S. M. Pawde, K. Deshmukh, "Investigation of the structural, thermal, mechanical, and optical properties of poly (methyl methacrylate) and poly (vinylidene fluoride) blends," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 114, no. 4, pp. 2169-2179, 2009. doi: <https://doi.org/10.1002/app.30641>

- [26] S. Rajendran, M. Sivakumar and R. Subadevi, "Effect of salt concentration in poly (vinyl alcohol)-based solid polymer electrolytes," *Journal of Power Source*, vol.124, no.1, pp. 225-230, 2003. doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(03\)00591-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(03)00591-3)
- [27] H. Gu, C. Wang, S. Gong, Y. Mei, H. Li and W. Ma, "Investigation on contact angle measurement methods and wettability transition of porous surfaces," *Surface and Coatings Technology*, vol. 292, pp. 72-77, 2016. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.03.014>
- [28] N. Ahmed, T. Natarajan and K. Rao, "Discrete cosine transform," *IEEE Transactions on Computers*, vol. 23, no. 1, pp. 90-93, 1974. doi: <https://doi.org/10.1109/T-C.1974.223784>
- [29] S. Roy and A. K. Pal, "An indirect watermark hiding in discrete cosine transform-singular value decomposition domain for copyright protection", *Royal Society open science*, vol. 4 no.170326,pp.1-22,2017. doi: <https://doi.org/10.1098/rsos.170326>
- [30] M. Majhi and A. K. Pal, "An image retrieval scheme based on block level hybrid dct-svd fused features," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 80, no.5, pp. 7271-7312, 2021. doi:<https://doi.org/10.1007/s11042-020-10005-5>

Application of Differential Transformation Method and Dunkerley Formula for Stability Analysis of Bars in Water

Farshid KHOSRAVI^{*a}, Kanat Burak BOZDOĞAN^b

^{a,*} Bartın Üniversitesi Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Bartın, Türkiye

^b Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Çanakkale, Türkiye

ARTICLE INFO

Received: 10.04.2021
Accepted: 10.08.2021

Keywords:
Stability,
Buckling,
DTM,
Dunkerley,
Bar in water

ABSTRACT

In this study, two methods have been proposed to find the critical buckling load of bars that are in water and buckled under the effect of P singular force and distributed self-weight. Three different Euler's cases were taken into account in the study. In the first method, the solution of the stability differential equation of the bar in water is solved by the Differential Transformation Method (DTM), while in the second method, the Dunkerley formula is applied to determine the critical buckling load factor of the buckled bar in water. Finally, the results obtained by solving an example with the two proposed methods were compared with the finite element method. SAP 2000 program was used for finite element analysis. From the results obtained, it was observed that the two methods gave results in good agreement to the finite element method.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.02.10>

Su İçerisindeki Çubuğun Stabilité Analizi için Diferansiyel Dönüşüm Yöntemi ve Dunkerley Formülünün Uygulanması

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 10.04.2021
Kabul: 10.08.2021

Anahtar Kelimeler:
Stabilité,
Burkulma,
DTM,
Dunkerley,
Suda kolon

ÖZ

Bu çalışmada su içerisinde olan ve P tekil kuvvet ve yayılı kendi ağırlığı etkisinde burkulma çubuklarının kritik burkulma yükünün bulunması için iki yöntem önerilmiştir. Çalışmada üç farklı Euler durumu dikkate alınmıştır. Sunulan yöntemlerden ilkinde su içerisindeki çubuğun stabilité diferansiyel denklemin çözümü Diferansiyel dönüşüm yöntemi (DTM) ile çözüldükçe, ikinci yöntemde Dunkerley Formülü su içerisinde burkulma çubuğun kritik burkulma yük faktörünün belirlenmesi için uygulanmıştır. Çalışmanın sonunda bir örnek önerilen iki yöntem ile çözüldükçe elde edilen sonuçlar sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile analiz için SAP 2000 programı kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlardan iki yönteminde sonlu elemanlar yöntemine yeter uygunlukta sonuç verdiği gözlenmiştir.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.02.10>

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

The use of columns has become widespread in civil, mechanical, and aerospace engineering and has a significant place among engineering structures. Therefore, extensive studies have been performed in recent decades to determine elastic columns' critical

buckling load. Euler was the first researcher that studies the buckling of a prismatic column under a compressive force or self-weight [1].

Wei et al. [2] investigated elastic bars stability with variable cross-section under self-weight and concentrated end load. They transformed governing

*Corresponding author: fmaleki@bartin.edu.tr

To cite this article: F. Khosravt, K.B. Bozdoğan "Application of Differential Transformation Method and Dunkerley Formula for Stability Analysis of Bars in Water", *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol.7, no.2, pp. 169-174, 2021.
doi:<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.02.10>

equation for EB(Euler–Bernoulli) columns into an integral equation and evaluated critical buckling load by investigating the lowest eigenvalue of the resulting integral equation. They validated the effectiveness of this method by numerical examples.

Darbandi et al. [3] studied the static stability of the variable cross-section columns under distributed axial force. They used the EB beam theory to model the column and used the singular perturbation method of Wentzel-Kramers-Brillouin to solve the problem. Wang [4] investigated the stability of columns under self-weight and a tip load. The governing equation was integrated by turning the two-point boundary value problem into an initial value problem. Four boundary conditions were studied. Optimum locations of the support for maximum load-bearing capacity were obtained. Huang and Li [5] investigated analytic approach to solve EB columns' buckling instability with arbitrarily axial nonhomogeneity and/or varying cross-section. Differential equations of buckling for different support conditions (pinned-pinned, clamped, and cantilevered columns) were derived with varying flexural rigidity and reduced to a Fredholm integral equation. The impact of the method was approved by comparing our results with existing closed-form solutions and numerical results.

Krutii and vandynskyi [6] proposed a new method to study the uniform column's buckling problem under self-weight. The method base was on the exact solution of the appropriate differential equation for a column's buckling. The solution was stated with dimensionless fundamental functions and initial parameters. The stress-strain state of the column was defined. The analytical form of the load is defined because of the dimensionless nature of the fundamental functions. The values of the buckling coefficient were determined. Wahrhaftig et al. [7] Investigated mathematical solutions of a column, including the self-weight, to obtain the critical buckling load. They Compared the analytical solutions with computation modeling.

The bar's critical buckling strength, whose weight is considered, will differ depending on whether the bar is in an air or water environment. Pekbey [8] developed self-weight buckling of the column at its top fixed and lower end fixed-roller supported in water and presented an analytical solution to determine the heavy column's critical buckling load.

The Differential Transformation Method (DTM) is an alternative method for solving differential equations. DTM was first introduced by Zhou [9]. Several studies on the method have been presented in the literature [10–16]. Holubowski and Tarczewska [17] presented the application of the DTM to the stability analysis of nonuniformly loaded beams subjected to bending. They solved two coupled ordinary differential equations with variable coefficients and parameters to obtain the critical load. Rajasekaran [18] investigated the stability of fully or partially supported heavy prismatic piles and fully supported non-prismatic piles by using DTM. Chai and Wang [19] used DTM to study the critical buckling load of axially compressed heavy columns of various support conditions. They compared obtained results with an analytical solution. Therefore, the method was also shown to be very accurate.

In this study, different from the literature, the DTM and Dunkerley formula approach is proposed to determine the critical buckling load of a rectilinear bar in water under the singular load and its weight. It is accepted that the material is linear elastic in the study.

2. METHOD (METOD)

In this study, three different Euler cases are considered in a bar under the influence of their weight in water and with a singular force P above it, as shown in figure 1.

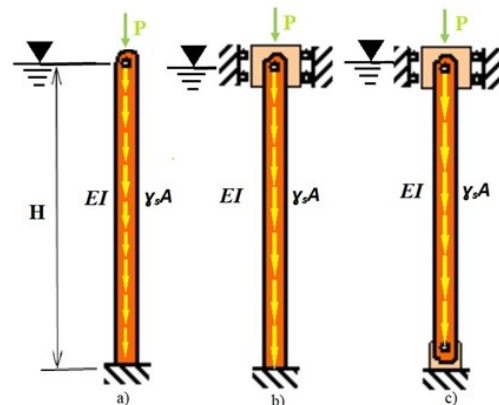


Figure 1. Three different Euler cases a) Free-Clamped b) Sliding-Clamped c) Sliding-Pinned (Üç farklı Euler durumu a) Serbest-ankastre b) Kayıcı ankastre - Ankastrée c) Kayıcı ankastre-mafsallı)

According to the given set of axes, the differential equation of stability is written as follows, using the literature [8].

$$EI \frac{d^4 y}{dz^4} + P \frac{d^2 y}{dz^2} + \frac{d}{dz} [(\gamma_s - \gamma_f)Az \frac{dy}{dz}] = 0 \quad (1)$$

where EI is the bending stiffness, P is axial singular load, and A is cross-section area, γ_s and γ_f are the bar and air's unit weight, respectively. y indicates horizontal displacement, and z indicates the axis along the bar axis. The differential Eq.(2) is obtained by integrating the differential Eq.(1).

$$EI \frac{d^3 y}{dz^3} + [P + (\gamma_s - \gamma_f)Az] \frac{dy}{dz} = c \quad (2)$$

Since the shear force is zero at the beginning of the bar for the Euler states considered according to the selected axes. The constant integration c in the differential Eq. (2) is zero. In this case, the differential Eq. (2) can be written as

$$EI \frac{d^3 y}{dz^3} + [P + (\gamma_s - \gamma_f)Az] \frac{dy}{dz} = 0 \quad (3)$$

To make the differential Eq. (3) dimensionless, the transformation given in Eq. (4) is applied, and Eq. (5) is obtained.

$$\varepsilon = \frac{z}{H} \quad (4)$$

$$\frac{d^3 y}{d\varepsilon^3} + \left[\frac{PH^2}{EI} + (\gamma_s - \gamma_f) \frac{AH}{EI} H^2 \right] \frac{dy}{d\varepsilon} = 0 \quad (5)$$

The necessary arrangements are made in the differential Eq. (5), and the differential Eq. (6) is obtained.

$$\frac{d^3 y}{d\varepsilon^3} + [n + n^* a^* (1 - b)\varepsilon] \frac{dy}{d\varepsilon} = 0 \quad (6)$$

Here n, a, and b are defined as follows.

$$n = \frac{PH^2}{EI} \quad (7)$$

$$a = \frac{\gamma_s AH}{P} \quad (8)$$

$$b = \frac{\gamma_f}{\gamma_s} \quad (9)$$

Eq. (11) is obtained by substituting Eq. (10) in Eq. (5).

$$\theta = \frac{dy}{d\varepsilon} \quad (10)$$

$$\frac{d^2 \theta}{d\varepsilon^2} + [n + n^* a^* (1 - b)\varepsilon]\theta = 0 \quad (11)$$

The boundary conditions required for the differential Eq. solution (11) are given below for three different Euler cases.

Free Clamped:

$$\varepsilon = 0 \Rightarrow \frac{EI}{H^2} \frac{d\theta}{d\varepsilon} = 0 \quad (12)$$

$$\varepsilon = 1 \Rightarrow \theta = 0 \quad (13)$$

Sliding- Clamped:

$$\varepsilon = 0 \Rightarrow \theta = 0 \quad (14)$$

$$\varepsilon = 1 \Rightarrow \theta = 0 \quad (15)$$

Sliding-Pinned:

$$\varepsilon = 0 \Rightarrow \theta = 0 \quad (16)$$

$$\varepsilon = 1 \Rightarrow \frac{EI}{H^2} \frac{d\theta}{d\varepsilon} = 0 \quad (17)$$

3. APPLICATION OF THE DTM METHOD (DTM UYGULAMASI)

If the DTM method detailed in the literature [16,20] is applied to Eq. (11) the following equation is obtained.

$$\theta[k + 2] = -\frac{[n^* \theta[k] + n^* a^* (1 - b)^* \theta[k - 1]]}{(k + 2)^* (k + 1)} \quad (18)$$

If DTM is applied to the boundary conditions, the following relations are obtained.

Free Clamped:

$$\theta[1] = 0 \quad (19)$$

$$\sum_{k=0}^N \theta[k] = 0 \quad (20)$$

Clamped Sliding:

$$\theta[0] = 0 \quad (21)$$

$$\sum_{k=0}^N \theta[k] = 0 \quad (22)$$

Sliding-Pinned:

$$\theta[0] = 0 \quad (23)$$

$$\sum_{k=0}^N k * \theta[k] = 0 \quad (24)$$

If the boundary conditions are applied for each different Euler case, the resulting transcendent equations are obtained as follows.

$$A_1(n)\theta[0] = 0 \text{ (Free Clamped)} \quad (25)$$

$$A_2(n)\theta[1] = 0 \text{ (Sliding- Clamped)} \quad (26)$$

$$A_3(n)\theta[1] = 0 \text{ (Sliding -Pinned)} \quad (27)$$

In Eq. (25), (26), and (27), n values that make $\theta[0]$ and $\theta[1]$ non-zero are the buckling load factor of the system.

4. DUNKERLEY FORMULA (*DUNKERLEY FORMÜLÜ*)

Dunkerley formula, whose theory and basic principles are given in the literature [21-22], has been adapted to the Stability Analysis of Bars in Water problem. With the Dunkerley formula [21, 22] for the critical buckling loads of the given systems, the system's total buckling load can be found with the help of the buckling loads found separately for the case of buckling in water with the effect of singular force and self-weight (Fig. 2).

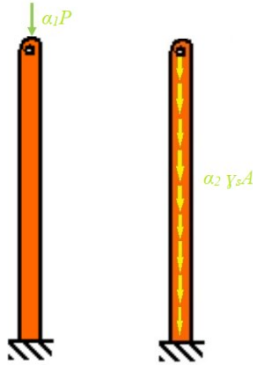


Figure 2. Application of the Dunkerley formula (*Dunkerley formülünün uygulanması*)

The critical buckling load of the given system is found by the following equation.

$$N_{cr} = \alpha_{cr} \frac{EI}{H^2} \quad (28)$$

For the single load case, the critical buckling load is written as

$$N_{cr1} = \alpha_{cr1} \frac{EI}{H^2} \quad (29)$$

The critical buckling load of a bar under the influence of its own weight is found by Eq. (30).

$$N_{cr2} = \gamma AH = \alpha_{cr2\gamma} \frac{EI}{H^2} \quad (30)$$

With the application of Dunkerley formula α buckling load factor is found by the help of Eq. (31).

$$\frac{1}{\alpha_{cr}} = \frac{1}{\alpha_{cr1}} + \frac{1}{\alpha_{cr2}} \quad (31)$$

α 's buckling load factors and are given in Table 1 for three different Euler cases considered.

Table 1. α values for Euler cases. (*Euler durumları için α değerleri*)

Euler	α_{cr} values	
	α_{cr1}	α_{cr2}
F-C	2.4674	7.8373
C-S	9.6696	18.9563
S-P	2.4674	3.4766

5. RESULTS (*SONUÇLAR*)

To investigate the suitability of the methods presented in the study, the buckling load factors of bars in air and water for three different Euler cases were calculated with the DTM and Dunkerley Formula presented in this study, and the obtained results were compared with the results of the SAP 2000 program in Table 2. Convergence of DTM method according to the number of elements is given in Table 3. In order to investigate the suitability of the methods presented in the study, the SAP 2000 program, which analyzes with the finite element method, was chosen. As the number of elements in the solution increases with SAP 2000, the obtained solution approaches the exact solution. For this reason, sufficient number of elements has been taken into account in SAP 2000 and the SAP 2000 program has been taken as a reference for the convenience of the presented methods. In the modeling with SAP2000 in water, the water effect is considered as the distributed load along the rod. In SAP 2000, the lengths of the bars are defined as 1 m and flexural stiffness $EI = 1 \text{ kNm}^2$. Bars are modeled with 5 elements and frame element type is used in

modeling. In the study, the first mode was considered as the buckling mode.

Table 2. Buckling load factors of bars in the air and water. (Havada ve su içindeki çubuğun burkulma yük faktörü)

In the air					
Euler	DTM (a)	Dunkerley (b)	FEM SAP2000 (c)	%(a-c)/c	%(b-c)/c
F-C	1.8960	1.877	1.8820	0.7439	-0.2657
C-S	6.5484	6.403	6.5497	-0.0198	-2.2398
S-P	1.4466	1.4432	1.4525	-0.4062	-0.6403
In the water					
Euler	DTM (a)	Dunkerley (b)	FEM SAP2000 (c)	%(a-c)/c	%(b-c)/c
F-C	1.9540	1.9355	1.9579	-0.1992	-1.1440
C-S	6.8433	6.6903	6.84471	-0.0206	-2.256
S-P	1.5270	1.5235	1.5328	-0.3784	-0.6067

Table 3. Convergence of DTM method according to the number of elements (Eleman sayısına bağlı olarak DTM yönteminin yakınsaklığı)

Euler	5 elements	10 elements	15 elements	16 elements
F-C	1.9782	1.9539	1.9540	1.9540
C-S	5.0724	6.7586	6.8430	6.8433
S-P	1.3619	1.5266	1.5270	1.5270

6. CONCLUSION (SONUÇ)

In this paper, two methods are proposed to find the critical buckling load for three different Euler cases of bars in water and buckled under the singular load P at the top and the distributed self-weight. In the first method, the solution of the differential equation representing the stability was performed by the DTM method, while in the second method, the Dunkerley formulation was used to find the critical buckling load. It was observed that the two methods presented from the solved example gave results compatible with the finite element method. It is seen that the DTM method gives results closer to the finite element method than the Dunkerley method. The presented methods are particularly useful in understanding the stability behavior with few parameters.

CONFLICT OF INTEREST STATEMENT (ÇIKAR ÇATIŞMASI BİLDİRİMİ)

No potential conflict of interest was reported by the authors.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] S.P. Timoshenko and J.M. Gere, *Elastic Stability*, McGraw-Hill, New York, 1961.
 [2] D.J. Wei, S.X. Yan, Z.P. Zhang, and X.F. Li,

“Critical load for buckling of non-prismatic columns under self-weight and tip force” *Mech. Res. Commun.*, vol. 37, no. 6, pp. 554–558, 2010.

[3] S.M. Darbandi, R.D. Firouz-Abadi, and H. Haddadpour, “Buckling of variable section columns under axial loading,” *J. Eng. Mech.*, vol. 136, no. 4, pp. 472-476, 2010. doi: [https://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)em.1943-7889.0000096](https://dx.doi.org/10.1061/(asce)em.1943-7889.0000096)

[4] C.Y. Wang, “Stability of a braced heavy standing column with tip load,” *Mech. Res. Commun.*, vol. 37, no. 2, pp. 210-213, 2010. doi: <https://dx.doi.org/10.1016/j.mechres.com.2009.12.001>

[5] Y. Huang and X.F. Li, “Buckling analysis of nonuniform and axially graded columns with varying flexural rigidity” *J. Eng. Mech.*, vol. 137, no. 1, pp. 73-81, 2011. doi: [https://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)em.1943-7889.0000206](https://dx.doi.org/10.1061/(asce)em.1943-7889.0000206)

[6] Y. Krutii and V. Vandynskiy, “Exact solution of buckling problem of the column loaded by self-weight” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019. vol. 708, no. 1, doi: <https://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012062>

[7] A. de M. Wahrhaftig, K. M. M. Magalhães, R. M. L. R. F. Brasil, and K. Murawski, “Evaluation of mathematical solutions for the determination of buckling of columns under self weight,” *J. Vib. Eng. Technol.*, vol. 1, no. 3, 2020. doi: <https://dx.doi.org/10.1007/s42417-020-02>

- [8] Y. Pekbey, "Su içerisinde ağırlığı dikkate alınan bir kolonun burkulma analizi," *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg.*, vol. 14, no. 2, pp. 195-203, 2005.
- [9] J. K. Zhou, *Differential transformation and its applications for electrical circuits*, Huazhong University Press, Wuhan, pp. 1279-1289, 1986.
- [10] K. B. Bozdoğan and F. Khosravi Maleki, "Application of differential transformation method for free vibration analysis of wind turbine," *Wind Struct. An Int. J.*, vol. 32, no. 1, pp. 11-17, Jan. 2021. doi: <https://dx.doi.org/10.12989/was.2021.32.1.011>
- [11] K. M. Abualnaja, "Numerical treatment of a physical problem in fluid film flow using the differential transformation method" *Int. J. Mod. Phys. C*, vol. 31, no. 5, pp. 1-8, 2020. doi: <https://dx.doi.org/10.1142/S0129183120500679>
- [12] O. A. Adeleye, M. Yusuf, and O. Balogun, "Dynamic Analysis of Viscoelastic Circular Diaphragm of a MEMS Capacitive Pressure Sensor using Modified Differential Transformation Method," *Karbala Int. J. Mod. Sci.*, vol.6,no.3,2020. doi: <https://dx.doi.org/10.33640/2405-609X.1706>
- [13] B. J. Gireesha and G. Sowmya, "Heat transfer analysis of an inclined porous fin using Differential Transform Method," *Int. J. Ambient Energy*, pp. 1-7, Sep. 2020. doi: <https://dx.doi.org/10.1080/01430750.2020.1818619>.
- [14] Y. M. Hamada, "Solution of a new model of fractional telegraph point reactor kinetics using differential transformation method," *Appl. Math. Model.*, vol. 78, pp. 297-321, Feb. 2020. doi: <https://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2019.10.001>
- [15] G. Sobamowo "On the efficiency of differential transformation method to the solutions of large amplitude nonlinear oscillation systems biomass gasification view project heat transfer enhancements and dynamic behaviour of energy systems view project on the efficiency," vol. 139, no. November 2019, pp. 1-60, 2020.
- [16] S. Aydin and K.B. Bozdoğan, "Lateral stability analysis of multistory buildings using the differential transform method," *Struct. Eng. Mech.*, vol. 57, no. 5, pp. 861-876, Mar. 2016. doi: <https://dx.doi.org/10.12989/sem.2016.57.5.861>
- [17] R. Holubowski and K. Jarczewska, "Lateral-torsional buckling of nonuniformly loaded beam using differential transformation method," *Int. J. Struct. Stab. Dyn.*, vol. 16, no. 7, pp. 1-12, 2016. doi: <https://dx.doi.org/10.1142/S0219455415500340>
- [18] S. Rajasekaran, "Buckling of fully and partially embedded non-prismatic columns using differential quadrature and differential transformation methods," *Struct. Eng. Mech.*, vol. 28, no. 2, pp. 221-238, Jan. 2008. doi: <https://dx.doi.org/10.12989/sem.2008.28.2.221>
- [19] Y. H. Chai and C. M. Wang, "An application of differential transformation to stability analysis of heavy columns," *Int. J. Struct. Stab. Dyn.*, vol. 6, no. 3, pp. 317-332, 2006. doi: <https://dx.doi.org/10.1142/S0219455406001988>
- [20] S. Rajasekaran, *Structural Dynamics of Earthquake Engineering Theory and Application Using Mathematica and Matlab*, India, Woodhead publishing, 2009.
- [21] T. Tarnai, "The Southwell and the Dunkerley Theorems" in *Summation Theorems in Structural Stability*, Springer Vienna, pp. 141-185, 1995.
- [22] L. P. Kollar and G. Tarjan, *Mechanics of Civil Engineering Structures*, vol. 4, no. 3, Woodhead Publishing, 2020.