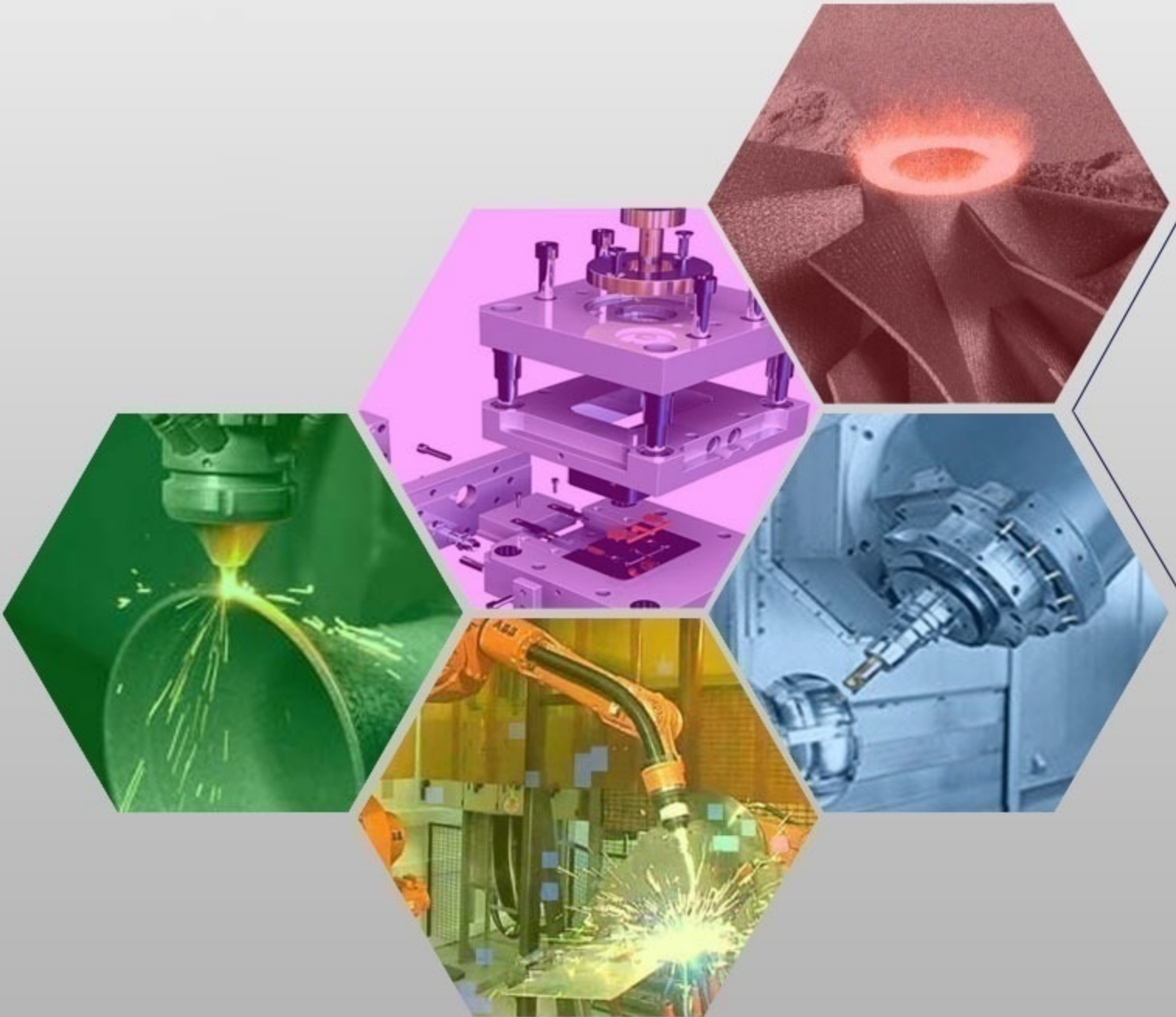




İMİLAT TEKNOLOJİLERİ VE UYGULAMALARI

CİLT:5 SAYI:1 YIL: 2024

e-ISSN: 2717-7475



MANUFACTURING TECHNOLOGIES AND APPLICATIONS

VOLUME:5 ISSUE:1 YEAR:2024



Cilt (Volume) : 5
Sayı (Issue) : 1
Yıl (Year) : 2024
e-ISSN: 2717-7475

İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları Manufacturing Technologies and Applications (MATECA)

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

Honoray Editör (Honorary Editor)

Prof. Dr. Ulvi Şeker, Gazi Üniversitesi

Baş Editör (Editor in Chief)

Prof. Dr. Mustafa Günay, Karabük Üniversitesi

Yardımcı Editör (Associate Editor)

Prof. Dr. Alaattin Kaçal, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi

Alan Editörleri (Editors)

Prof. Dr. Turgay Kıvak, Düzce Üniversitesi
Prof. Dr. Murat Sarıkaya, Sinop Üniversitesi
Doç. Dr. Yakup Turgut, Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. Serkan Apay, Düzce Üniversitesi
Dr. Munish Kumar Gupta, Opole University of Technology

Dil Editörü (Language Editor)

Doç. Dr. Mehmet Erdi Korkmaz, Karabük Üniversitesi

Teknik Editörler (Technical Editors)

Doç. Dr. Ramazan Özmen, Karabük Üniversitesi
Dr. Gürşah GÜRÜF, Karabük Üniversitesi

Danışma Kurulu (Advisory Board)

Prof. Dr. Can Çoğun, Çankaya Üniversitesi
Prof. Dr. Serdar Salman, Marmara Üniversitesi
Prof. Dr. Grzegorz M. Królczyk, Opole University of Technology
Prof. Dr. Mustafa Cemal Çakır, Uludağ Üniversitesi
Prof. Dr. Teyfik Demir, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Prof. Dr. İhsan Korkut, Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. İlyas Uygur, Düzce Üniversitesi
Prof. Dr. Ramazan Kaçar, Karabük Üniversitesi
Prof. Dr. Ulaş Çaydaş, Fırat Üniversitesi
Prof. Dr. Ayhan Erol, Afyon Kocatepe Üniversitesi
Prof. Dr. İbrahim Çiftçi, Çankırı Karatekin Üniversitesi
Doç. Dr. Mohd Fathullah Ghazali, University of Malaysia Perlis
Doç. Dr. Gültekin Uzun, Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. Çağrı Vakkas Yıldırım, Erciyes Üniversitesi
Doç. Dr. Nafiz Yaşar, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi
Assist. Prof. Dr. Mozammel Mia, Ahsanullah University of Science and Technology
Assist. Prof. Dr. Üyesi Selçuk Yağmur, Gazi Üniversitesi
Assist. Prof. Dr. Nimel Sworna ROSS, University of Johannesburg
Assist. Prof. Dr. Leonardo Rosa Ribeiro Da Silva, Federal University of Uberlândia
Dr. Catalin Pruncu, University of Strathclyde



Cilt (Volume) : 5
Sayı (Issue) : 1
Yıl (Year) : 2024
e-ISSN: 2717-7475

Yayıncı (Publisher)
Mustafa GÜNAY

Web Sayfası (Web Page)
<http://dergipark.gov.tr/pub/mateca>

Yayın Tarihi (Publication Date)
Nisan 2024 (April 2024)

Yayın Dili (Publication Language)
Türkçe / İngilizce (Turkish/English)

Yayın Aralığı (Publication Frequency)
Yılda üç kez yayınlanır (Tri-annual)

Yayın Türü (Publication Type)
Sürekli yayın (Periodical)

Kapak Tasarımı (Cover Design)
Ozan YETKİN

İletişim

Prof. Dr. Mustafa Günay (Editör)
Telefon: +90 370 4187400
E-posta: matecajournal@gmail.com, mgunay@karabuk.edu.tr

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/mateca> adresinden dergiye ilişkin bilgilere ve makalelerin tam metnine ulaşılabilir.

Contact

Prof. Dr. Mustafa Günay (Editor)
Phone: +90 370 4187400

E-mail: matecajournal@gmail.com, mgunay@karabuk.edu.tr

Information about the journal and the full text of the articles can be accessed at <https://dergipark.org.tr/tr/pub/mateca>.

İÇİNDEKİLER (CONTENTS)

Araştırma Makalesi (Research Article)	Sayfa (Page)
Sürdürülebilir ve Sistem Odaklı Bir Diş Macunu Ambalajı Tasarımı (<i>A Sustainable and System-Oriented Toothpaste Packaging Design</i>) Cansu KARDAŞ, Hüseyin Rıza BÖRKLÜ, Orhan ERDEN	1-13
Kesme Kuvvetine Bağlı Olarak Parmak Freze Hareket Denklemlerinin Sayısal Analizi (<i>Numerical Analysis of End Mill Equations of Motion in Relation to Cutting Force</i>) Bayram Sercan BAYRAM, İhsan KORKUT	14-22
8622RH ve 20MnCr5 Çeliklerinin Aşınma ve Mekanik Özelliklerine Gaz Karbürleme İşleminin Etkisinin İncelenmesi (<i>Investigation of the Effect of Gas Carburizing on the Wear and Mechanical Properties of 8622RH and 20MnCr5 Steels</i>) Dilek COŞAR, Hakan GAŞAN	23-33
A Study of The Main Electrophysical Parameters of Semiconductor - Polymer Based Composite Varistors (<i>Yarı İletken-Polimer Esaslı Kompozit Varistörlerin Ana Elektrofiziksel Parametrelerinin İncelenmesi</i>) Shafag AHADZADE, Tarana NURUBEYLİ, Igor VAKULENKO, Khangardash ASGAROV	34-45
İşlenmesi Zor Malzemelerin Tornalanması İçin En Uygun İşleme Sıcaklıklarının Makine Öğrenmesi İle Belirlenmesi (<i>Determination of the Most Suitable Machining Temperatures for Turning Hard-to-Cut Materials by Machine Learning</i>) Ebru ADIYAMAN, Ali Osman ER	46-64

Sürdürülebilir ve Sistem Odaklı Bir Diş Macunu Ambalajı Tasarımı

Cansu KARDAŞ^{1,*}, Hüseyin Rıza BÖRKLÜ², Orhan ERDEN²

¹İstanbul Sağlık ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İstanbul, Türkiye

²Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 26.07.2023

Kabul: 05.01.2024

Anahtar Kelimeler:

Sistem odaklı tasarım

Sürdürülebilirlik

Tasarım

Yeni ürün geliştirme

ÖZET

Giderek artan atıkların yarattığı çevre problemlerine çözüm bulmak için yeni yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sorunların giderilebilmesi için sadece ürün bazlı değil sistemi bütünüyle ele alan tasarım yaklaşımları da gerekmektedir. Tüm insanların kullanması gereken diş macunlarının klasik tüplerindeki diş karton ambalajı da atık konusunda öne çıkan ürünlerdendir. Bu probleme çözüm bulmak amacıyla bütüncül bir yaklaşım sergilenerek sistem odaklı tasarım uygulanmıştır. Öncelikle literatür taranarak piyasadaki ürünlerin kullanımı ve gerektirdiği davranışlar incelenmiştir. Daha sonra zihin haritaları, teknik analizler ve altı şapkalı düşünme yöntemi uygulanmıştır. Planlama, analiz, tasarım uygulama ve değerlendirme başlıkları altında bir diş macunu ambalajı tasarımı yapılmıştır. Böylece çevreye verilen zararı en aza indirgenerek hem sistem içinde hem de ürün bazlı değişikliklere gidilmiştir. Kullanıcı-ürün etkileşimi arasında kullanımı kolaylaştıran bir fark yaratılmıştır. Bu sayede diş macunu ambalajlarının kullanımında alışılmışın dışında bir sistem geliştirilerek fonksiyonel bir tasarım elde edilmiştir. Sistemin verimliliğinin üst düzeyde tutulabilmesi için ürünün kullanım esnasındaki bağlamsal ilişkisi de tasarlanmıştır. Böylece ortaya konan tasarım çözümleri sürdürülebilir bir yaklaşımı desteklemektedir.

A Sustainable and System-Oriented Toothpaste Packaging Design

ARTICLE INFO

Received: 26.07.2023

Accepted: 05.01.2024

Keywords:

System oriented design

Sustainability

Design

New product development

ABSTRACT

New approaches are needed to find solutions to the environmental problems caused by increasing waste. In order to solve these problems, design approaches that are not only product-based but also address the system as a whole are required. The outer cardboard packaging of the classic tubes of toothpaste that all people should use is also one of the products that stand out in terms of waste. In order to find a solution to this problem, a holistic approach was taken and system-oriented design was applied. First of all, the use of the products in the market and their required behavior were examined by scanning the literature. Then, mind maps, technical analysis, process analysis and the six thinking hats method were applied. A toothpaste package was designed under the headings of planning, analysis, design application and evaluation. Thus, the damage to the environment was minimized and changes were made both within the system and on a product basis. A difference has been created between user-product interaction that makes it easier to use. In this way, an unusual system was developed in the use of toothpaste packaging and a design that facilitates the functionality. In order to keep the efficiency of the system at a high level, its contextual relationship, has been designed. Thus, the design solutions presented support a sustainable approach.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Diş macunu; yaş, cinsiyet, toplum ve millet ayırt etmeksizin insanların ağız sağlığını koruması için önemli bir üründür. Uzmanlara göre günde en az iki kez dişlerin diş macunu kullanılarak fırçalanması gerekir [1]. Genellikle tüp içinde muhafaza edilen diş macunları satın alınmakta ve

*Sorumlu yazar, e-posta: kardascansu@gmail.com

To cite this article: C. Kardeş, H. R. Börklü, O. Erden, Sürdürülebilir ve Sistem Odaklı Bir Diş Macunu Ambalajı Tasarımı, Manufacturing Technologies and Applications, 5(1),1-13, 2024.

<https://doi.org/10.52795/mateca.1333136>, This paper is licensed under a CC BY-NC 4.0

kullanılmaktadır. Tüp içinde muhafaza edilen macunlara, market raflarında hijyen ve koruma gibi nedenlerle dışarıda karton bir katman daha eşlik etmelidir. Bazı diş macun markaları birden fazla katman ve ek karton paketleme gibi gereksiz bileşen içeren aşırı ambalajları nedeniyle eleştiri almıştır [2]. Ambalaj, ürünleri koruma ve saklamak için önemli olmakla birlikte bunların imalinde aşırı malzeme kullanımı maliyet ve sürdürülebilirlik gibi açılardan olumsuz olabilmektedir [3]. Karton ve türevlerin kullanıldığı paketlemelerde evsel atıkların yaklaşık olarak %20-40'ını oluşturduğundan dolayı diş macunu da dahil bazı ürünlerde endişe verici düzeydedir [4]. Bu nedenle daha sürdürülebilir alternatifler oluşturmak için farkındalık ve eylem çağrılarını bile yapılmaktadır. Örneğin market zinciri olan TESCO 2019'dan bu yana kendi işletmelerde sadece karton ambalajsız diş macunlarının satışına izin vererek yılda 3000 tondan fazla ambalaj tasarrufu sağlamıştır [5].

Ağız bakımı endüstrisindeki ambalaj atıklarını inceleyen bazı araştırmalarda diş macunu ambalajları için önemli miktarda karton kullanıldığı vurgulanmaktadır [6]. Yaşam Döngüsü Değerlendirme (LCA) çalışmaları ile diş macunu ambalajı kaynaklı çevresel etkilerin incelendiği bir çalışmada ise, karton ambalajın aşırı kullanımının; enerji tüketimi, atık oluşumu ve sera gazı emisyonlarını arttırdığı belirtilmektedir [7]. Bu bulgular, diş macunu üretiminde aşırı paketlemeyi azaltma ve daha sürdürülebilir alternatifler bulmayı gerekli kılmaktadır. Bazı market zincirleri diş macunu üreticileri bu sorunu çözmek için şimdiden adımlar atmaktadır [5]. Ambalaj boyutunu optimize etmek, katman sayısını azaltmak ve çevre dostu malzemeler kullanmak gibi önlemler almaktadırlar. Ayrıca tüketici farkındalığı ve bilincini artırma da önemlidir. Çevre bilinci yüksek tüketiciler, sosyal medya ve imza kampanyaları ile şirketleri daha sürdürülebilir paketleme yapmaya zorlamaktadır.

Bu makale sürdürülebilir, çevre dostu ve daha az atık oluşmasını sağlayan verimli bir sistem oluşturmak amacıyla diş macunu ambalajlarını araştırmayı ve geliştirmeyi hedeflemektedir.

2. LİTERATÜR TARAMASI (LITERATURE REVIEW)

Sürdürülebilir ve sistem odaklı yeni bir sistem tasarımı yapabilmek için piyasadaki diş macunları incelenmiştir. Piyasada kolaylıkla ulaşılabilen ürünler üzerinden genel bir kullanım ve tasarım değerlendirmesi yapılmıştır. Bu sayede yeni ambalaj tasarımında sürdürülebilir ambalaj çözümleri sunmanın yanında kullanım esnasında ortaya çıkan başka problemlere (viskozite, açma/kapama, sıkma vb.) çözüm aranabilecektir. İlk olarak klasik tüpte satışı sunulan ambalajlar incelenmiştir. Daha sonra tamamen farklı bir kullanım senaryosuna sahip piyasada klasik diş macunlarına göre daha az bulunan pompalı diş macunları analiz edilmiştir. Böylece yeni sistem tasarımında alışılmış kullanıcı davranışlarını değiştirilerek sürdürülebilir bir yaklaşım izlenmesi sağlanmıştır. Bu değişimlerin tasarıma nasıl yansıdığı ilerleyen bölümlerde incelenmiştir.

2.1. Klasik Tüp Diş Macunu Ambalajı Tasarımları (Classic Tube Toothpaste Packaging Designs)

Basit şekilde ve fonksiyonel klasik tüp diş macun kapları; kolay sıkma sağlayan yumuşak, bükülebilir plastik ve alüminyum malzemelerden yapılmaktadır. Genelde silindir şeklinde olup bir ucunda dar bir açıklık ve diğer ucunda boruyu kapatmak için vidalı bir kapak bulundurmaktadır (Şekil 1). Tüp etrafındaki ambalajın önünde genelde marka adı, ürün adı ve diş macununun temel özellikleri veya faydaları gibi temel bilgiler yer almaktadır. Ayrıca, diş macunu faydalarını (örneğin pırıl pırıl beyaz dişler veya ferah bir nefes gibi görsel temsil için) gösteren resimler veya grafikler bulunur. Tüpün arkasında da genelde önerilen fırçalama teknikleri ve kullanılacak diş macunu miktarı, malzeme içeriği ve geri dönüşümü gibi ayrıntılı açıklamalar bulunmaktadır. Bazılarında bir içerik listesi ve önemli güvenlik uyarıları da yer alabilir [8].



Şekil 1. Klasik tüp diş macunları (Classic tube toothpastes)

Genelde klasik bir tüp diş macun kabı tasarımı; temizlik, ağız hijyeni ve marka güvenilirliği gibi hususları sağlamayı amaçlar. Tüpün sadelik ve fonksiyonelliği, tüketicilerin diş macunu kullanmasını ve saklamasını kolaylaştırırken, marka unsurları bir markayı diğer birinden ya da aynı markanın farklı nitelikteki ürünlerinden ayırt etmeye yarar.

2.2. Pompalı Diş Macunu Ambalajı Tasarımları (Pump Toothpaste Packaging Designs)

Pompalı diş macunları geleneksel tüp diş macununa göre daha güncel ve kullanışlı olur. Pompalı diş macunu tasarımı, ürünün kolay ve kontrollü bir şekilde alınmasını sağlayan bir mekanizması içerir. Genellikle üst kısmında, üzerine veya aşağı basma ile çalışan bir pompa mekanizması bulunmaktadır (Şekil 2). Bu ambalajda satılan macunlar özellikle sıkma ihtiyacını ortadan kaldırdığı ve tek elle kullanılabilmesi için kolaylık sağlamaktadır. Brannan ve Dille [9] inceledikleri 138 kozmetik ürünü içerisinde tehlikeli ya da istenmeyen madde içermesi konusunda en saf ürünler arasına girmektedir. Tek basımda kullanıcı kontrolünde pompaya uygulanan basınç, dışarı çıkan diş macunu miktarı konusunda esneklik sağlayarak israfı önlemektedir. Pompalı diş macununun markası ve etiketi genelde kabın ön tarafında bulunur. Buna marka adı, ürün adı ve amaçlanan faydalar, tat veya belirli özellikler gibi temel bilgiler de eklenebilir. Ayrıca ürün üzerinde amacı güçlendirecek ağız sağlığıyla ilgili grafik veya resimler de yer alabilir. Kullanım talimatları, içerikler ve diğer temel bilgiler genelde kabın arkasına veya yanına yapıştırılan bir etikette bulunur.

Şekil 2. Pompalı diş macunları (Pump toothpastes)



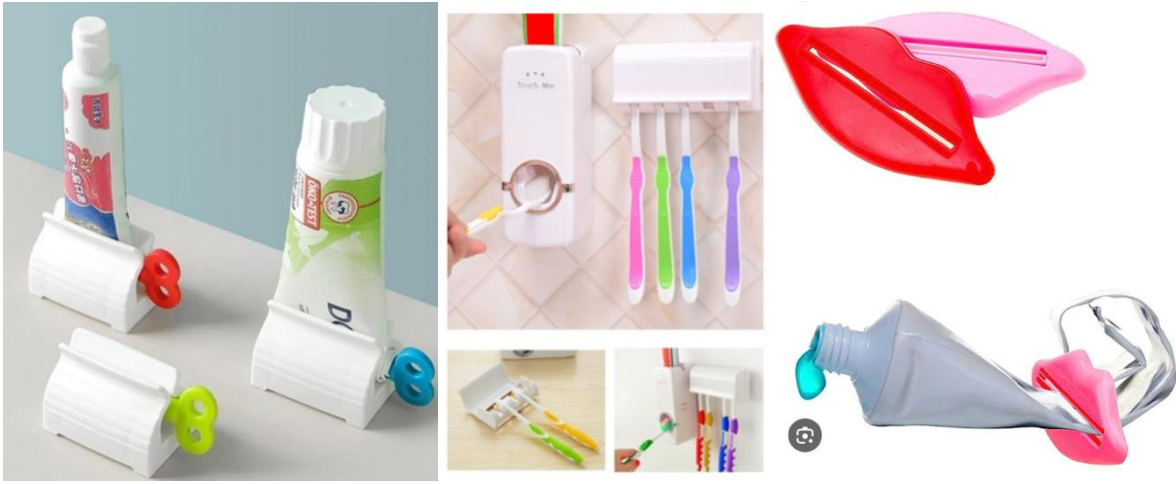
Genel olarak pompalı diş macununun tasarımı rahatlık, kontrollü dağıtım ve güncel bir estetik sunmaktadır. Diş macunu tazeli ve hijyenin korunmasını kullanıcı dostu bir deneyim de sunar.

2.3. Diş Macunu Kullanım Aparatları (Toothpaste Dispensers)

Diş macunu aksesuarları, diş macunu uygulama sürecini kolaylaştırmak ve ağız hijyenini iyileştirmek için tasarlanmış ek araçlar veya cihazları içerir (Şekil 3). Farklı tasarımlara sahip bu

aksesuarlar çeşitli tasarımlarda ve fırçalama işlemine geçilmesini daha etkili ve verimli hale getirmek için özel amaçlara hizmet etmektedirler.

Diş fırçası tutucuları, diş fırçaları için hijyenik ve düzgün bir saklama sağlamak üzere tasarlanmıştır. Plastik, seramik veya cam gibi malzemelerden farklı şekilde ve boyutta üretilmektedirler. Genelde bunlar birden çok diş fırçasını tutmak için bölme veya yuvalar içerir ve su birikmesini önlemek için de drenaj özelliklerine sahip olurlar. Diş macunu sıkacakları, kullanıcılar tarafından tüpten çıkarılacak macun miktarını ayarlamak için tasarlanmış pratik araçlardır. Genellikle plastik veya metal malzemeden yapılırlar ve manivela veya kıskaç benzeri bir mekanizmaları bulunmaktadır. Kullanıcılar, tüpü sıkacağıın çeneleri arasına yerleştirerek ve basınç uygulayarak diş macununu verimli bir şekilde sıkabilmektedir.



Şekil 3. Diş macunu sıkma aparatları (Toothpastes squeezers)

Diş macunu tüpü sıkacakları kullanıcıların tüpün içindeki diş macunundan tam olarak faydalanmasına yardımcı olan basit ve etkili araçlardır. Genellikle plastik veya metalden yapılırlar. Biçim olarak silindirik veya anahtar benzeri bir şekle sahiptirler. Kullanıcılar, sıkacağı diş macunu tüpünün ucuna kaydırarak, diş macununu açıklığa doğru itmek için sıkacağı döndürebilir veya bükülebilir. Böylece tüpün içeriğindeki diş macunundan en yüksek düzeyde faydalanılır.

Diş macunu aksesuarlarının tasarımlarında işlevsellik, hijyen ve kullanım kolaylığı ön planda tutulur. Bu aksesuarlar genel fırçalama deneyimini geliştirmeyi, uygun ağız bakımı alışkanlıklarını teşvik etmeyi ve diş macununu taze ve kolay erişilebilir tutarken kullanımını en uygun hale getirmeyi amaçlar.

3. SİSTEM ODAKLI TASARIM (SYSTEM ORIENTED DESIGN)

Sistem odaklı tasarım, etkili bir tasarım yaklaşımı olarak, toplumsal sorunların çözümüne yönelik bir temel sağlamaktadır. Bu bağlamda, sistem odaklı tasarım, toplumsal sorunların karmaşıklığını anlama ve kapsamlı çözümler geliştirme ihtiyacını vurgulamaktadır [10]. Bu kapsamda çevresel sürdürülebilirliğe yönelik giderek artan endişeyle, ürün yaşam döngüsü boyunca çevresel etkiyi en aza indiren diş macunu ambalaj tasarımına yönelik sistem odaklı bir yaklaşıma ihtiyaç duyulmaktadır. Diş macunu ambalajları, ağız bakım ürünü tüketiminde ve atık oluşumunda önemli rol oynamaktadır.

Öncelikle malzeme kullanımını ve atık oluşumunu azaltmak için minimalist bir tasarım yaklaşımı benimsenmiştir. Fazladan karton malzeme gibi gereksiz katmanlar veya işlevsiz bileşenler ortadan kaldırılması sayesinde ambalajlama kolaylaştırılmıştır. Estetik değerler taşıyan

bir ürün olmasına özen gösterilirken diş macunu ihtiyacını etkili bir şekilde karşılayan temiz, basit bir tasarıma odaklanmaya çalışılmıştır.

Tek kullanımlık ambalaj atıklarını en aza indirmek için yeniden doldurulabilir ve yeniden kullanılabilir diş macunu kaplarına ihtiyaç duyulmaktadır. Kartuşlar veya vidalı kapaklar gibi çeşitli mekanizmalar aracılığıyla diş macunu ile kolayca doldurulabilen sağlam ve kullanıcı dostu bir kap tercih edilebilir. Ancak bilinen ve kullanılan yöntemlerin gerek pazarlama yöntemleri gerekse alışılmış yöntemler kadar etki sağlamaması sebebiyle kullanımı yaygınlaştırma konusunda yeterli olmayacağı düşünülmektedir. Bu sebeple çeşitli düşünce geliştirme yöntemlerine gereksinim duyulmaktadır.

Bireysel ambalaj atıklarını azaltmak için ise satış esnasında diş macunlarının bir arada sergilenebilmesi için toplu ambalaj seçenekleri düşünülmüştür. Daha fazla oranda diş macunu alabilen ve daha büyük kapların pazarlanması tüketicilerin, daha küçük kaplarını gerektiği gibi doldurmaları için bir seçenek sunacaktır. Bu sayede birim diş macunu başına kullanılan ambalaj malzemesi miktarını azalır ve kaynak kullanımında verimlilik artar.

Ambalaj üzerinde açık ve kolay anlaşılır olacak şekilde geri dönüşüm ve imha talimatları içeren evrensel sembol sistemlerinin eklenmesi planlanmaktadır. Bu sayede tüketiciler, ambalaj bileşenlerinin geri dönüşüm için uygun şekilde ayrılması ve geri dönüştürülemeyen öğelerin uygun bir şekilde imha edilmesi konusunda bilinçlenecektir. Böylece ambalajın doğru bir şekilde geri dönüştürülme şansının en yüksek olması ve çevreye verilen zararı en aza inmesi sağlanır.

Sürdürülebilir, sistem odaklı bir diş macunu paketleme sistemi tasarlamak, tüm ürün yaşam döngüsünü dikkate alan bütünsel bir yaklaşım gerektirmektedir. Çevre dostu malzemelere, minimalist tasarıma, yeniden doldurulabilir kaplara, toplu ambalajlara, yenilikçi dağıtım mekanizmalarına ve net geri dönüşüm talimatlarına odaklanarak, diş macunu ambalajlarının daha sürdürülebilir hale gelebilmesi ve çevresel etkilerini azaltılması amaçlanmaktadır. Tüketiciler sürdürülebilirliğe giderek daha fazla öncelik verdikçe, sistem odaklı yaklaşımın benimsenmesinin yalnızca çevreye fayda sağlamakla kalmayacağı, aynı zamanda ağız bakım markalarının pazardaki başarısına ve itibarına da katkıda bulunacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmada ise sistem odaklı tasarım yaklaşımı planlama, analiz, tasarım, uygulama ve değerlendirme/destek olarak beş adımda gerçekleştirilmiştir.

4. SİSTEM ODAKLI SÜRDÜRÜLEBİLİR DİŞ MACUNU AMBALAJI TASARIMI (SYSTEM ORIENTED SUSTAINABLE TOOTHPASTE PACKAGING DESIGN)

Yeni tasarlanacak ürünlerdeki mekanizmanın yalnızca kullanıcı deneyimini iyileştirmekle birlikte ürün kullanımını optimize ederek fazla paketleme ihtiyacını azaltacaktır. Tüm bu hedeflere bütünsel bakabilmek ve aşamalı olarak tüm problemleri çözebilmek için sistem odaklı tasarım yaklaşımı kullanılmıştır. Öncelikle sürecin planlanması yapılmış, ardından aşağıda detaylıca açıklanan analizler gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada toplanan verilerle tasarım aşamasına geçilerek uygulamaya gidilmiştir. Sistemin nihai haline erişildikten sonra da değerlendirme ve destek aşamasına geçilerek diş macunu ambalajı sistem tasarımı tamamlanmıştır.

4.1. Planlama (Planning)

Bu aşamada piyasada satılan diş macunlarının ambalajlamaları incelenerek eksiklikler ve fazlalıklar irdelenmiştir. Problemlerin net olarak görülebilmesi planlamanın daha verimli olmasını sağlayacağı için zihin haritalama metodu tercih edilmiştir [11]. Bu sayede hedeflenen tasarım için ne istendiği ve olası çözümler araştırılmıştır.



Şekil 4. Planlama için zihin haritasının uygulanması (Application of brain map for planning)

Bu yöntem ile öncelikle odak noktasına konu başlığı olan sürdürülebilir diş macunu ambalajı sistem tasarımı yerleştirilmiştir. Sol tarafına ise bu konunun seçilme nedeni olan ‘karton paketleme’ ve ‘her seferinde yeni paket alınması’ problemleri şemaya dökülmüştür. Karton paketlemenin çözümü olarak ikincil ambalajın çıkarılması seçeneğine ulaşılmıştır. Fakat diş macunu tüpünün zarar görmemesi için kullanılan kartonu çıkarmanın çözüm olamayacağı anlaşılmıştır. Bu yüzden tüp formunda değişikliğe gidilmesi için macunların tüpte saklanmasının sebeplerini araştırılmıştır. İçinde barındırdığı viskozitesi yüksek akışkanların kolay ve etkili bir şekilde sıkılabilmesi için, bu tüplerin plastik ve alüminyum gibi farklı malzeme katmanlarından oluştuğu sonucuna erişilmiştir [12]. Bu haritalama için son çıkarım ise ambalajların hep bir arada örüntülü şekilde satılacağı reyonlardaki halinin de sistem tasarımı içerisinde dahil edilmesi olmuştur.

4.2. Analiz (Analysis)

Analiz aşamasında ambalajlamadan ortaya çıkan atıkların ortaya çıkardığı toplumsal ve ekolojik problemler ayrıştırılarak çözüm bulmada problemin yarattığı karmaşa giderilmeye çalışılmıştır. İlk olarak yapılan analizlere göre bir yıllık kullanım süreci içerisinde dört kişilik bir ailenin tüketim miktarının 24 tüp diş macunu olduğu kabul edilmiştir. Buradan yola çıkarak bir kişinin de yıllık tüketiminin 6 tüp olduğuna göre; iki ayda bir yeni tüp diş macunu satın alınmaktadır. Piyasada satılan klasik bir karton ambalajlı tüp diş macunun da 100 ml olduğu kabul edilmiştir. Uzmanların ağız sağlığının korunabilmesi için günde en az iki kere dişlerin fırçalanması gerektiğini söylemektedir. [13]. Bu verilere göre bir kişinin aylık diş macunu tüketimi 50 ml iken güne yaklaşık 1,66 ml; her fırçalamada ise 0,83 ml diş macunu tüketildiği bilgisi elde edilmiştir (Şekil 5).



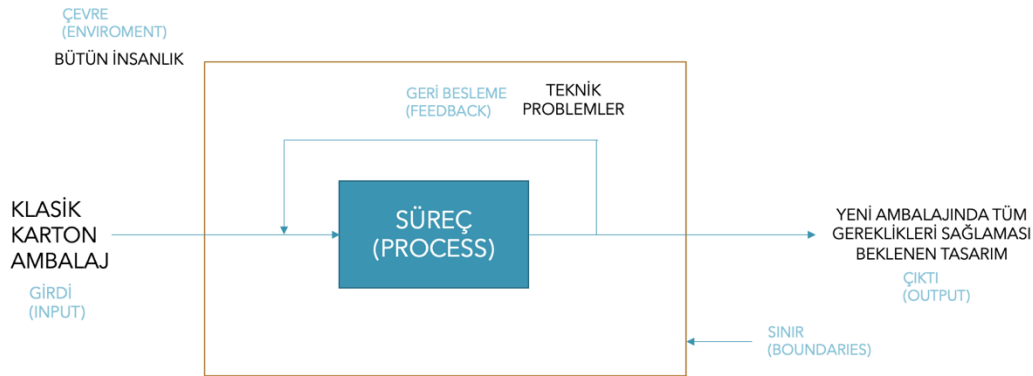
Şekil 5. Teknik analiz (Technical analysis)

Bir diş macunu tüpünün yaklaşık maliyetinin hesaplanabilmesi için tüketim oranları analiz edilmiştir (Şekil 6). Bunun için bir önceki analizdeki teknik verilerden yararlanılmıştır. Aynı şekilde piyasada satılan klasik bir tüp diş macununun yaklaşık 100 ml olduğu ve fiyatı ortalama 60 Türk lirası (06/2023) olarak kabul edilmiştir. Buradan yola çıkılarak bir kişinin yıllık tüketim maliyeti ise yaklaşık 360 Türk lirası olarak hesaplanmıştır. Bu analiz ile yeni yapılacak sistem tasarımının bu maliyetin altında kalması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 6. Tüketim oranına göre maliyet analizi (Cost analysis according to consumption rate)

Analiz aşamasının sonunda ise gidişatın net bir şekilde belirlenebilmesi için süreç analizi yapılmıştır (Şekil 7). Bu şema yeni ambalajın tasarlanması için izlenen yolun genel olarak ifade edilmesini sağlamaktadır. Öncelikle çevre için hedef kitle, herkesin kullanması gerektiğinden dolayı bütün insanlık olarak belirlenmiştir. Klasik diş macunlarının karton ambalajları bu sürecin girdisi olarak kabul edilmiştir. Her ürünün değişiklik gösteren sınırlayıcıları sebebiyle bütünü süreç olarak adlandırılmıştır. Bu sürecin aşamalarında karşılaşılan teknik problemlerin ise sürecin başına dönülerek geri besleme ile yeniden değerlendirileceği ifade edilmiştir. Son olarak sınırlar çizilerek sistem çıktısının yeni ambalaj tasarımı olduğu belirlenmiştir. Bu sayede sistemin tüm girdileri, çıktıları ve geri beslemeleri gösterilmiştir. Ayrıca kapsadığı çevre belirtilerek sınırların çizilmesi sağlanmıştır.



Şekil 7. Süreç analizi (Process analysis)

4.3. Tasarım (Design)

Zihin haritalama ve analiz yöntemleri ile ana hatları ile belirlendikten sonra tasarım aşamasına geçilmiştir. Böylece sistemin bilinen gereklilerine yönelik veriler ileri aşamalara taşınarak, analiz sonuçlarında ortaya çıkan hedeflere yaklaşmasını sağlanmıştır.

Öncelikle sürdürülebilir yaklaşımlar çerçevesinde macunun, ayrı ve sürekli kullanıma uygun haznede saklanması için sistem üç ana bileşen altında incelenmiştir. Bu bileşenler, macunu barındıran hazne, macunun iletimini sağlayacak olan pompa ve hazneyi barındıran reyon ambalajından meydana gelmektedir. Her bir bileşen kendi içerisinde fonksiyonlara ve parçalara bölünmüştür. Bu sayede tasarımın somutlaştırılması hedeflerine ulaşma Tablo 1’de listelenen bir rehber oluşturulmuştur. İlk olarak dış macununu haznenin içinden yukarıya doğru taşıyarak çıkışa ulaştırma fonksiyonunun yerine getirilmesi amacıyla ‘2.2. Pompalı dış macunu ambalajı tasarımları’ bölümünde incelenen literatürdekilerin benzeri pompalama bileşeni için altı adet parçaya ihtiyaç duyulmuştur. Bunlar; yeni eliptik akış borusu, boru tutucu, yay, yay ve iletim mili, buton ve çıkış haznesi, buton ve çıkış haznesi burcu olarak sıralanmıştır.

Dış macununun depolanmasını sağlama fonksiyonunun yerine getirilmesi için ise hazne bileşeni kullanılmıştır. Haznenin hem sürdürülebilir olabilmesi hem de işlevselliği için campet malzemeden üretilmesine karar verilmiştir. Bu malzeme sayesinde camın bakteri tutmama ve tazeliğini koruma özelliğini, PET’in ise cama göre olan hafifliği ve kırılmazlığı sayesinde tercih edilmiştir [14].

Son fonksiyon olarak ise ürünün satışı esnasında reyonda bütün halde bulunabilmesi için reyon ambalajı tasarımı ihtiyacı olduğu görülmüştür. Sürdürülebilir bir yaklaşım çerçevesinde organik malzeme içeren bir altlık biçiminde olması gerektiğine karar verilmiştir.

Tablo 1. Sistem tasarımının bileşenleri (Components of system design)

BİLEŞEN	FONKSİYON	PARÇA
Pompalama	Dış macununu haznenin içinden yukarıya doğru taşıyarak çıkışa ulaştırması	Yeni eliptik akış borusu
		Boru tutucu
		Yay
		Yay ve iletim mili
		Buton ve çıkış haznesi
		Buton ve çıkış haznesi burcu
Hazne	Dış macunun depolanmasını sağlama	Cam-pet hazne
Reyon Ambalajı	Ürünün satışı esnasında reyonda bütün halde bulundurma	Organik materyal içeren altlık

Tasarımın geliştirilebilmesi için Edward de Bono tarafından ilk kez 1985’te aynı ismi verdiği kitabında ortaya konan geliştirilen güçlü ve pratik bir düşünme yöntemi olan Altı Şapkalı Düşünme yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem bireylerin veya grupların farklı bakış açılarını keşfetmeye ve bir durumun çeşitli yönlerini dikkate almaya teşvik ederek karar verme ve problem çözmeye yönelik yapılandırılmış bir yaklaşım sağlamaktadır. Analiz 6 farklı renk şapkanın kavrama ve düşünme eylemini gerçekleştirme gerekliliklerin sağlanması ile gerçekleştirilir. Bu şapkalardan beyaz şapka; gerçekler ve bilgileri temsil ederek nesnel ve tarafsız düşünmeyi temsil eder. Kırmızı şapka ise; duyguları, sezgileri ve hisleri temsil etmektedir. Bu şapkayı giyen duygularını, içgüdülerini ve sezgilerini herhangi bir gerekçeye ihtiyaç duymadan ifade edilmelidir. Siyah Şapka; eleştirel düşünmeyi ve dikkati sembolize etmektedir. Potansiyel risklere, zayıflıklara ve potansiyel tuzaklara odaklanılması gerekmektedir. Olumsuz yönler analiz edilir ve potansiyel sorunlar veya zorluklar belirlenmektedir. Sarı Şapka; pozitif düşünmeyi ve iyimserliği temsil etmektedir. Durumun

faýdaları, fırsatları ve olumlu yönleri keşfedilmektedir. Olasılıklar, çözümler ve başarı potansiyeline odaklanılmaktadır. Yeşil Şapka, yaratıcılığı ve yanal düşünmeyi sembolize eder. Yeşil Şapka da ise; beyin fırtınası ile yeni fikirler üretme ve alternatif bakış açıları keşfedilir. Bu şapka yenilikçi düşünceyi teşvik ederek varsayımlara meydan okunmaktadır. Mavi Şapka; meta-biliş ve süreç kontrolünü temsil etmektedir. Kolaylaştırıcı veya düzenleyici rol bu şapka ile üstlenilmektedir [15].

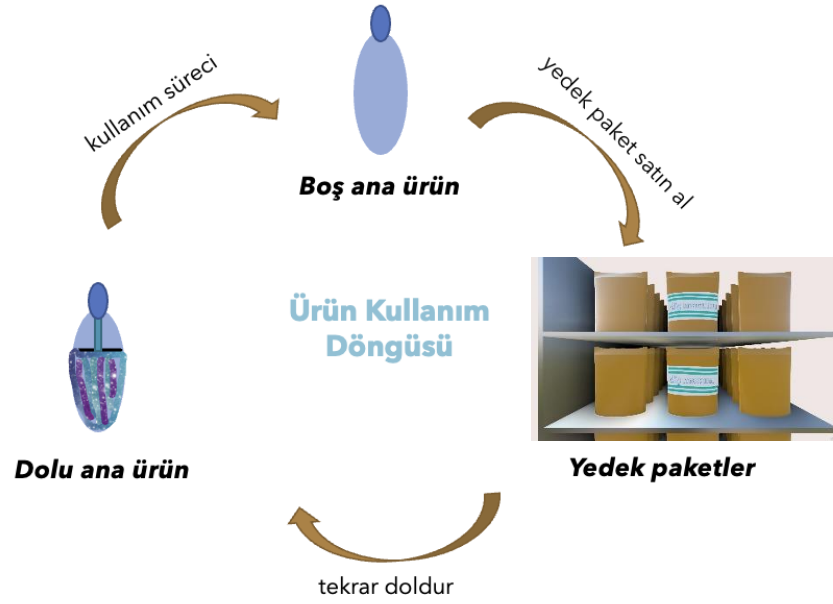
Sistem odaklı sürdürülebilir diş macunu ambalajı sistemi tasarımı için ise altı şapkalı düşünme yönteminin her basamağı için bireysel olarak gerçekleştirilen analizler Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 2. Altı şapkalı düşünme yöntemi (Six hats of thinking)

BEYAZ ŞAPKA	KIRMIZI ŞAPKA	SİYAH ŞAPKA	SARI ŞAPKA	YEŞİL ŞAPKA	MAVİ ŞAPKA
<ul style="list-style-type: none"> - <u>Klasik tüplerin kullanımı için zararlıdır?</u> Fazla atık oluşturmaın çevresel zararları - <u>Klasik tüpler bireysel ve toplam tüketim oranları açısından faydalı mı?</u> Kişi başı yılda 6 tüp diş macunu tüketimiyle evet - <u>Haznedeki akış klasik tüp formundaki verimlilikte sağlanabilir mi?</u> Daha geniş yüzey alanına sahip eliptik bir formla sağlanabilir - <u>Haznenin kullanımı klasik tüp formundaki kolaylıkta sağlanabilir mi?</u> - <u>Simulasyonlar yardımıyla denenmeli</u> 	<ul style="list-style-type: none"> - Sistemin alışılmışlığı yıkması zaman alacak - Kimi kullanıcı için kolay kullanım sağlayacağı düşünülen detaylar, onlar için zorlayıcı olabilir. 	<ul style="list-style-type: none"> - Viskozitesi diğer pompalı ürünlerdeki akışkanlara oranla daha yüksek - Sıradan tüplerin kullanımı ve ilk maliyetleri daha düşük - Sisteme alışılması zaman alacak 	<ul style="list-style-type: none"> - Çevirerek açılan dişli veya esnek mafsallı kapaklı diş macunu tüplerinin, lavabo önünde eller ıslakken açma-kapama işleminden kaynaklanan dezavantaj ortadan kalkar. - Dikey olarak bir yüzeye yerleştirilmiş sabun şişelerinin kullanımındaki kolaylık sağlanır - Çevreye verilen zarar minimize edilir 	<ul style="list-style-type: none"> - Ürünün sistem boyutunda sunulması - Reyonda sunum stratejisi için tasarimsal bir fark yaratmak - Eliptik iletim borusu sayesinde fırçanın yüzeyine uygun tek basımda fırçalama için yeterli miktarın sağlanması 	<ul style="list-style-type: none"> -Uygulama aracılığıyla kullanımın simüle edilmesi -Uygulama aracılığıyla gösterilerek kullanımın simüle edilmesi -Reyondaki sunumu aracılığıyla sistemin simüle edilmesi

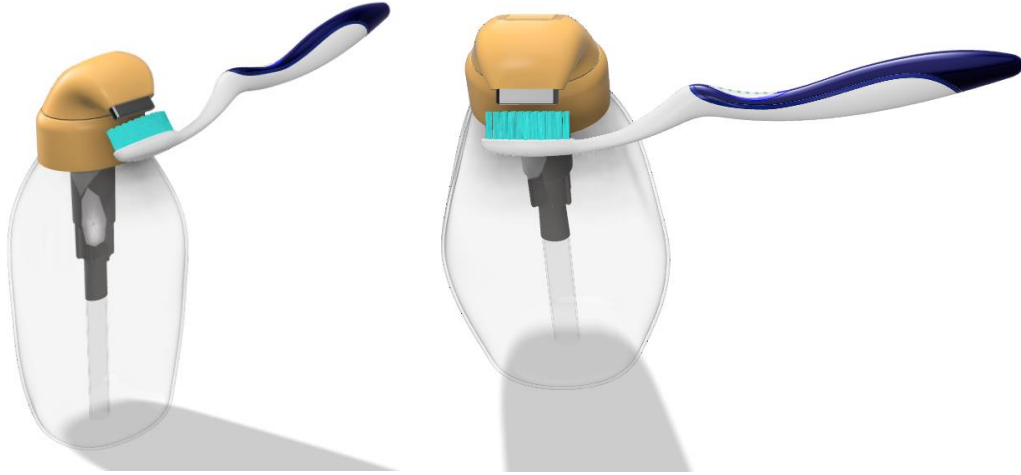
4.4. Uygulama (Practice)

Mekanik olarak diş macununun kıvamına uygun şekilde kullanımı sağlayacak sistem tasarımının uygulama aşaması için tüm gerekli verileri elde edilmiştir. Sistemin gereklilerinin, satın alma/temin etme ve kullanım sürecinin net bir şekilde ifade edilebilmesi için bu gereklilikler ve süreç şema haline getirilmiştir (Şekil 8). Buradaki senaryo; bu ürünü ilk kez satın alan kullanıcıların sistemdeki döngüsünü ifade etmektedir. Hazne içerisindeki diş macunu tükendikten sonra yedek paketlerin boş hazneye doldurularak kullanılması bu döngünün sürdürülebilir olduğunu kanıtlamaktadır. Yedek paketlerin malzemesi, homojen yapısı sayesinde atıklarının geri dönüşüm sırasında bir avantaj oluşturması sebebiyle polietilen (PE) olarak seçilmiştir [14]. Kullanıcıların 2.1. numaralı başlıkta bahsedilen klasik tüp diş macunu ambalajı tasarımlarındaki gibi, tüketim sıklığına göre temin ettiği yedek paketleri de alması gereken senaryo kurgulanmıştır. Bu paketleri marketlerin ağız ve diş sağlığı ile ilgili reyonlardan satın alması gerekecektir.



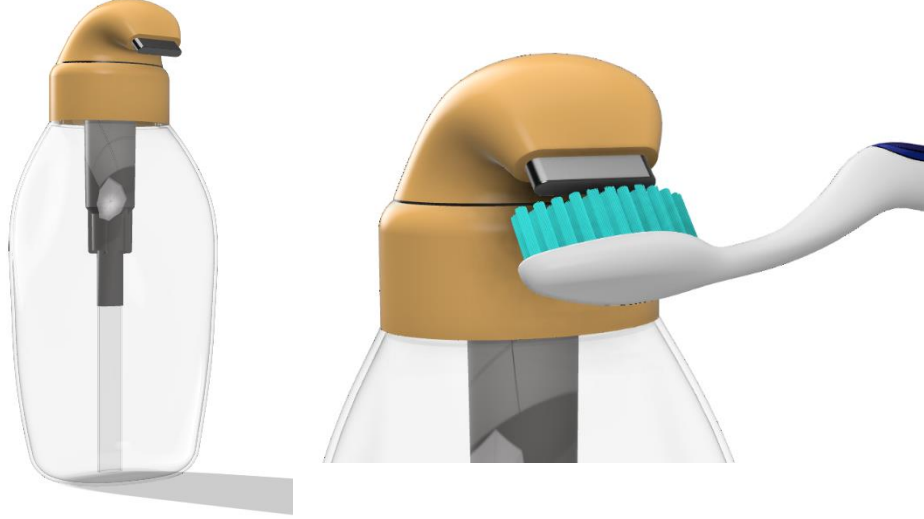
Şekil 8. Sistem kullanım senaryosu (System usage scenario)

Bu aşamaya kadar uygulanan bütün analiz yöntem ve tekniklerinden elde edilen veriler ile çizelgeler kullanılarak tasarım simüle edilmiştir. Bu varolan tüketim alışkanlığının ana ürün yerine yedek paketlerle devam ettirilmesi sağlanmıştır. Bunun için Autodesk Fusion 360 programı kullanılarak modellemesi yapılmıştır [16]. Şekil. 9’da görüldüğü gibi şeffaf bir hazneye sahip şişe içerisine diş macunu koyulabilmektedir. Pompanın eliptik yapısı sayesinde ise her bir pompalamada kişinin günlük ihtiyacı olan (teknik analiz ile ulaşılan yaklaşık 0,83 ml) oranda macun fırça üzerine sıkılabilmektedir. Bu sayede kullanıcılar rahatlıkla diş fırçası ve yeni ürün arasındaki ilişkiyi kurabilmektedir.



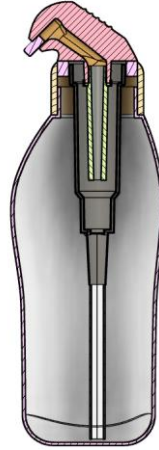
Şekil 9. Tasarımın modellenmesi (Modeling the design)

Şekil 10’da ise tasarımın genel görünümü verilmiştir. Şişenin formu belirlenirken kullanıcının rahatlığına önem verilmiştir (ergonomik olma). Bu doğrultuda pompalama bölümü benzer fonksiyonda farklı amaçlar için çalışan diğer pompalardan farklı bir biçimde tasarlanarak, üst yüzeyin kullanım kolaylığı için tırtıklı olmasına özen gösterilmiştir. Bu sayede kullanıcın eli pompanın dış yüzeyi ile temas ettiğinde kayması engellenecektir. Daha sonra bu mekanizmayı içinde barındırabilecek hatların belli olmasıyla uygun dış yüzey tasarımıyla bütünlük sağlanmıştır.



Şekil 10. Genel kullanım görünümleri (General usage views)

Şekil 11’de de kesit görünüşte diş macunu ambalajının tasarım aşamasındaki sistem tasarım bileşenlerini içerdiği görülmektedir.



Şekil 11. Kesit görünüş (Sectional view)

4.5. Değerlendirme Ve Destek (Evaluation And Support)

Kullanım senaryosu içerisinde karşılaşılan durumlar değerlendirildiğinde bu yeni tasarımın kendi içerisinde avantajları ve dezavantajları bulundurmaktadır.

Avantajları sıralanacak olursa öncelikle; yeni ürünün tasarımı sayesinde ağız bakımındaki tüketici davranışları tüm sistemde değişime uğrayacaktır. Kullanıcılar hem gereksiz ambalajlar için ödeme yapmayacak hem de üretici açısından maliyet azalacaktır. Ayrıca sürdürülebilir yaklaşımı sayesinde atık miktarının büyük oranda azalması beklenmektedir.

Dezavantajlarını belirtmek gerekirse viskoziteden kaynaklı gereken akış seviyesinde problemler ortaya çıkabilir. Bunun içinse üretimden önce akış analizi desteğine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu

sayede tasarım güvenilirliği ile boru, kesit vs. gibi bileşenlerin en uygun düzeyde verimli çalışması sağlanabilecektir. Campet malzemenin kullanım ömrü cama göre daha düşük olduğundan istenilen verimliliği sağlamayabilir bu yüzden malzeme analizi desteği gerekebilir. Malzeme analizi desteğiyle bu dezavantajın nasıl aşılabileceği, öne sürülen tasarım önerisinin güvenilirliği için önemlidir. Bu analiz sonunda malzemenin kullanım ömrü, vs. gibi niteliklerinin belirlenmesi sağlanabilecektir.

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Çalışmada sistem odaklı sürdürülebilir diş macunu ambalajı sistemi tasarımı yapılarak çevreye büyük oranda zararı bulunan fazla malzemelerin kullanımının azaltılması hedeflenmiştir. Giderek artan çevre kirliliğinin önüne geçebilmek için sürdürülebilir bir sistem yaklaşımı izlenmiştir. Bu ürünün tasarlanabilmesi için birçok analiz ve tasarım yöntemi kullanılmıştır. Öncelikle piyasada bulunan diş macunu ambalajları incelenerek genel kullanım alışkanlıkları irdelenmiştir. Bu sayede endüstriyel bir tasarımın fikrini oluşturma yolunda referans sağlanmıştır. Sonra sistem odaklı tasarım yaklaşımı gerçekleştirebilmek için planlama aşamasında; klasik tüp diş macunu kullanımındaki sorunlar şemalarla açıkça ortaya konarak çözüm önerileri sunulmuştur. İkinci olarak ise teknik, maliyet ve süreç analizleri yapılarak bazı sistem gereklilikleri belirlenmiştir. Üçüncü olarak verilen tasarım aşamasında ise tasarlanacak olan ürün bileşenlerine ayrılarak fonksiyonları belirlenmiş ve bunları yerine getirmesi istenen parçalar listelenmiştir. Daha sonra 6 şapkalı düşünme yöntemi kullanılarak sistem tasarımında planlanan fikirler değerlendirilmiştir. Dördüncü aşamada da uygulama kısmına geçirilerek planlanan sistemin şematik gösterimi verilmiştir. Daha sonra tasarım aşamasındaki bileşen-fonksiyon-parça tablosunda ortaya konan gereklilikleri sağlayacak ürün modellenmiştir. Son aşamada ise bu yeni diş macunu ambalajı tasarımının avantajları ve dezavantajları verilerek değerlendirilmiştir. Genel olarak bu tasarım klasik tüp ya da pompalı diğer diş macunu ambalajlarında ortaya çıkan problemlerin optimum düzeyde çözümü sağlanmıştır.



Yeni tasarımın tercih edilebilmesi için kullanıcıların diş macunlarının tüketimi yönündeki satın alma alışkanlıklarının değişmesi gerekmektedir. Bu değişim için ise kullanıcı her seferinde aynı ambalajı satın almak yerine, tek sefere mahsus aldığı ambalaja diş macunu doldurarak tüketimi gerçekleştirmelidir. Böylece kullanıcı ürünü tekrar satın almak istediğinde daha az bir ücret ödemesi sağlanarak teşvik edilecektir. Her gün kullanılması gereken bir ürüne yönelik bu yeni yaklaşımla diğer çevre problemlerinin çözümleri için de önayak olacağına inanılmaktadır. Bu çalışmanın yeni geliştirilecek diğer ürünlerde de benzer yaklaşımların getirilmesi için örnek olması beklenmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. C. Daly, R. Marshall, Attitudes to toothbrush renewal: A survey of Australian periodontists and dental hygienists, *Periodontol*, 17: 118-121, 1996.
2. V. Rastogi, R. Sharma, L. Yadav, P Satpute, V. Sharma, Green dentistry, a metamorphosis towards an eco-friendly dentistry: A short communication, *Journal of Clinical and Diagnostic Research*, 8(7): ZM01-2, 2014.
3. S.A. Attaran, A. Hassan, M.U. Wahit, Materials for food packaging applications based on bio-based polymer nanocomposites: A review, *J Thermoplas Compos Mater*, 30(2): 143-173, 2017.
4. T. Dereli, A. Baykasoğlu, Atıklar ve çevreye etkileri: Mühendislik cephesinden çevre sorunlarına bakış, *Endüstri Mühendisliği Dergisi*, 13(1): 28-35, 2002.
5. M. Öztürk, Kutusuz Diş Macunu, Independent Türkçe, <https://www.indyturk.com/node/567066/t%C3%BCrki%C7%87yeden-sesler/kutusuz-di%C5%9F-macunu>, 22.10.2022.

6. F. Berkhout, R. Howes, The adoption of life-cycle approaches by industry: patterns and impacts, *Resources, Conservation and Recycling*, 20(2): 71-94, 1997.
7. H.K. Jeswani, A. Azapagic, Environmental impacts of healthcare and pharmaceutical products: Influence of product design and consumer behaviour, *Journal of Cleaner Production*, 253: 119860, 2020.
8. A.Ç. Kuru, H.B. Ceylan, Sağlıklı ürün tercihinde ambalaj tasarımlarının satınalma davranışlarına etkisinin incelenmesi, *İdil Sanat ve Dil Dergisi*, 64:1741-1756, 2019.
9. K.D. Brannan, J.C. Dille, Type of closure prevents microbiol contamination of cosmetics during consumer use, *Appl. and Environ. Microbiol.*, 56: 1476-1479, 1990.
10. T. Both, Human-Centered, Systems-Minded Design, *Stanford Social Innovation Review*, <https://doi.org/10.48558/DWBY-RF41>. 2018.
11. M.S. Cohen, *Brain Mapping: The Methods*, eds A.W. Toga, J.C. Mazziotta (Academic, San Diego), 1996.
12. P. Atalı, M. Öksüz, F. Topbaşı, Fırçalamanın ve beyazlatıcılı diş macunların kompozitlerin yüzey özelliklerine etkisi, *Atatürk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Dergisi*, 24(1): 22-32. 2014.
13. A. Jahandideh, N. Tüloğlu, Ebeveynlerin ağız-diş sağlığındaki koruyucu uygulamalar hakkındaki bilgilerinin değerlendirilmesi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi*, 10(4): 403-412, 2019.
14. M.K. Eriksen, J. D. Christiansen, A.E. Daugaard, T. F. Astrup, Closing the loop for PET, PE and PP waste from households: Influence of material properties and product design for plastic recycling, *Waste Management*, 96: 75-85, 2019.
15. W.J. Carl, Six thinking hats: Argumentativeness and response to thinking model, *Proc. Annual Conference of Southern States Communication Association*, 27-31 March 1996.
16. Autodesk, Inc., *Fusion 360 (Version 2.0)*. Autodesk. <https://www.autodesk.com/products/fusion-360>, 2021.

Kesme Kuvvetine Bağlı Olarak Parmak Freze Hareket Denklemlerinin Sayısal Analizi

Bayram Sercan Bayram^{1,*} , İhsan Korkut¹ 

¹Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 14.02.2024

Kabul: 21.03.2024

Anahtar Kelimeler:

Frezeleme
Optimizasyon
Sayısal analiz

ÖZET

Frezeleme işleminin doğası gereği kesme işleminde oluşan yükler kesintili ve periyodiktir ve bu yükleri altında çalışan kesici takımında oluşan titreşimler kaçınılmazdır. Ancak uygun olmayan kesme şartları altında sisteme etki eden yükler çoğu zaman sönümlenemez ve kararsız durum olarak ifade edilen tırlamaya neden olur. Tırlama kontrol edilemeyen bir titreşim türüdür. Yüzey kalitesi, takım ömrü ve takım tezgahı bileşenleri üzerinde olumsuz etkilere sahiptir. Bu problemin ortadan kaldırılması veya engellenmesi için doğru kesme parametrelerinin belirlenmesi gereklidir. Bu çalışmada, kesme kuvvetleri altında çalışan kesici takımın kararlılığının izlenmesi, tırlama frekanslarının tahmini ve kararlı kesme şartlarının belirlenmesi için bir yöntem sunulmuştur. Sunulan yöntemde parmak freze, ankastre kiriş olarak sönümlü iki serbestlik dereceli sistem olarak modellenmiştir. Matematiksel modelin çözümünde sonlu fark denklemleri kullanılmış ve sistemin cevap fonksiyonları hesaplanmıştır. Sisteme etki eden kesme kuvvetlerinin sürekli zaman fonksiyonları deneysel ölçüm verileri kullanılarak Fourier yaklaşımı yöntemi ile F_x ve F_y kuvvet bileşenleri için sırasıyla %94.76 ve %93.81 doğruluk oranları ile elde edilmiştir. Deneylerde iş parçası olarak AISI 4140 ıslah çeliği ve kesici takım olarak 9.5 mm çapında 38° derece helis açısına sahip AlCrN kaplamalı Tungsten karbür (WC) parmak freze kullanılmıştır. Kesme parametreleri olarak iş mili hızı 3350 dev/dk, ilerleme 0.04 mm/diş ve eksenel kesme derinliği 0.5 mm şeklinde seçilmiştir. Sistemin cevap fonksiyonları bilgisayar ortamında Python programlama dili aracılığı ile gerçekleştirilmiş sonuçlar zaman alanında grafiksel olarak verilmiştir. Çalışma, sunulan yöntem ile anlık takım izlemesi, tırlama frekanslarının belirlenmesi, akıllı teknikler ile kararlı kesme aralıklarının tayin edilmesi, yüzey pürüzlülüğü, boyutsal hatalar ve takım ömrünün iyileştirilmesi gibi endüstriyel uygulamaların geliştirilmesine referans teşkil eder.

Numerical Analysis of End Mill Equations of Motion in Relation to Cutting Force

ARTICLE INFO

Received: 14.02.2024

Accepted: 21.03.2024

Keywords:

Milling
Optimization
Numeric analysis

ABSTRACT

Due to the nature of the milling process, the loads generated in the cutting process are intermittent and periodic, and vibrations in the cutting tool operating under these loads are inevitable. However, under unsuitable cutting conditions, the loads acting on the system cannot be damped most of the time and cause chatter, which is referred to as an unstable condition. Chatter is a type of vibration that cannot be controlled. It has a negative effect on surface finish, tool life, and machine tool components. In order to eliminate or prevent this problem, it is necessary to determine the correct cutting parameters. This study presents a method to monitor the stability of the cutting tool operating under cutting forces, estimate the chatter frequencies, and determine the stable cutting conditions. The end mill is modeled as a two-degree-of-freedom system damped as a cantilever beam in the presented method. Finite difference equations are used to solve the mathematical model, and the system's response functions are calculated. Continuous time functions of the cutting forces acting on the system were obtained by Fourier approximation using experimental measurement data with an accuracy of 94.76% and 93.81% for the F_x and F_y force components, respectively. In

*Sorumlu yazar, e-posta: sercanbayram@gazi.edu.tr

To cite this article: B. S. Bayram, İ. Korkut, Kesme Kuvvetine Bağlı Olarak Parmak Freze Hareket Denklemlerinin Sayısal Analizi, Manufacturing Technologies and Applications, 5(1),14-22, 2024.

<https://doi.org/10.52795/mateca.1436817>, This paper is licensed under a CC BY-NC 4.0

the experiments, AISI 4140 tempered steel was used as the workpiece, and an AlCrN-coated tungsten carbide (WC) end mill with a diameter of 9.5 mm and a helix angle of 38° was used as the cutting tool. The cutting parameters selected were spindle speed 3350 rpm, feed 0.04 mm/tooth, and axial cutting depth 0.5 mm. The response functions of the system were performed in the computer environment using the Python programming language, and the results were presented graphically in the time domain. The study is a reference for developing industrial applications such as instant tool monitoring, determination of scratch frequencies, determination of stable cutting intervals with intelligent techniques, improvement of surface roughness, dimensional errors, and tool life with the presented method.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Fizik ve mühendislik alanlarında karşılaşılan birçok problem doğrusal veya doğrusal olmayan birinci veya yüksek mertebeden diferansiyel denklemlerle ifade edilebilir. Bazı diferansiyel denklem sistemleri, analitik yöntemlerle çözülmektedir. Ancak, karmaşık problemleri ifade etmek için kullanılan diferansiyel denklem sistemlerinin analitik çözüm yolu oldukça güçtür. Hatta çoğu zaman olanaksızdır. Araştırmacılar, karmaşık problemlerin çözümünde karşılaşılan bu zorlukların üstesinden gelmek ve problemlerin çözümünü çok daha kısa ve ekonomik biçimde sonuçlandırabilmek için seri çözümlere dayalı sayısal yöntemler geliştirmiştir [1]. En bilinen ve sık kullanılan yöntemler, Sonlu Elemanlar, Sonlu Farklar ve Genelleştirilmiş Diferansiyel Kuadrature metotlarıdır. Sonlu elemanlar ve sonlu farklar metotlarının kullanım alanları teknoloji alanındaki gelişmelere paralel olarak hızla artmıştır.

Hızla gelişen alanlardan bir diğeri ise üretim teknolojileridir. Bilgisayar kontrolü ile çalışan tezgâhların geliştirilmesi ve yaygınlaşması, üretim verimliliği ve zaman tasarrufu için ciddi iyileştirmeler sağlamıştır. Üretimin gerçekleştirildiği birçok alanda sıklıkla kullanılan bilgisayar kontrollü tezgâhlar, imalatta büyük kolaylıklar ve önemli iyileştirmeler sağlamışlardır. Üretim süreçlerindeki gelişmeler ve ihtiyaçlar, araştırmacıların dikkatini çekmiş ve çalışmalarını bu konular üzerine yoğunlaştırmalarına neden olmuştur. Özellikle akıllı üretim tekniklerinin gelişmesi ile kesme sürecinin kararlılık aralıklarının belirlenmesi ve sürecin optimum şartlar altında tamamlanması adına araştırmalar yapılmıştır. Frezeleme süreci ile ilgili olarak yapılan çalışmaların önemli bir kısmı tırlama ve etkilerinin baskılanması alanında gerçekleştirilmiştir. Zhu ve Liu [2], yaptıkları araştırmada, frezeme sırasında oluşan tırlamanın tahmini, tespiti ve önlenmesi için yapılan çalışmaları derinlemesine incelemişlerdir. Yaptıkları araştırmalar sonucunda, tırlama probleminin çözümü için tırlama tahmini, akıllı sistemler ile titreşimlerin algılanması, akıllı sistemlerin tezgah iş miline entegre edilmesi, yüksek örnekleme hızlarında gerçek zamanlı verileri analiz eden kontrol sistemlerinin geliştirilmesi ve kompleks formlara sahip ince cidarlı parçaların işlenmesi sırasında tırlamanın izlenebileceği sistemlerin geliştirilmesi gibi araştırılması gereken konular için önerilerde bulunmuşlardır. Taylor [3] ve Tlustý [4] tırlamanın temel sebeplerini rejeneratif etkiye bağlamışlardır. Rejeneratif etki; periyodik ve kesintili frezeleme süreci sırasında, takım tezgahı modlarından birisi uyarılırsa sistem kararsızlığa girerek rejeneratif tırlamayı meydana getirir. Frezelemenin doğası gereği kesme işlemi kesintilidir. Kesintili ve periyodik olan kuvvetlerin etkisi ile oluşan titreşimler kaçınılmazdır. Zorlanmış titreşim şeklinde de ifade edilen bu titreşimlerin etkisiyle, kesici takım iş parçasının yüzeyinde dalgalar bırakır. Kararsız kesme işleminde ardışık iki dalga arasında faz farklıdır. Stabil kesme işleminde ise yüzeyde oluşan dalgalar aynı fazdadır bu da talaş kalınlığı ve kesme kuvvetlerinin kısmen değişmediği anlamına gelir. Değişken yükler takım aşınması ve boyutsal tolerans değerlerinin artmasına neden olur.

Kararlı kesme işlemi için tezgâhın kararlılık diyagramlarının önceden belirlenmesi önemlidir. Literatürde konu ile ilgili birçok çalışma görülmektedir [5-10]. Kararlı kesme aralıklarının tespit edilmesinde kullanılan Stabilitelob diyagramı (SLD), işlemeyi stabilize etmek için uygun kesme

parametrelerinin seçilmesinde kullanılan bir yöntemdir [11]. SLD, kararlı bir kesme süreci için iş mili hızına bağlı olarak kesme derinliğinin sınırlarını belirleyebilir. SLD için kesme kuvveti katsayıları ve sistemin dinamik davranışı önemli girdi parametreleridir. Kesme kuvveti katsayıları kararlı kesme sınırlarının belirlenmesinin yanı sıra boyutsal hataların tahmin edilmesinde de kullanılır. Katsayıların hesaplanması, mekanistik yöntem olarak bilinen ve araştırmacılar tarafından kabul görmüş metoda dayanır [12]. Sistemin dinamik davranışı, deneysel olarak elde edilen frekans tepki fonksiyonu (FRF) olarak tanımlanabilir. Sistemin dinamik davranışını belirlemek için yani FRF'ni ölçmek için çekiç testi olarak bilinen klasik yöntem kullanılabilir [13]. Frezeleme operasyonlarının kararlılık sınırlarının analizinde kullanılan farklı yöntemlerde mevcuttur. En bilinen yöntemlerden bazıları, sıfır dereceli yaklaşım (ZOA) [14], çoklu frekans çözümü (MFS) [15] ve genişletilmiş çoklu frekans çözümü (EMFS) [16] şeklinde sıralanabilir. Sayılan yöntemlerin hepsi FRF'yi doğrudan kullanırlar. Kararlılık lob diyagramları çok kısa süreler içerisinde elde edilse de tahminler ve ölçümler arasındaki farklar nedeni ile pratik olarak birçok sorun barındırır. Sorunun temel nedeni, kesme mekaniği modellerinin basitleştirilmesi, varsayımlar ve hesaplama katılmayan dinamik faktörler olarak verilebilir. Bununla beraber sistemin analiz edilmesi için kararlılık lob diyagramlarının hesaplanmasını gerektirmeyen çeşitli sayısal yöntemler geliştirilmiştir. Fu ve ark. [17], tırlamanın anlık tespit edilmesinde sinyalleri işlemek için Hilbert-Huang dönüşümünü kullanmışlardır. Çalışmalarının temelinde, enerji toplama karakteristiğine dayalı Hilbert-Huang dönüşümü şeklinde tanımladıkları sayısal bir çözüm yöntemi sunmuşlardır. Sistemin doğal frekanslarında toplanan titreşim enerjisinin, tırlama oluşumunu yansıtan önemli bir sinyal olduğunu belirtmişlerdir. Schmitz [18] çalışmasında, anlık frezeleme ses sinyallerini analiz edilmesiyle tırlamanın tanımlanması için ses sinyallerine dayalı bir yöntem önermiştir. Zhang ve ark. [19], Gizli Markov Model (HMM) ve Yapay Sinir Ağları (YSA) kullanarak tırlama titreşimlerini izlemek için hibrit bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Navarro-Devia ve diğerleri [20], frezeleme için tırlama tespitinde kullanılan yöntemler hakkında detaylı bir araştırma yaparak güncel yöntemleri kapsamlı bir şekilde sunmuşlardır. Çalışmalarında vardıkları sonuca göre tırlama tahminlerinin performansının, kullanılan sinyal tipine, sinyal işleme tekniğine, kullanılan yapay zeka modellerinin seçimine ve eğitimine bağlı olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca tahminlerin doğruluğunun artırılması için titreşim sinyalleri ile birden fazla sinyal ve özellikler kullanıldığında tahminlerin doğruluğunun artacağını belirtmişlerdir. Tran, Liu ve Elsis [21], kararsız kesme koşullarında oluşan titreşimlerin tespit edilmesi için, mikrofon ve ivmeölçer sensörlerinin kullanıldığı çok sensörlü veri füzyonu yöntemini önermişlerdir. Tırlamanın algılanmada ses ve titreşim verilerinin analiz ederek birden fazla sinyali gösterge olarak kullanmışlardır. Akıllı çok sensörlü veri füzyonu şeklinde ifade edilen yöntem ile toplanan verilerin analizi ve sınıflandırılması için akıllı tekniklerden yararlanmışlardır. Ses ve titreşim verilerinden gelen rezonans frekansları için bant genişliklerinin gürültünün tanınmasında etkin bir özellik olduğunu belirtmişler. Önerdikleri yöntemin %97.66 doğruluk oranıyla tırlama tespitini yapabildiği ifade etmişlerdir. Chen ve diğerleri [22], parmak frezeleme prosesi için tırlama ve tırlama frekansı tahmininden oluşan yeni bir anlık tırlama izleme sistemi geliştirmişlerdir. Kararlı bir kesme işlemi sırasında frezeleme sinyalleri temel olarak iş mili ile ilgili frekans bileşenlerinden oluşur. Normalde sinyalin enerjisine bu periyodik frekans bileşenleri hakimdir. Sistem tırlama eğilimi gösterdiğinde izlenen sinyallerin periyodik durumunda yeni frekans bileşenleri ortaya çıkacaktır. Tırlamanın artışı ile sinyallerdeki baskın frekanslar bileşenlerin yerini tırlama frekansları alacaktır ve tırlama frekanslarının enerjisi artmış olacaktır. İşte buradaki enerji değişimi yapılan çalışmada tırlamanın tespiti için bir gösterge olarak alınmıştır. Stavropoulos ve ark. [23], frezelemede titreşimlerin neden olduğu tırlamanın tespiti için varyasyonel mod ayrıştırmasının (VMD) iyileştirilmiş versiyonunu kullanmışlardır. Yöntemde, titreşim sinyalleri VMD ile ayrıştırmışlar ve analiz için bilgi içeren modları belirlemişlerdir. Seçilen modlardan çıkarılan özellikler akıllı tekniklerin eğitiminde kullanmışlardır. Destek vektör

makinelerini ile sistem durumunu tahmin etmek için matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Önerdikleri yöntem ile %93 oranında doğruluk ve hızlı bir tespit sağladıklarını belirtmişlerdir. Özşahin ve ark. [24], frezeleme operasyonlarında meydana gelen tırlama tipindeki titreşimlerin verimliliğe olumsuz etkilerinin minimize edilmesi için çalışmışlardır. Kararlılık diyagramlarını kullanarak, farklı tutucu ve takım kombinasyonlarının iş mili dinamiği ve işlem kararlılığı üzerindeki etkilerini araştırılmışlardır. Çomak ve diğerleri, frezeleme süreçleri sırasında oluşan titreşimleri etkileyen parametreler üzerine araştırmalar yapmış ve oluşan titreşimlerin tespiti için geliştirilen analitik yöntemleri deneysel olarak incelemiş ve sonuçlarını çalışmalarında vermişlerdir. Li ve Shin [25], yaptıkları çalışmada, parmak frezeleme için genel kesme şartları altında zaman alanında kesme sürecini simüle eden bir model sunmuşlardır. Araujo ve diğerleri [26], talaş kaldırma işlemlerinde kesici olarak kullanılan parmak frezeleme işlemini iki serbestlik dereceli bir sistem olarak modellemiş ve iş parçasına göre kesicinin titreşim analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Chandiramani ve Pothala [27], tornalama operasyonunda ortogonal kesme işlemi için iki serbestlik dereceli bir model ile kesme dinamiklerini analiz etmişlerdir. Yapılan çalışmada sistemin modellenmesi ve çözümlenmesi karmaşık denklemlerin çözümünü gerektirmektedir. Kompleks problemlerin çözümlerinde sayısal metotlar kullanıldığında hesaplama işlemleri çok daha hızlı olabilir [28]. Bu çalışmada literatürden farklı olarak parmak freze, periyodik ve kesintili kesme kuvvetleri etkisi altında ankastre giriş olarak iki serbestlik dereceli sönümlü bir sistem şeklinde modellenmiştir. Problemin çözümü için sonlu fark denklemleri ile iterpolasyon uygulanmış ve zaman alanında çözümler elde edilmiştir.

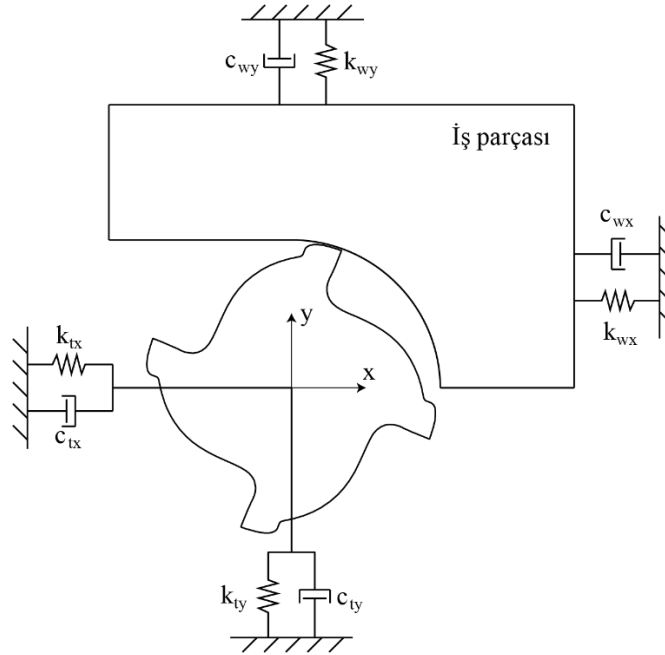
2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Modelleme ve Analiz (Modeling and Analysis)

Frezelemede kesme dinamiği oldukça karmaşık yapıdadır. Teorikte tüm dinamik faktörlerin hesaplanması oldukça güçtür hatta imkansızdır. Çoğu zaman karmaşık mühendislik problemlerinin çözümünde yaklaşık çözümler aranır. Bu sayede, çözülmesi zor ve maliyetli problemler sayısal metotlar kullanılarak çok daha hızlı ve etkin şekilde çözülebilir. Kesme sürecinin performansı, yapısal ve harici dinamik faktöre doğrudan bağlıdır. Sürecin performansı ise çıktı kalitesi ve maliyeti önemli ölçüde etkiler. Uygun bir maliyet ve kalite dengesinin yakalanması için bu faktörlerin etkilerinin optimize edilmesi gerekir.

Yapısal veya harici dinamik etkilerin tamamen ortadan kaldırılması çoğu zaman mümkün değildir. Ancak, tasarım parametreleri, dinamik etkiler göz önüne alınarak belirli tolerans aralıkları arasında belirlenebilir. Bu yüzden, mühendisler tasarımlarını, üretim sürecine uygun tolerans aralıklarında tasarlar. Ancak, yüksek hassasiyet isteyen üretimlerde veya kesme performansının iyileştirilmesi gibi çalışmalarda, sistemin dinamik etkilerinin minimize edilmesi gerekebilir. Bunun için sistem dinamiklerinin iyi araştırılması ve anlaşılması gereklidir.

Karmaşık geometriye parmak freze ve iş parçası, problemin basitleştirilmesi için iki serbestlik derece ve sönümlü yay sistem şeklinde modellenmiş ve Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. İki serbestlik dereceli sönümlü yay sistemi (Two degrees of freedom damped spring system)

Sistemin analiz edilmesi aşağıda verilen hareket denklemlerinin çözümünü gerektirir.

$$\ddot{x}(t) + 2\xi_x\omega_n\dot{x}(t) + \omega_n^2x(t) = \frac{\omega_n^2}{k_x}F_x(t) \quad (1)$$

$$\ddot{y}(t) + 2\xi_y\omega_n\dot{y}(t) + \omega_n^2y(t) = \frac{\omega_n^2}{k_y}F_y(t) \quad (2)$$

Hareket denklemlerinin sayısal çözümü için sistemin ayrıklaştırılması gerekir. Bunun için türevin analitik formu kullanılabilir. Burada, sürekli bir $y=f(x)$ fonksiyonu n adet (x_i, y_i) ayrık noktalardan oluştuğu kabul edilirse, herhangi bir x_i değerine karşılık gelen y_i değeri, uygulanacak interpolasyon teknikleri ile yaklaşık olarak bulunabilir. Sürekli $f(x)$ fonksiyonun türevleri, $f'(x), f''(x), \dots, f^n(x)$ yerine eşyerleşim polinomları kullanılarak çözüme gidilir. Bu yöntem için yaygın olarak kullanılan ileri, merkezi ve geri fark formülleri kullanılır. Eş. 1 ve Eş. 2 ile verilen denklemler, fark denklemleri kullanılarak ayrık zaman çözümü aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$x(t) = \frac{F_x(t)+x(t-\Delta t)\left[\frac{c_x}{2\Delta t}-\frac{m_x}{(\Delta t)^2}\right]-x(t+\Delta t)\left[\frac{m_x}{(\Delta t)^2}+\frac{c_x}{2\Delta t}\right]}{\left(k_x-\frac{2m_x}{(\Delta t)^2}\right)} \quad (3)$$

$$y(t) = \frac{F_y(t)+y(t-\Delta t)\left[\frac{c_y}{2\Delta t}-\frac{m_y}{(\Delta t)^2}\right]-y(t+\Delta t)\left[\frac{m_y}{(\Delta t)^2}+\frac{c_y}{2\Delta t}\right]}{\left(k_y-\frac{2m_y}{(\Delta t)^2}\right)} \quad (4)$$

İfadelerde verilen $\omega_n, \zeta_x, \zeta_y$ ve k_x, k_y ifadeler, doğal frekans, yapısal sönüm oranları ve yay sabitleridir. Sisteme etki eden kuvvetler zamana bağlı olarak F_x ve F_y şeklinde tanımlanmıştır. Eş. 3 ve Eş. 4'te yer alan $m_{x,y}$ ve $c_{x,y}$ katsayıları aşağıda verildiği gibidir:

$$\begin{aligned} m_x &= \frac{k_x}{(2\pi\omega_n)^2} & ; & \quad m_y = \frac{k_y}{(2\pi\omega_n)^2} \\ c_x &= 2\pi\zeta_x m\omega_n & ; & \quad c_y = 2\pi\zeta_y m\omega_n \end{aligned} \quad (5)$$

Verilen sistem için x_0 ve v_0 başlangıç şartları ile bilgisayar ortamında, genel programlama dili Python ile interpolasyon yapılarak sayısal çözümler elde edilmiştir. Takım için dairesel giriş varsayımı yapılmış ve direngenlik katsayısı için Eş. 6 ile verilen ilişki kullanılmıştır:

$$k = \frac{3E\pi d^4}{64L^3} \quad (6)$$

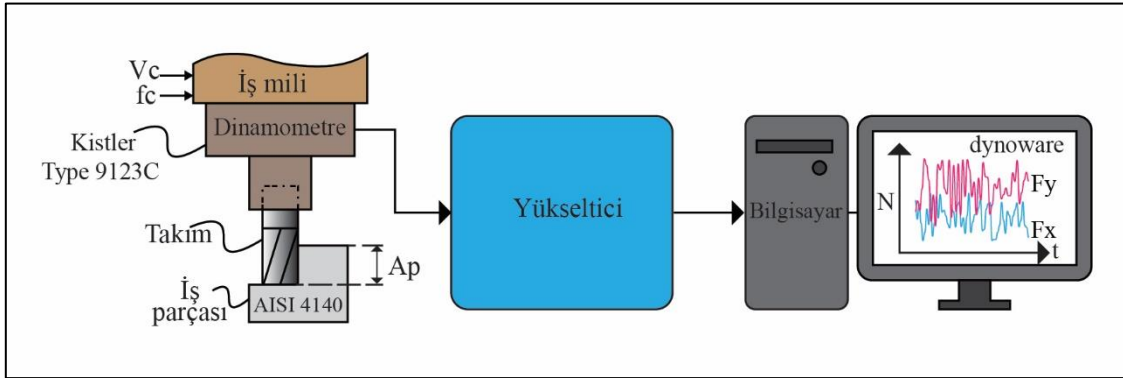
Eş. 6’te yer alan E takım Young modülüdür, d ve L sabitleri ise takım geometrisine bağlı olarak sırasıyla takım çapı ve uzunluk değerleridir. Denklemden verilen sabitlerin değerleri, çözümlerde kullanılmak üzere Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Parametreler (Parameters) [26].

Takım Çapı (d)	Uzunluk (L)	Sönüm Kat. (c)	Elastik Mod. (E)	İş mili hızı (ω)
9.5 mm	20 mm	20 Nm/s	200 GPA	3550 dev/dk

2.2. Deney Düzenegi (Experimental Setup)

Bu çalışmada, frezeleme deneylerinde iş parçası olarak AISI 4140 ıslah çeliği kullanılmıştır. İş parçası 0.5 mm sabit aksel derinlikte işlenmiş ve kesme kuvvetleri ölçülmüştür. Kesici takım olarak 9.5 mm çapında 38° derece helis açısına sahip Tungsten karbür (WC) hammaddesinden üretilmiş AlCrN kaplamalı 4 ağızlı parmak freze kullanılmıştır. Frezeleme sırasındaki işleme parametreleri için, iş mili hızı 3350 dev/dk ve diş başı ilerleme 0.04 mm/diş seçilmiştir. Kesme işlemi sırasında oluşan kuvvetler Kistler Type 9123C marka ve model üç eksenli kuvvet ve tork ölçebilen dönel dinamometre ile 10 kHz örnekleme aralığında ölçülmüştür. Deney düzeneginin şematik gösterimi Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Deney düzenegi diyagramı (Experimental setup diagram)

3. DENEY VE OPTİMİZASYON SONUÇLARI (EXPERIMENT AND OPTIMIZATION RESULTS)

Zorlanmış kuvvet altındaki bir sistemin genel hareket denklemi daha önce verilmişti. Bu denklemlerin sayısal olarak çözümlenmesi için sisteme etki eden kuvvetleri ifade eden kuvvet fonksiyonunun veya hesaplanacak noktadaki kuvvet değerlerinin bilinmesi gerekir.

Çalışmada, sisteme etki eden kuvvet değerlerini ifade eden zamana bağlı bir fonksiyon bulmak için, bir dinamometre yardımı ile frezeleme kuvvetleri ölçülmüştür. Kuvvet değerlerinin genel formu sinüzoid şeklindedir. Ayrık zaman formunda olan dijital verilerin zamana bağlı sürekli bir fonksiyon olarak tanımlaması için Fourier yaklaşımı olarak bilinen matematiksel yöntem kullanılabilir.

DeneySEL ölçümlerle elde edilen kuvvet verilerinden Fourier yaklaşımı metodu ile zamana bağlı sinüzoidal kuvvet fonksiyonları elde edilmiştir.

Fourier serisinin genel matematiksel gösterim Eş. 7’te verildiği gibidir:

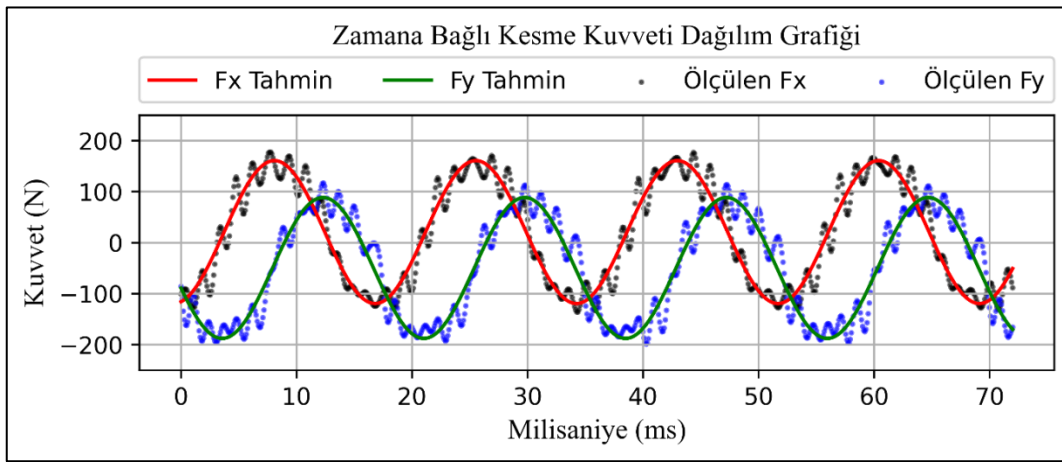
$$f(t) = a_0^{x,y} + a_1^{x,y} \cos(\omega_{x,y} t) + b_1^{x,y} \sin(\omega_{x,y} t) \quad (7)$$

Elde edilen kuvvet fonksiyonlarının gerçek değerlere göre tahmin performansı, optimum katsayı değerleri için Tablo 2’de verilmiştir:

Tablo 1. Kuvvet fonksiyonu için katsayılar ve performansları (Coefficients and performances for the force function)

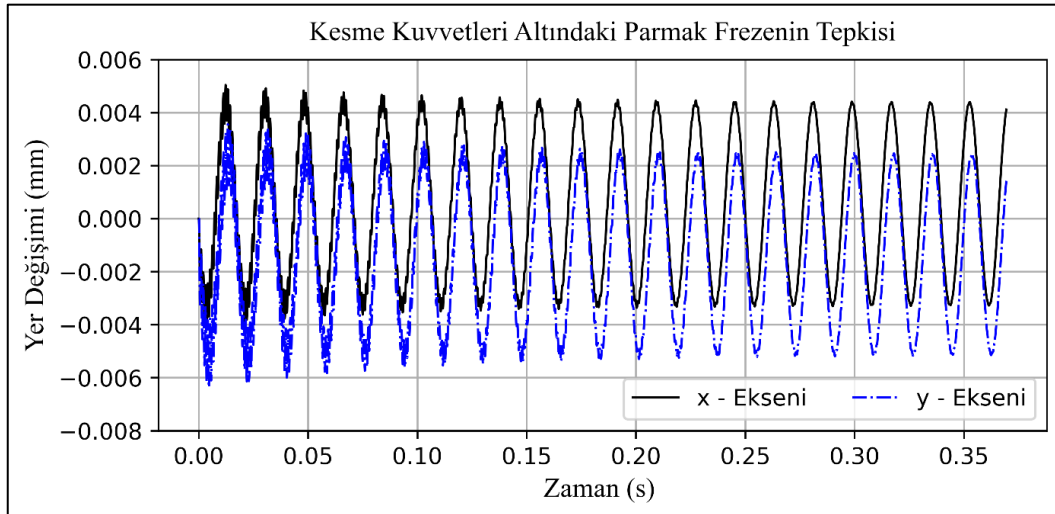
	A_0	A_1	B_1	ω	R^2
F_x	20.52	-44.06	-133.1	0.3510	0.9476
F_y	-49.86	5.733	-138.1	0.3505	0.9381

Kuvvet fonksiyonu ile yapılan tahminler ve gerçek kuvvet verilerinin karşılaştırılması Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 3. Kuvvet fonksiyonunun ve deneysel sonuçların karşılaştırılması (Comparison of force function and experimental results)

Parmak freze ile yapılan talaş kaldırma işlemleri için sunulan dinamik denklemler, sonlu farklar yöntemi sayısal olarak çözümlenmiştir. Sıralı çözümler bilgisayar yardımı ile Python programlama dili kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sönüm katsayısı, Young modülü ve bağlama mesafesi, uzunluğu (l/d) değerleri Tablo 1’de verilmiştir. Yapılan sayısal çözüm için sistemin cevabı Şekil 4’te gösterilmiştir.



Şekil 4. Kesme kuvvetleri altındaki sistemin cevabı (Response of the system under cutting forces)

Şekil 4’te verilen grafik, kesme sırasında takıma etki eden kuvvetlere sistemin verdiği tepkileri ifade etmektedir. Kesici takımın iş parçasına dalma anından sonra 0.1-0.15 saniye aralığında kararlı duruma geçtiği görülmektedir. Grafik incelendiğinde kesme kuvvetlerinin sönümlendiği ve kararlı bir kesme işleminin devam ettiği çıkarımı yapılabilir. Kesme kuvvetlerinin varlığında parmak frezede üzerinde oluşan titreşimler kaçınılmazdır. Dikkat edilmesi gereken nokta, kesme sırasında oluşan titreşimlerin harmonik bileşenlerinden herhangi birisinin takım tezgâhı sisteminin doğal frekansları ile çakışmamasıdır. Doğal frekansların birbirleri ile çakışması sistemin rezonansa girmesiyle ve kararsız durumun ortaya çıkmasına neden olur. Yapılan çalışma ile sistemin tepki fonksiyonları kullanılarak bu istenmeyen durumların engellenmesi için uygulamalar geliştirilebilir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, periyodik kesme kuvvetleri altında çalışan kesici takım sistemi matematiksel olarak modellenmiş ve sayısal olarak çözümlenmiştir. Kesme kuvveti fonksiyonları Fourier yaklaştırması olarak bilinen yöntemle zamana bağlı olarak elde edilmiştir. Ölçüm sonuçlarına göre, zamana bağlı kuvvet fonksiyonları ile yapılan tahminlerin F_x ve F_y bileşenleri sırasıyla %94.76 ve %93.81 doğrulukta olduğu gösterilmiştir. Sunulan yöntem ile kesme kuvvetleri altındaki kesici takım sisteminin cevap fonksiyonları hesaplanmış ve zamana bağlı sonuçları Şekil 4’te verilmiştir.

Sunulan yöntem, endüstriyel alanda frezeleme sürecinin kararlılığı, takım ömrü, yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal hatalar gibi birtakım tahminlerin gerçekleştirilmesine imkân tanır. Frezeleme sürecinin anlık takibi ve kontrolünün yapılabilmesi için gerçek zamanlı uygulamaların geliştirilmesine katkıda bulunabilir.

Sunulan yöntem için kesin sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Kuvvet sinyalleri. Fourier yaklaştırması yöntemi kullanılarak zamana bağlı sürekli $f(t)$ kuvvet fonksiyonları elde edilmiştir. Elde edilen fonksiyonların gerçek kuvvet verilerine göre doğruluğunun F_x bileşeni için %94.76 ve F_y bileşeni için ise %93.81 olduğu gösterilmiştir.
- Kesme kuvvetleri altındaki sistemin cevabı, zaman alanında elde edilmiş ve Şekil 3’te grafiksel olarak verilmiştir. Grafiğe göre sistemin yaklaşık 0.1-0.15 saniye süresi içerisinde kararlı kesme aralığına ulaştığı görülmüştür.
- Çalışmada verilen problemin sunulan sayısal yöntemle çözülebileceği gösterilmiştir.
- Sunulan matematiksel model ile sistemin cevaplarının elde edilebileceği kanıtlanmıştır.

Sunulan yöntem kararlı durum için kesme parametrelerin tahmin edilmesi, anlık kesme sürecinde sistem davranışlarının kontrolü ve tırlama gibi istenmeyen durumların baskılanması gibi uygulamaların geliştirilmesine referans niteliğindedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından desteklenmiştir (Proje No: BAP-FYL-2021-7274).

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. R. Bellman, J. Casti, Differential quadrature and long-term integration, Journal of Mathematical Analysis and Applications, 34(2):235-238, 1971.
2. L. Zhu, C. Liu, Recent progress of chatter prediction. detection and suppression in milling, Mechanical Systems and Signal Processing, 143, 2020.
3. F.W. Taylor, On the Art of Cutting Metals, American society of mechanical engineers, California, 1906.

4. J. Tlustý, Stability of machine tool against self-excited vibration in machining, *Int. Prod. Eng Res. Conf-Proc.*, 465-474. 1963.
5. K. Li, S. He, H. Liu, X. Mao, B. Li, B. Luo, Bayesian uncertainty quantification and propagation for prediction of milling stability lobe, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 138, 2020.
6. J. Tlustý, W. Zaton, F. Ismail, Stability lobes in milling, *CIRP Annals*, 309–313, 1983.
7. E. Budak, Y. Altintas, Analytical prediction of stability lobes in milling, *CIRP Annals*, 357-362. 1995
8. A. Çomak, E. Budak, Eşzamanlı frezeleme operasyonlarının dinamiği ve kararlılığı, 3. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTIS 2012). 4-5 Ekim 2012, Ankara, Türkiye.
9. Y. Altintas, Y. Cao, Virtual design and optimization of machine tool spindles, *CIRP Annals*, 379–382, 2005.
10. Y. Altintas, *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations and CNC Design*, 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge, 2012.
11. Z.-Q. Yao, X.-G. Liang, L. Luo, J. Hu, A chatter free calibration method for determining cutter runout and cutting force coefficients in ball-end milling, *Journal of Materials Processing Technology*, 1575–1587, 2013.
12. E. Budak, Y. Altintaş, E.J.A. Armarego, Prediction of milling force coefficients from orthogonal cutting data, *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 216–224, 1996.
13. K. Kiss, D. Hajdu, D. Bachrathy, G. Stepan, Operational stability prediction in milling based on impact tests, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 103:327–339, 2018.
14. Y. Altintaş, E. Budak, Analytical prediction of stability lobes in milling, *CIRP Annals*, 357–362, 1995.
15. E. Budak, Y. Altintas, Analytical prediction of chatter stability in milling-part I: general formulation, *ASME*, 120-29, 1998.
16. D. Bachrathy, G. Stepan, Improved prediction of stability lobes with extended multi frequency solution, *CIRP Annals*, 411–414. 2013.
17. Y. Fu et al., Timely online chatter detection in end milling process, *Mech Syst Signal Process*, 668–688, 2016.
18. T.L. Schmitz, Chatter recognition by a statistical evaluation of the synchronously sampled audio signal, *Journal of Sound and Vibration*, 262(3): 721–730, 2003.
19. C.L. Zhang, X. Yue, Y.T. Jiang, W. Zheng, A hybrid approach of ANN and HMM for cutting chatter monitoring, *Advanced Materials Research*, 3225–3232, 2010.
20. J.H. Navarro-Devia, Y. Chen, D.V. Dao, H. Li, Chatter detection in milling processes—a review on signal processing and condition classification, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 125(9): 3943–3980, 2023.
21. M.-Q. Tran, M.-K. Liu, M. Elsisı, Effective multi-sensor data fusion for chatter detection in milling process, *ISA Transactions*, 514–527, 2022.
22. D. Chen, X. Zhang, H. Zhao, H. Ding, Development of a novel online chatter monitoring system for flexible milling process, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 159, 2021.
23. P. Stavropoulos, T. Souflas, C. Papaioannou, H. Bikas, D. Mourtzis, An adaptive. artificial intelligence-based chatter detection method for milling operations, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 124(7): 2037–2058, 2023.
24. O. Özşahin. E. Budak, H.N. Özgüvenc, Frezeleme esnasındaki tezgâh dinamiğinin belirlenmesi ve modellenmesi, 6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2015), 5-7 Kasım 2015, İstanbul, Türkiye.
25. H. Li, Y.C. Shin, A comprehensive dynamic end milling simulation model, *J Manuf Sci Eng.*, 86–95, 2005.
26. C. Araujo, P. Pacheco, M. Savi, Dynamical analysis of an end milling process, 20th International Congress of Mechanical Engineering, 2009.
27. N.K. Chandiramani, T. Pothala, Dynamics of 2-dof regenerative chatter during turning, *Journal of Sound and Vibration*, 290:448–464, 2006.
28. M. Aydın, B. Kuryel, G. Oturaç, G. Gündüz, Diferansiyel denklemler ve uygulamaları, Baris Yayinlari Fakulteler Kitabevi, Ankara, 2019.

8622RH ve 20MnCr5 Çeliklerinin Aşınma ve Mekanik Özelliklerine Gaz Karbürleme İşleminin Etkisinin İncelenmesi

Dilek COŞAR^{1,*}, Hakan GAŞAN²

¹ TUSAŞ-Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş., Ankara, Türkiye

² Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 23.02.2024

Kabul: 26.03.2024

Anahtar Kelimeler:

Karbürizasyon

Temperleme

Mikroyapı

Aşınma direnci

Arka aks dişlileri

ÖZET

Bu çalışmada, otomotiv arka aks dişlilerde kullanılan malzemelerden 8622RH ve 20MnCr5 çeliklerinin karbürizasyon işlemi sonrası mekanik özelliklerinin karşılaştırılması amaçlanmıştır. 8622RH ve 20MnCr5 çelikleri, 930 °C sıcaklıkta, %1.2 C ortam konsantrasyonunda 395 dakika süre ile gaz karbürizasyon işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonra sıcaklık 830 °C'ye düşürülmüş ve ortam konsantrasyonu %0.9'a set edilmiştir. Bu sıcaklıkta da numuneler 60 dakika tutulmuştur. Karbürizasyon işlemi ardından numuneler 100 °C'deki yağ banyosu içinde 30 dakika bekletilmiştir. Bu adımdan sonra, temper prosesi gerçekleştirilmiştir. Temperleme prosesi 175 °C'de 110 dakika süre ile gerçekleştirilmiştir. 8622RH ve 20MnCr5 çeliklerinin ısıl işlem öncesi ve sonrası mikroyapı analizleri, sertlik ölçümleri, darbe ve aşınma deneyleri yapılarak, sonuçlar ortaya konmuştur. Mikroyapı incelemelerinde geleneksel metalografi ve taramalı elektron mikroskopisi (SEM) teknikleri kullanılmıştır. Malzeme mikroyapılarının birbirine benzer olduğu, karbürizasyon işlemi sonucunda her iki malzemenin de mekanik özellikleri arasında çok farklılık olmasa da 8622RH malzemesinin yüzey sertliğinin, 20MnCr5'e göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durumun 8622RH çeliğinin içeriğindeki Ni ve Mo alaşım elementlerinin yüksek sertleşebilme yeteneğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Her iki malzemenin aşınma oranları karşılaştırıldığında ise, 20MnCr5 çeliğinin aşınma miktarının, 8622RH çeliğine göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Malzemelerin aşınma direnci ile sertliklerinin doğrudan ilgisi olması sebebiyle, yüksek sertliğe sahip olan 8622RH malzemesinin aşınma dayanımının daha yüksek olması beklenen bir sonuçtur.

Investigation of the Effect of Gas Carburizing on the Wear and Mechanical Properties of 8622RH and 20MnCr5 Steels

ARTICLE INFO

Received: 23.02.2024

Accepted: 26.03.2024

Keywords:

Carburization

Tempering

Microstructure

Wear resistance

Rear axle gears

ABSTRACT

In this study, it was aimed to compare the mechanical properties of 8622RH and 20MnCr5 steels used in automobile rear axle gears after carburizing process. 8622RH and 20MnCr5 steels were subjected to gas carburizing at 930 °C and 1.2% C ambient concentration for 395 minutes. The temperature was then reduced to 830 °C and the media concentration was set to 0.9%. Samples were kept at this temperature for 60 minutes. After carburization, the samples were kept in an oil bath at 100 °C for 30 minutes. After this step, the tempering process was carried out. The tempering process was carried out at 175 °C for 110 minutes. Microstructure analysis, hardness measurements, impact and wear tests were performed on 8622RH and 20MnCr5 steels before and after heat treatment and the results were presented. Conventional metallography and scanning electron microscopy (SEM) techniques were used in the microstructural investigations. Although the material microstructures are similar to each other and there is not much difference in the mechanical properties of both materials as a result of the carburization process; It has been observed that the surface hardness of 8622RH material is higher than that of 20MnCr5. This is thought to be due to the high hardenability of the Ni and Mo alloying elements in the content of 8622RH steel. When the wear rates of both materials are compared, it is seen that the wear amount of 20MnCr5 steel is higher than 8622RH steel.

*Sorumlu yazar, e-posta: dilek_hurma@hotmail.com

To cite this article: D. Coşar, H. Gaşan, 8622RH ve 20MnCr5 Çeliklerinin Aşınma ve Mekanik Özelliklerine Gaz Karbürleme İşleminin Etkisinin İncelenmesi, Manufacturing Technologies and Applications, 5(1),23-33, 2024.

<https://doi.org/10.52795/mateca.1441901>, This paper is licensed under a CC BY-NC 4.0

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde teknolojinin hızla gelişmesiyle birlikte, otomotiv sektöründe kullanılan malzemelerin, artan maliyetler sebebiyle uzun ömürlü olmaları beklenmektedir. Bu durum, öncelikli olarak malzemelerin aşınma dayanımlarını arttırmakla sağlanabilir. Malzemelerin birbirleri üzerinde çalışıyor olması bu durumu daha da birincil öncelikli hale getirmektedir. Özellikle otomotiv ve havacılık sektöründe, malzemelerin aşınması kritik bir konu haline gelmektedir [1, 2].

Malzemelerin performansları ve ömürleri konu olduğunda; aşınma en önemli özelliklerden biridir. Aşınmanın yanı sıra, malzemelerin sertlik, mikroyapı gibi mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi, malzemelerdeki çatlak oluşumu ihtimallerinin düşürülmesi gibi konularda oldukça önem taşımaktadır [4].

Malzemelerde aşınma direncinin artırılması; farklı alaşım elementlerinin malzemenin kimyasal kompozisyonunda yer alması, malzemeye uygun olacak şartlar altında ısıl işlem uygulanması ve malzemelere çalışacağı yer ve karşısındaki malzeme göz önünde bulundurularak kaplama yapılması ile gerçekleştirilebilir [2,3].

%0.2-%0.65 arasında karbon içeren çeliklere, kullanılacakları yerlere göre mekanik özellikler kazandırılabilir. Bu çelikler çoğunlukla, yüksek dinamik zorlamalar altında çalışan parçalar için kullanılırlar. Örneğin; miller, akslar, muylular, dişliler gibi [5].

Otomotiv dişlilerinin üretiminde kullanılan malzemelerin seçimi, araçların performansı ve dayanıklılığı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. 8622RH malzemesi, otomotiv dişlileri için popüler bir seçenek olup, iyi karbürizasyon kabiliyeti ve mukavemet özellikleri nedeniyle tercih edilmektedir. Ancak, üretim maliyetlerini düşürmek veya malzeme tedarikindeki sınırlamaları aşmak gibi nedenlerle, alternatif malzeme arayışları da sürdürülmektedir.

20MnCr5, karbürizasyon için bilinen ve sıklıkla kullanılan başka bir alaşımdır. Bu alaşım, ısıl işlem sonrası mükemmel yüzey sertliği ve çekirdekte yüksek tokluk sunar, bu nedenle dişliler gibi ağır yük altında çalışan otomotiv parçaları için idealdir. 8622RH malzemesinin karbürizasyon işleminin sonuçlarıyla, 20MnCr5 malzemesinin aynı işlem koşulları altında ısıl işlem görmesi ve sonucunda elde edilen mekanik ve aşınma özelliklerinin karşılaştırılması, önemli bir araştırma konusudur [1,6].

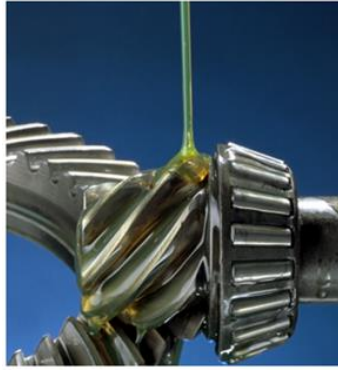
Karbürizasyon, yüzey sertleştirme işlemlerinden biri olup, çeliğin yüzey katmanının karbon içeriğini artırarak yüzeyin sertliğini ve aşınma direncini iyileştirmeyi amaçlar. Bu işlem, özellikle yüksek temas stresine ve aşınmaya maruz kalan parçalar için tercih edilir. Araştırma ve geliştirme çalışmalarında, karbürizasyon işlemi uygulanmış farklı çelik malzemelerin performansının karşılaştırılması, optimum malzeme seçimi ve işlem koşullarının belirlenmesi açısından büyük önem taşır [7].

Bu sayede, 8622RH çeliğin yerine 20MnCr5 çeliğin kullanılabilirliği ve bu iki malzemenin işlem koşulları altındaki performans farklılıkları belirlenebilir. Böylece otomotiv dişlileri gibi kritik uygulamalar için maliyet-etkin ve performans açısından uygun malzeme seçimlerine karar verilebilir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Deneysel Çalışmalar (Experimental Studies)

Bu çalışmada, otomotiv arka aks mekanizmalarındaki Şekil 1’de görülen ayna- pinyon dişlilerde kullanılan 20MnCr5 ve 8622RH malzemelerin kimyasal bileşimleri, spektrometre ile belirlenmiş olup, Tablo 1’ de verilmiştir.

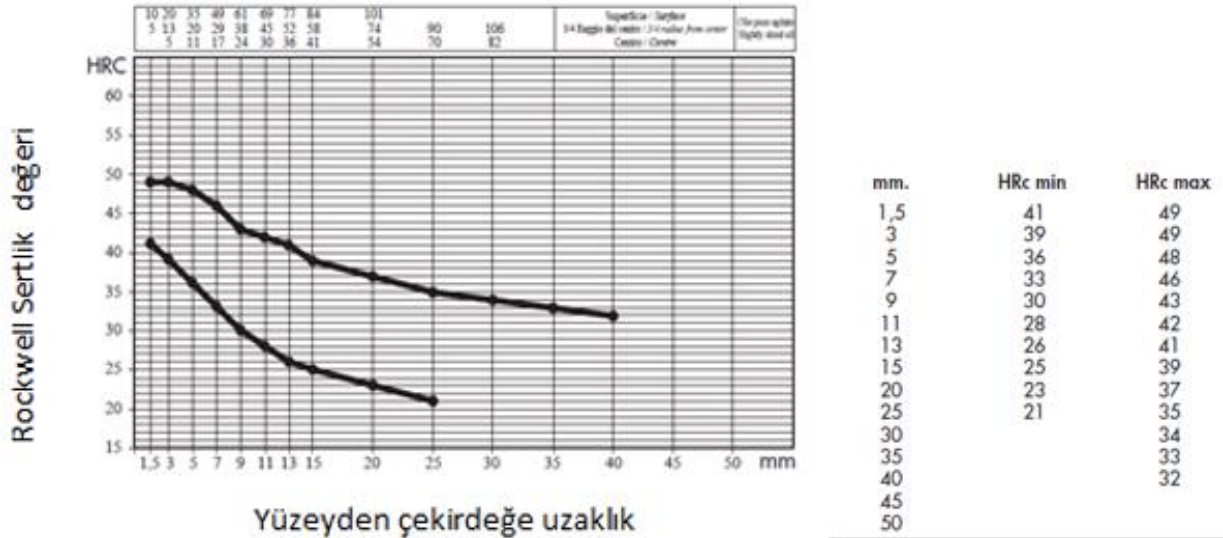


Şekil 1. Arka aks dişlileri (Ayna-pinyon dişli) (Rear axle gears- Bevel-pinion gear)

Tablo 1. 20MnCr5 ve 8622RH çeliklerinin spektrometre ile elde edilen kimyasal bileşimleri (Chemical compositions of 20MnCr5 and 8622RH steels obtained by spectrometry)

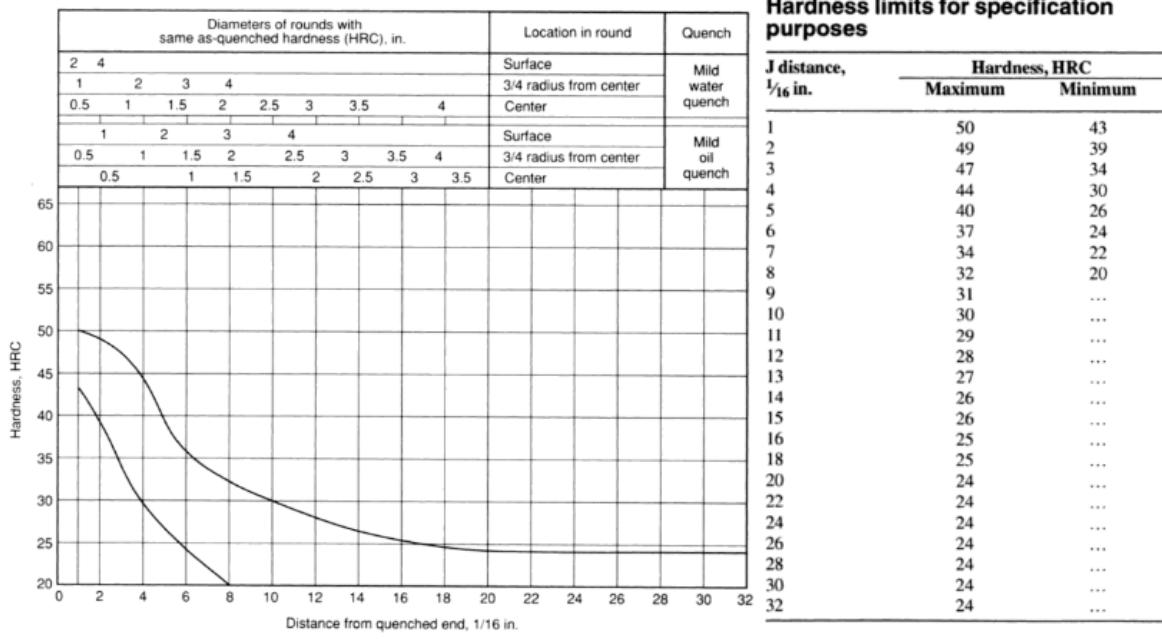
Kimyasal Kompozisyon								
%	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo
20MnCr5	0.218	1.14	0.013	0.02	0.27	1.09	-	0.016
8622RH	0.23	0.76	0.012	0.018	0.27	0.47	0.56	0.18

20MnCr5 çelikleri; yüksek aşınma dayanımına sahip, piston, kam mili, dişli ve diğer mekanik kontrol mekanizmalarında kullanılan malzemedir. Aşağıdaki grafikte, 20MnCr5 çeliğinin yüzeyden çekirdeğe doğru muhtemel sertlik değişimi Şekil 2’de görülmektedir [8].



Şekil 2. 20MnCr5 çeliğinin yüzeyden çekirdeğe doğru sertlik değişimi (Hardness variation of 20MnCr5 steel from surface to core) [8]

8622RH çeliği, dişlilerde kullanılan çelik olup, sertleşebilirliği Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 3.8622 RH çeliğinin yüzeyden çekirdeğe doğru sertlik değişimi (Hardness variation of 8622RH steel from surface to core) [8]

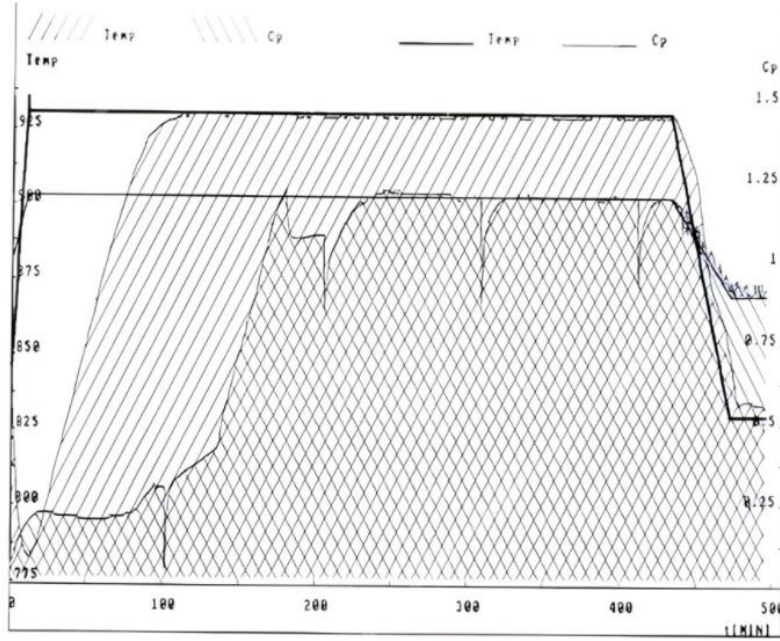
2.1.1. Numunelerin hazırlanması (Preparation of samples)

Çalışmada, 8622RH ile 20MnCr5 malzemeleri ile 5'er adet Charpy darbe test numunesi ISO 148-1 standardına göre (55x10x10 mm) hazırlanmıştır.

20MnCr5 ve 8622RH numuneleri, Aichelin marka ısıtma fırınında 930 °C sıcaklıkta, 1.2 C ortam konsantrasyonunda, 395 dk bekletilmiş, daha sonra numuneler yağ banyosuna alınmadan önce fırın 830 °C sıcaklığa kontrollü olarak düşürülmüştür. Bu adımla birlikte C konsantrasyonu 1.2'den 0.9'a düşmektedir. 830 °C'de parçalar 60 dk bekletilmiştir. Prosesteki bu kontrollü sıcaklık düşüşü, tane büyümesini önleme amaçlı gerçekleştirilmektedir [7]. Fırın ısıtma sistemi elektrik enerjisi ile olup, fırın atmosferi metan ve propan gazlarından oluşmaktadır. Numuneler, gaz atmosferinde karbonlama işleminden sonra, 100 °C'deki Isorapid 459 adlı hidrokarbon-mineral yağda 30 dakika bekletilerek, direkt sertleştirme işlemine tabi tutulmuşlardır. Bu işlemlerden sonra temperleme işlemi 175 °C'de 110 dakika süre ile gerçekleştirilmiştir. Isıl işlem parametreleri Tablo 2'de, Şekil 4'de ise, 20MnCr5 ve 8622RH malzemelerine uygulanan karbürleme işlemi süresince (455 dk), fırın atmosferindeki sıcaklık değişimi görülmektedir.

Tablo 2. Isıl işlem parametreleri (Heat treatment parameters)

Proses Değerleri	
Karbürleme Sıcaklığı	930 °C
Fırındaki karbon Yüzdesi	%1.2
Yağ Geçmeden Önceki Sıcaklık	830 °C
830 °C'deki fırın karbon yüzdesi	%0.9
Toplam Karbürleme Süresi	455 dk
Yağ Sıcaklığı	100°C
Yağda Bekleme Süresi	30 dk
Temperleme Sıcaklığı	175 °C
Temperleme Süresi	110 dk



Şekil 4. Isıl işlem prosesi süresince gerçekleşen fırın sıcaklık bilgileri (Oven temperature information during the heat treatment process)

Isıl işlem prosesi sonrasında numuneler zımparalama ve parlatma işlemlerine tabi tutulmuştur. Parlatma işlemi sonrasında, numuneler %5 Nital çözeltisi ile dağlanmıştır [9].

2.1.2 Aşınma deneyleri (Wear tests)

Aşınma deneyleri, ısıl işlemlenmiş ve orjinal malzemelere CSM marka test cihazında uygulanmıştır.

Malzemelerin kullanıldığı koşullarda, adhesiv aşınma ortamı oluşabileceği için, numunelere öncelikle adhesiv test uygulanmıştır. Çalışmada, en yaygın test yöntemi olan ball-on disk test yöntemi seçilmiştir. Arka aks mekanizmasında kullanılan Castrol 75W/85 diferansiyel yağı, adhesiv test esnasında da kullanılmıştır. Malzemelere karşı aşındırıcı olarak WC bilya kullanılmıştır. Aşındırıcı bilya malzemeye 20N yük ile çok uzun aşınma mesafelerinde uygulanmasına rağmen, test sonunda belirgin aşınma izleri gözlenememiştir. Bu nedenle aşınma testleri abrasiv koşullarda da gerçekleştirilmiştir.

Abrasiv aşınma testlerinde numuneler, 180 meşlik SiC zımparalar ile, yüzeye 10 N yükte temas ettirilmiştir. Aşınma deneyi, 50 cm/sn hızda, 100'er m'lik artışlarla, 1000 m mesafeye kadar uygulanmıştır. Aşınma parametreleri, Tablo 3'te verilmiştir. Numunelerin yeni aşınmamış partiküllerle aşındırılmasının sağlanabilmesi için her 100 m'de SiC zımpara kağıtları yenilenmiştir. Her 100 m sonunda numuneler ± 0.0001 g hassasiyetindeki hassas terazi ile tartılarak, aşınma kayıpları belirlenmiştir.

Tablo 3. Aşınma parametreleri (Wear parameters)

Aşınma Parametreleri

Disk Çapı: 10.24 [mm]	Malzeme: 8622RH & 20MnCr5	Sıcaklık: 25[°C]
Hız: 50.00 [cm/s]		Atmosfer: Hava
Yük: 10.00 [N]		Nem: 35.00 [%]

Numunelerin spesifik aşınma hızları Eş.1'deki formül kullanılarak belirlenmiştir.

$$K = \frac{\Delta m}{\rho L F} \quad (1)$$

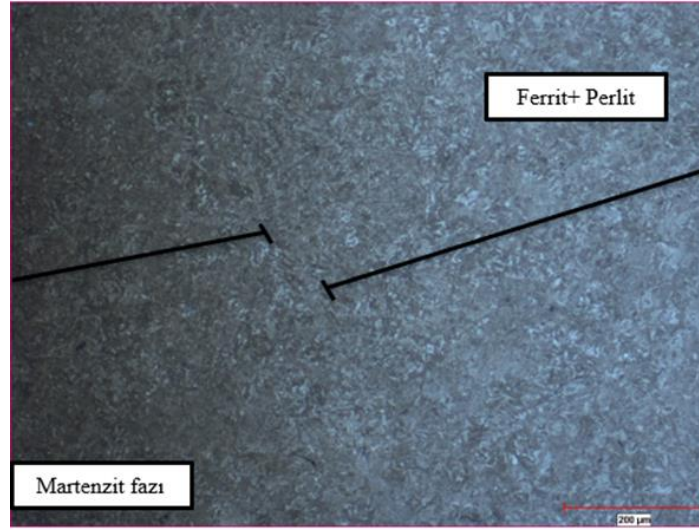
Burada Δm ; ağırlık kaybı (gr), ρ ; yoğunluk (gr/cm^3), F; uygulanan yük (N), K; spesifik aşınma hızı (m^2/N) ve L(mm) ise toplam aşınma mesafesini ifade etmektedir [10].

3. DENEY SONUÇLARI VE İRDELENMESİ (EXPERIMENT RESULTS AND STUDIES)

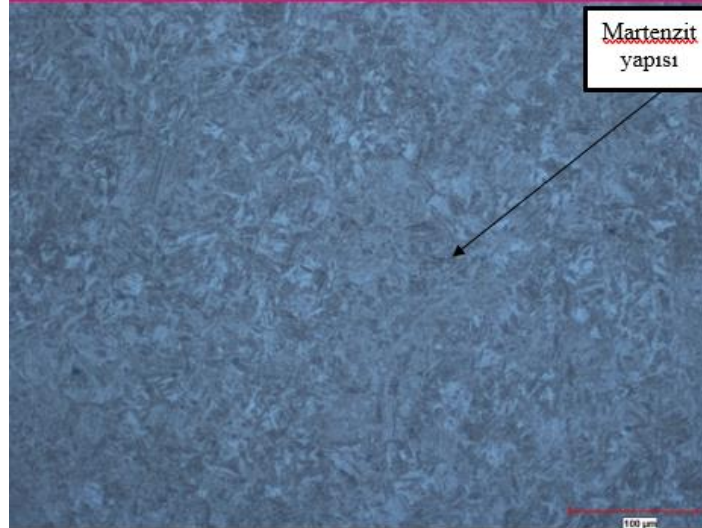
3.1. Mikroyapı İncelemeleri (Microstructure Studies)

Isıl işlem sonrasında malzemelerin yapısındaki değişimi incelemek için dağlanan numunelerin, optik mikroskopta mikroyapı analizi yapılmıştır.

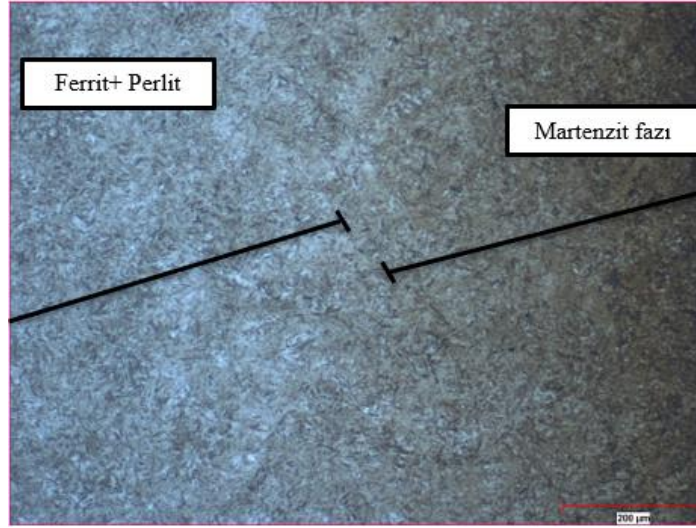
Dağlama sonrası, ısıl işlem görmüş numunelerin mikroyapı görüntüleri Şekil 5, 6, 7 ve 8' de verilmektedir. Şekil 5 ve 7'de geçiş bölgeleri ve Şekil 6 ve 8'de Martenzit fazı görülmektedir.



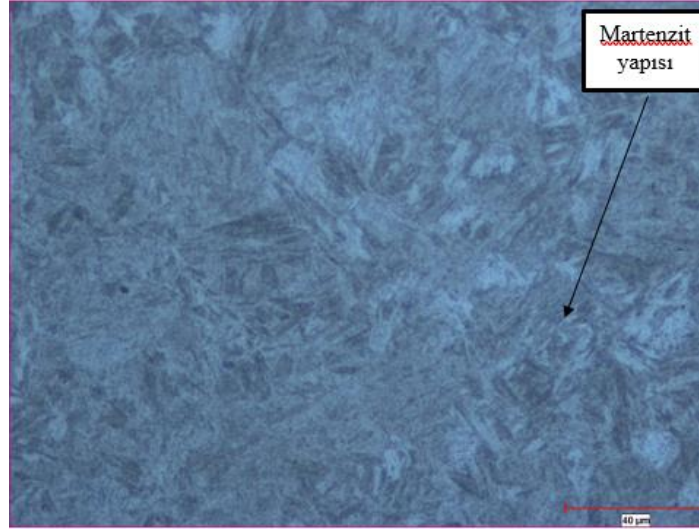
Şekil 5. 20MnCr5 ısıl işlem görmüş numunenin yüzyden çekirdeğe doğru 50X mikroyapı görüntüsü (50X microstructure image of 20MnCr5 heat-treated sample from surface to core)



Şekil 6. 20MnCr5 ısıl işlem görmüş numunenin 200X mikroyapı görüntüsü (200X microstructure image of 20MnCr5 heat-treated sample)



Şekil 7. 8622 RH ısıtılmış numunenin yüzeyden çekirdeğe doğru 50X mikroyapı görüntüsü (50X microstructure image of 8622 RH heat treated sample from surface to core)



Şekil 8. 8622 RH ısıtılmış numunenin yüzeyden çekirdeğe doğru 50X mikroyapı görüntüsü (200X microstructure image of 8622 RH heat treated sample)

Isıl işlem öncesinde mikroyapıda, ferritik-perlitik yapı hakimken, ısıtılmış sonrasında karbon difüze olan bölgelerde martenzitik yapı oluştuğu görülmektedir [11,12]. Karbürleme işlemi ile birlikte malzemeye karbon difüzyonu gerçekleştirilmiş ve ani soğutma ile kafes içine yerleşen bu atomların kafesten çıkmasını önleyerek, kafes yapısını HMT yapıya dönüştürülmüştür. Bu sayede martenzit yapısı elde edilmiştir.

Şekil 5 ve 6' da verilen mikroyapı fotoğraflarında açık renkli bölgeler ferrit + perlit fazını gösterirken, koyu renkli bölgeler ise temper martenzit fazını göstermektedir. Malzemeler ısıtılmış sonrasında temper prosesine tabi tutuldukları için, martenzit yapısı temper martenzite dönüşmüştür. Temper martenzit, aşırı derecede ince taneli ve ferritik matris içinde dağılmış sementit tanelerinden oluşur [8,12,13].

3.1. Darbe Ve Sertlik İncelemeleri (Impact And Hardness Studies)

Isıl işlemlili ve orjinal malzemelerin darbe dayanımlarını belirlenmek üzere, darbe testleri uygulanmıştır. Test sonuçlarına göre orjinal ve ısıtılmış numunelerin darbe dayanımları Tablo 4'te verilmiştir. Tabloda görülen test sonuçları 5 adet test sonucunun ortalaması olarak verilmiştir.

Tablo 4. Isıl işlemlenmiş numunelerin darbe dayanımları (Impact strength of heat treated samples)

Isıl İşlemlenmiş Malzemelerin Darbe Dayanımları		Orjinal Malzemelerin Darbe Dayanımları
20MnCr5	9.5J	66.2 J
8622 RH	9 J	45.4 J

Isıl işlem sonrası, malzemelerde darbe direncinde düşüş olduğu görülmektedir.

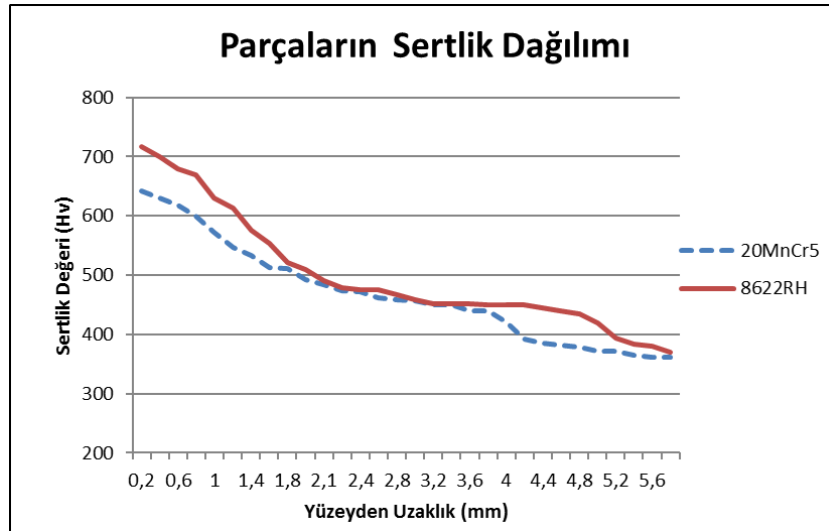
20MnCr5 orjinal malzeme darbe dayanımı 66.2 J iken, ısıl işlem sonrası bu değer 9.5 J'e düşmüştür. 8622RH ise ısıl işlem öncesi 45.4 J darbe dayanımına sahipken, ısıl işlem sonrası darbe dayanımı 9 J olarak belirlenmiştir.

Isıl işlem sonrası çeliklerin darbe dayanımında görülen düşüş, işlemin malzemenin mikroyapısında yarattığı değişikliklerden kaynaklanabilir. Isıl işlemler, özellikle sertleştirme ve temperleme, malzemenin iç yapısını değiştirerek, belirli mekanik özellikleri iyileştirmeyi amaçlar. Bu işlemler sırasında, çeliklerdeki faz dönüşümleri ve karbonun yeniden dağılımı gibi mikroyapı değişiklikleri meydana gelir. Isıl işlem sırasındaki faz dağılımındaki değişiklikler, örneğin karbürlerin çözülmesi veya yeniden çökmesi, malzemenin homojenliğini bozarak, kırılma direncini artırabilmektedir [12].

Darbe dayanım değerlerini analiz ettiğimizde, 20MnCr5'in ısıl işlem öncesi ve sonrası darbe dayanımının, 8622RH'a göre daha yüksek olduğu görülmüştür.

Isıl işlem öncesi sertlik testi için hazırlanan numuneler, sertlik ölçüm cihazı ile test edilmiştir. Numuneler ısıl işlem öncesi yüzey sertlik değerleri birbirine benzer olup, 20MnCr5'in 190Hv, 8622RH'ın 192 Hv olarak ölçülmüştür.

Isıl işlem gören numunelere, yüzey sertliği kontrolünün yanı sıra, malzeme yüzeyinden çekirdeğe doğru sertlik dağılımını görmek amacıyla, mikro sertlik ölçümleri yapılmıştır. 5.6 mm'lik yüzey boyunca sertlik dağılımı ölçümü, mikro sertlik ölçüm cihazında, 1kg'lık yükü 25 sn olarak gerçekleştirilmiş olup, elde edilen sonuçlar Şekil 9' da görülmektedir.



Şekil 9. Numunelerin ısıl işlem sonrası sertlik dağılımı (Hardness distribution of samples after heat treatment)

Şekil 9' u incelediğimizde; belli bir çaptaki malzemeye su verildiğinde, yüzeyden merkeze doğru soğuma hızları ve karbon konsantrasyonu değişeceğinden, ısıl işlem sonrası sahip olunan sertliklerin de birbirinden farklı olduğu görülmektedir [7,13].

8622RH çeliği; yüzeyinde 715 Hv (60.8 HRc) sertliğe sahipken, yüzeyden 5.6 mm içerde sertliğin yaklaşık olarak 362 Hv olduğu görülmektedir.

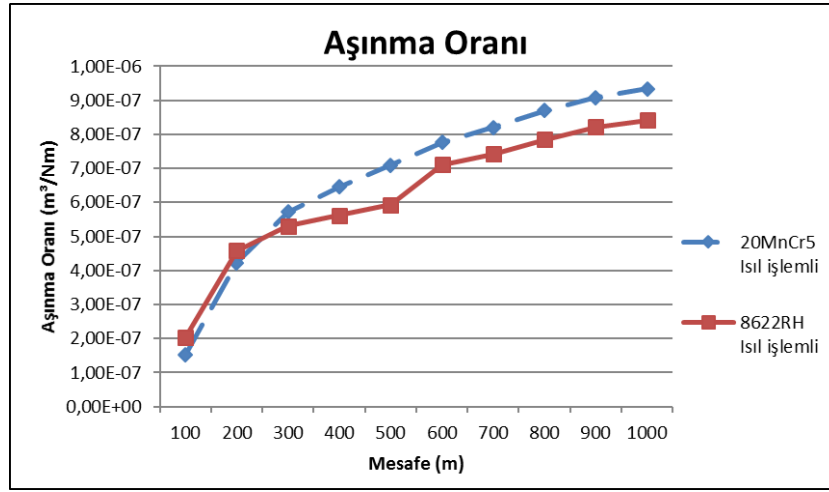
20MnCr5 çeliğinde ise; yüzeyinde 640 Hv (57.3 HRc) sertliğe sahipken, yüzeyden 5.6 mm içerde sertliğin yaklaşık olarak 380 Hv olduğu görülmektedir.

8622RH çeliğinin yüzey sertliğinin, 20MnCr5'e göre daha yüksek olması kimyasal bileşimindeki Mo ve Ni yüzdelere yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Mo ve Ni' in çeliğin sertleşebilirliğine etkisi yüksektir [8], bu sebeple de yüksek martenzit oranı 8622RH malzemenin mikroyapısında görülmüştür.

550 Hv sertliği elde ettiğimiz nokta, sertlik derinliği olarak tanımlanmaktadır [14]. Efektif sertlik derinliği; zamanla birlikte artan karbon difüzyonuna bağlıdır [12]. Malzemelerin sertlik derinlikleri kıyaslandığında; 20MnCr5 sertlik derinliği 1.2 mm, 8622RH sertlik derinliğinin ise 1.6 mm olduğu görülmektedir.

3.2. Aşınma (Wear)

Aşınma testi, ısıl işlemlenmiş malzemelere uygulanmış olup, test sonuçları Şekil 10'da verilmiştir.

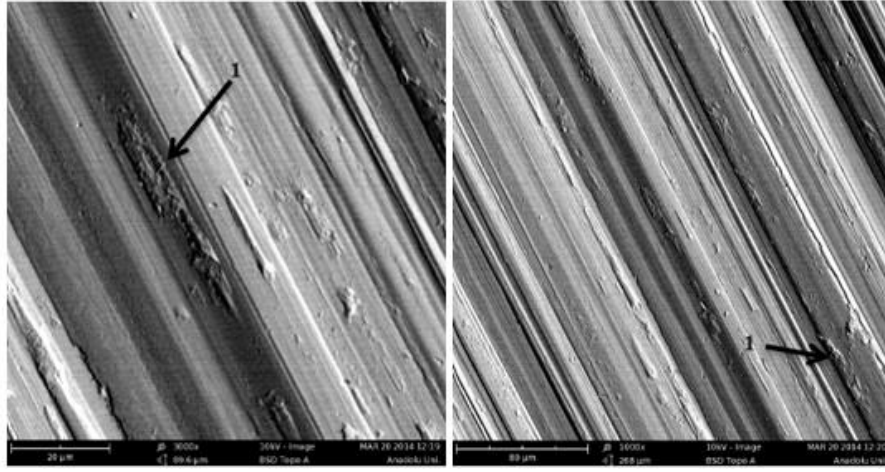


Şekil 10. Isıl işlem sonrası malzemelerin aşınma oranlarının karşılaştırılması (Comparison of wear rates of materials after heat treatment)

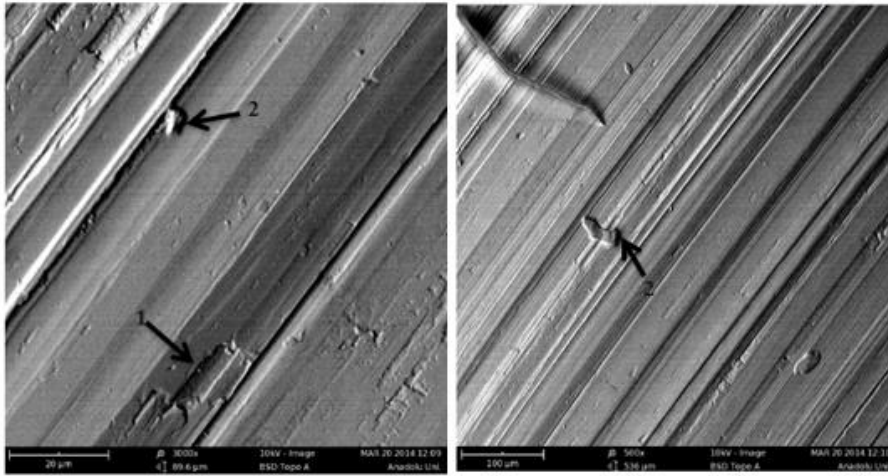
Aşınma testi 1000 m mesafede uygulanmış olup, her iki malzeme karşılaştırıldığında; 20MnCr5'in aşınma oranının daha yüksek olduğu görülmüştür.

200 m mesafeye kadar aşınma oranları davranışı birbirlerine çok yakınken, bu mesafeden sonra aşınma oranı davranışlarında farklılıklar meydana gelmiştir. 1000 m'de test tamamlandığında, 20MnCr5'in aşınma oranının, 8622RH'a göre daha yüksek olduğu görülmüştür.

Sertlik, malzemelerin aşınma direncini etkileyen en önemli unsurlardan biridir. Sertliğin artışıyla birlikte, malzemelerin aşınma dayanımı da artmaktadır [15,21]. Karbürleme işlemi sonrasında artan sertlik oranının, malzemenin aşınma direncine olumlu katkısını, her iki malzemenin yüzey sertlikleri ve aşınma oranlarını karşılaştırarak görülmektedir. 8622RH çeliği, karbürleme sonrasında 20MnCr5 çeliğine göre daha yüksek sertliğe sahip olmuştur. Her iki çeliğin aşınma oranları karşılaştırıldığında, 8622RH çeliğinin aşınma oranının daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum yüksek sertliğin, yüksek aşınma direncini sağladığını ortaya koymaktadır [19].



Şekil 11. 20MnCr5 malzemesinin aşınma deneyi numunesi SEM görüntüleri (SEM images of wear test sample of 20MnCr5 material)



Şekil 12. 8622RH malzemesinin aşınma deneyi numunesi SEM görüntüleri (SEM images of wear test sample of 8622RH material)

Şekil 11 ve 12'deki aşınma testine tabi tutulan numunelerin aşınma yüzeyleri SEM'de incelendiğinde, abrasif aşınma sonrasında, malzeme yüzeylerinde aşınma kanallarının oluştuğu net olarak görülmektedir [15]. Her iki malzeme yüzeyinden de tabakaların ayrılması sonucunda malzeme kaybı oluşmuştur. Abrasif aşınma meydana gelirken, yüzeyden ayrılan partiküllerin malzeme yüzeylerinde abrasif aşınma oluşturduğu da SEM görüntülerinden anlaşılmaktadır. Şekillerde 1 numara ile abrasif yivler, 2 numara ile ise yüzeye yapışan partiküller görülmektedir [15].

Abrasif aşınma direnci sertliğin artmasıyla ve deformasyon kabiliyetinin düşmesiyle birlikte artar. Alaşımlama, aşınma direncini arttırmak için uygulanabilecek yöntemler arasındadır [15,21].

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yapılan çalışmalar sonucunda, detaylandırılmış sonuçlar aşağıda verilmiştir;

- Isıl işlem öncesi malzemelerin mikroyapısında, ferrit fazının yanında ince dağılmış perlit yapısı hakimken, ısıl işlem sonrası mikroyapıda martenzit yapısının oluştuğu görülmektedir. Her iki malzemenin ısıl işlem sonrası sahip olduğu mikroyapı birbirine benzerdir.
- Isıl işlem öncesi ham malzemelerin sertlikleri yaklaşık olarak 19-20 HRC iken, ısıl işlem sonrasında; 20MnCr5 çeliğinin yüzey sertliği 57.3 HRC, 8622RH çeliğinin 60.5 HRC olarak ölçülmüştür. Aradaki sertlik farkı kıyaslandığında 8622RH çeliğindeki yüksek sertliğin

içeriğindeki Mo ve Ni'den kaynaklandığı düşünülmektedir. Mo ve Ni'in çeliğin sertleşebilirliğine etkisi yüksektir.

- Malzemelerin darbe dirençleri karşılaştırıldığında, ısıtma işlem sonrasında büyük bir düşüş olduğu görülmektedir. Bu düşüş, karbürleme prosesi sonrasında oluşmaktadır. Malzemelerin ısıtma işlem sonrası darbe dirençlerinin düştüğü ve karbürleme prosesindeki sıcaklığın yükselmesiyle birlikte, darbe tokluğunun daha da düştüğü görülmüştür.
- Karbürleme işlemi sonrasında 20MnCr5 ve 8622RH çeliklerinin aşınma dayanımlarının, gerçekleşen ısıtma işlem prosesi sonrasında arttığı tespit edilmiştir. Malzemelerin aşınma dayanımlarının, artan sertlik ile arttığı görülmüştür. Karbürleme işlemi sonrasında, 8622RH çeliğinin yüzey sertliğinin daha yüksek olması, aşınma dayanımının da 20MnCr5 çeliğine göre daha yüksek olmasına sebep olmuştur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. O.Asi, An investigation of retained austenite contents in carburized SAE 8620 steel, G.U. Journal of Science, 17(4):103-113, 2004.
2. D. H. Herring, Gear heat treatment: The influence of materials and geometry, 35-40, 2004.
3. S.N. Lingamanaik, B.K. Chen, The effects of carburising and quenching process on the formation of residual stresses in automotive gears, Comput. Mater. Sci., 62:99-104, 2012.
4. K.-H., Zum Gahr, Tribology series, Microstructure and wear of materials, Elsevier, 1987.
5. G. E. Totten, C.E. Bates, N.A. Clinton, Handbook of Quenchants and Quenching Technology, ASM International, Metals Park, OH, 1993.
6. S. P. Radzevich, Dudley's Handbook of Practical Gear Design and Manufacture, 4th Edition, CRC Press, Boca Raton, 2021.
7. ASM Handbook Volume 4, Heat Treating, ASM International, 1991.
8. ASTM-A 914/A 914M – 92, 2005, Standard specification for steel bars subject to restricted end-quench hardenability requirements, ASTM International, 1999.
9. J. Gupta, Mechanical and wear properties of carburized mild steel samples, Master of Technology Degree, National Institute of Technology Rourkela, Odisha, India, 2009.
10. K. Kato, K. Adachi, Wear Mechanisms, Modern Tribology Handbook, CRC Press, Boca Raton, 2001.
11. G. Parrish, Carburizing: Microstructures and properties, ASM International, Metals Park, OH, 1999.
12. İ.N. Mazni, The effect of heat treatment on the hardness and impact properties of medium carbon steel, IOP, Conf. Ser., Materials Science and Engineering, 2016.
13. K.E, Thelning, Steel and Its Heat Treatment, Butterworth Heinemann, Sweden, 2000.
14. G. Krauss, Part II: Austenite, Part III: Austenite & Fatigue, Specials papers, Microstructure and performance of carburized steel, ASM International, Metals Park, USA, 1995.
15. J.A. Williams, Wear and Wear Particles-Some Fundamentals, Tribology International, Elsevier, UK, 2005.
16. İ. Yeğen, Sıcak haddelenmiş ve soğuk çekilmiş SAE 8620 ve 16MnCr5 çeliklerinde tuz banyosunda gerçekleştirilen sementasyon işleminin aşınma direncine etkisi, Yüksek Lisans, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü/ Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2009.
17. G.E. Totten, Steel Heat Treatment Handbook: Metallurgy and Technologies, 2nd edition, Boca Raton, 2006.
18. H. Chandler, Heat Treater's Guide: Practices and Procedures for Irons and Steels, ASM International, 1995.
19. B. Bhushan, Introduction to Tribology, (Nanotribology Lab for Info Storage and MEMS/NEMS (NLIM), Ohio State Univ, Columbus OH 43210), Wiley, New York, 2002.
20. T.V. Rajan, C.P.Sharma, A.Sharma, Heat Treatment, third Edition: Principles and techniques, PHI learning private limited, Delhi, 1988.
21. M. J. Murray, P. J. Mutton, J. D. Watson, Abrasive wear mechanisms in steels, Journal of Lubrication Tech., 104:9-16, 1982.
22. ASM Handbook Volume 1, Properties and Selection of Iron Steels and High Performance Alloys, ASM International, 1990.

A Study of The Main Electrophysical Parameters of Semiconductor - Polymer Based Composite Varistors

Shafag Ahadzade¹ , Tarana Nurubeyli^{1,2,3} , Igor Vakulenko³ , Khangardash Asgarov^{4,*} 

¹ Institute of Physics, National Academy of Sciences of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan

² Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan

³ Khazar University, Mahsati Str. 41, AZ 1096, Baku, Azerbaijan

⁴ Ukrainian State University of Science and Technology, Applied Mechanics and Materials Science, Dnipro, Ukraine

^{5,*} Karabük University, Engineering Faculty, Karabük, Turkey

ARTICLE INFORMATION

Received: 15.01.2024

Accepted: 01.04.2024

Keywords:

ZnO

Monocrystalline Si

Composite varistors

Ceramic

Polymer

Opening voltage

ABSTRACT

The main electrophysical parameters of composite varistors made on the basis of filled zinc oxide (ZnO), monocrystalline silicon (Si), gallium arsenide (GaAs), indium arsenide (InAs) and various polymers were studied in this work. In the article, the sample preparation process is described, interphase interaction is discussed. The nonlinearity coefficient (β) and opening voltages (U_{op}) of volt-ampere characteristics in filled ZnO, monocrystalline Si ceramic semiconductors and polymer-based composite varistors were determined. The volt-ampere characteristics of monocrystalline Si, GaAs and InAs and polymer-based composites were also measured. The shape of the potential hole in the mentioned composites has been determined. It was found that the opening voltage and the nonlinearity of the volt-ampere characteristic of polymer-semiconductor composites mainly depend on the properties of the 3rd phase. According to the experiment, it was found that as the filler volume percentage increases in ZnO, monocrystalline Si, GaAs and InAs and polymer-based composites, the β increases in all samples, and the U_{op} decreases. Depending on the type of dispersant, the opening voltages of the composites are different. Thus, in ZnO-polymer-based composites with additives, this voltage varies between 130-220 V, and in monocrystalline Si, GaAs and InAs and polymer-based composites, it varies between 5-50 V. The analysis of the shape of the potential hole in composites based on monocrystalline Si, GaAs, and InAs has shown that the value of the forbidden zone in the composites decreases, and the value of the potential barrier decreases sharply.

Yarı İletken-Polimer Esaslı Kompozit Varistörlerin Ana Elektrofiziksel Parametrelerinin İncelenmesi

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 15.01.2024

Kabul: 01.04.2024

Anahtar Kelimeler:

ZnO

Monokristal Si

Kompozit varistörler

Seramik

Polimer

Açılış voltajı

ÖZET

Bu çalışmada katkılı çinko oksit (ZnO), monokristalin silikon (Si), galyum arsenit (GaAs), indiyum arsenit (InAs) ve çeşitli polimerler temelinde yapılan kompozit varistörlerin ana elektrofiziksel parametreleri incelenmiştir. Makalede numune hazırlama süreci anlatılmakta, fazlar arası etkileşim tartışılmaktadır. Katkılı ZnO, monokristal Si seramik yarı iletkenler ve polimer bazlı kompozit varistörlerdeki volt-amper özelliklerinin doğrusal olmama katsayısı (β) ve açılış gerilimleri (U_{op}) belirlendi. Monokristal Si, GaAs ve InAs ile polimer bazlı kompozitlerin volt-amper özellikleri de ölçüldü. Söz konusu kompozitlerdeki potansiyel deliğin şekli belirlenmiştir. Polimer-yarı iletken kompozitlerin açılış geriliminin ve volt-amper karakteristiğinin doğrusal olmama durumunun esas olarak 3.fazın özelliklerine bağlı olduğu bulunmuştur. Deneye göre ZnO, monokristal Si, GaAs ve InAs ile polimer bazlı kompozitlerde dolgu hacim yüzdesi arttıkça tüm numunelerde β 'nin arttığı, U_{op} 'nin azaldığı tespit edildi. Dağıtıcının türüne bağlı olarak kompozitlerin açılış gerilimleri farklıdır. Dolayısıyla ZnO-polimer bazlı katkı maddeli kompozitlerde bu voltaj 130-220 V arasında değişirken, monokristal Si, GaAs ve InAs ile polimer bazlı kompozitlerde 5-50 V arasında değişmektedir. Monokristal Si, GaAs ve InAs bazlı kompozitlerdeki potansiyel delik, kompozitlerdeki yasak bölge değerinin azaldığını, potansiyel bariyer değerinin ise keskin bir şekilde azaldığını göstermiştir.

*Sorumlu yazar, e-posta: hangardasaskerov@karabuk.edu.tr

To cite this article: Shafag Ahadzade, Tarana Nurubeyli, Igor Vakulenko, Khangardash Asgarov, A Study of The Main Electrophysical Parameters of Semiconductor - Polymer Based Composite Varistors, Manufacturing Technologies and Applications, 5(1),34-45, 2024.

<https://doi.org/10.52795/mateca.1417700>, This paper is licensed under a CC BY-NC 4.0

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

It is known that composite materials are a material made of two or more constituent materials with significantly different physical and chemical properties and having different properties when combined. Composite materials are composed of several components-usually a plastic base (matrix) and additional strength, stiffness, lightness, etc. it consists of an amplifier-a filler. It is possible to develop composites with different properties depending on the direction, field of use, composition.

It should be noted that defense of microelectronics, electronic devices and their functional components from switching and lightning voltages is one of the important problems. Various types of varistors are used in the electronics industry all over the world to guard electrical networks and electronic devices from extreme electrical impulses of the desired type. In this regard, ceramic varistors based on ZnO and monocrystalline Si, which differ from other materials by a number of advantages, have found a wider field of application. It should be considered that recently, one of the promising directions for the improvement of protecting devices and components is the manufacture of two- and multi-phase composites based upon ceramic varistors. By preparing these composites on the basis of ceramic phase and polymers, it is potential to obtain composite varistors that are cheaper and of higher quality than those available so far, both in high-voltage equipment and in low-voltage devices of power engineering [1-7].

By injecting certain additives into ZnO ceramics, it is possible to synthesize it with polymer materials and make thin-film composite varistors and make a wide variety of them expediently. Currently, the issues of renewing the composition of composite materials, developing cheap, economical and effective composite materials and wide application of these composites in the industry are very relevant. For this purpose, various additives were added to the ZnO phase [8].

Polymer-based thin-film composite varistors, apart from the simplicity of the manufacturing technology, also have advantages in terms of some operating parameters. By changing the temperature-time dependence of the crystallization of the polymer matrix, it is possible to adjust the properties and stability of the parameters of the composite varistors. By adding additives to the ceramic phase, it is possible to significantly change the surface activity of polymer-based composites, as well as the nonlinearity coefficient of the volt-ampere characteristic and the opening voltage. It should be noted that low temperature, very small weight and geometric dimensions, non-linearity coefficient and appropriate variation of the opening voltage of polymer-based thin-film composite varistors are of great practical importance.

The occurrence of effects observed in composites is mainly related to the formation of a potential barrier at the interphase boundary. In turn, the formation of various properties in composites depends greatly on the electrophysical parameters of the potential barrier formed at the interphase boundary and the processes occurring at the polymer-filler boundary. Therefore, by changing the composition of composites and the properties of phases, it is possible to create different effects in them and create more effective devices for different fields of technology based on composites.

It should be noted that the practical importance of the work is that the composites created on the basis of wide-band polymers and ceramic materials can be used as overvoltage limiters, electronic switches, memory elements, etc. can be used as Also, the obtained polymer-based thin-film composite varistors can be applied in various fields of electrical engineering by appropriately changing the opening voltage.

The purpose of the study is to determine the basic electrophysical parameters, i.e., opening voltage (U_{op}) and nonlinearity coefficient (β) of the volt-ampere characteristic in composite varistors made on the basis of filled ZnO, monocrystalline Si, GaAs, InAs and various polymers. For this purpose, the synthesis process of composites, the opening voltage (U_{op}), the nonlinearity factor (β) and the shape of the potential hole of composite varistors made on the basis of additive ZnO, monocrystalline Si, GaAs, InAs and various polymers were determined.

2. EXPERIMENTAL PART (DENEYSEL BÖLÜM)

Synthesis of composite varistors based on filled ZnO, monocrystalline Si, GaAs, InAs and various polymers is carried out by ceramic method [9-10]. Higher temperatures are used to increase particle diffusion. Thus, ceramic synthesis is sometimes carried out at a temperature of 2300 K. 1000 grams of ceramics are weighed and crushed in a porcelain ball mill (trademark FRITSCH) to a size of 60 μm or less. Then, samples with a height of 10 mm and a diameter of 20 mm are obtained from this mixture by pressing at a pressure of 40 tons. After that, for synthesis, the samples are placed in the furnace and heated to 900 °C at a rate of 150 °C/s, and to a temperature of 1250 °C at a rate of 200 °C/s. The process of synthesis of pressed samples is carried out for 2 hours at a temperature of 1250 °C, in an air environment. After turning off the oven, the samples are cooled for 7-8 hours.

To facilitate mutual diffusion of the particles, they are first mechanically crushed as small as possible. During the comminution methods used in industry, particles with a size of 10-60 μm are usually obtained. The crushed mass is pressed under high pressure to improve the contact of these particles. Nevertheless, ceramic synthesis is diffusive, and when the diffusion rate is small, it takes a long time for the atom of one particle to completely diffuse into the other. So, if the size of the particle is 10 μm and the elementary lattice parameter of the primary substance is 10Å=10⁻⁷cm =10⁻³ μm , then the atom (ion) needs to pass 10000 elementary lattices during the diffusion of that particle from one side to the other. It sometimes takes 10 hours or more for an atom to travel such a path.

Ceramic synthesis in industry is usually carried out in a relatively short time (2-10 hours) [5]. Therefore, ceramic synthesis often occurs only around the contact boundaries of the particles, and the diffusion process begins at the contact boundary of the particles. At this time, an intermediate phase is formed at the border (Figure 1). If the speed of the initial diffusion process depends on the chemical nature of the particles in contact, the synthesis temperature, after the intermediate layer is formed, it also depends on the thickness of that layer and the resistance of atoms and ions to the diffusion dynamics. Often, the reaction rate decreases exponentially depending on the thickness of the intermediate phase.

The components of the composite varistors used in the work are based on filled ZnO, monocrystalline Si, GaAs, InAs semiconductor ceramics and non-polar polyethylene (PE), polypropylene (PP) and polar polyvinylidene fluoride (PVDF) polymers.

It should be noted that the Co₂O₃, MnO₂, Cr₂O₃, Sb₂O₃ oxides present as additives in the synthesized ZnO varistor react with ZnO and form spinel-type ZnCr₂O₄ (a= 8.32Å), Zn₇Sb₂O₁₂ (a= 8.58Å), Co₇Sb₂O₁₂, (a = 8.55Å), MnCr₂ (a = 8.436Å), CoCr₂O₄ (a= 8.32Å), etc. forms compounds.

First of all, semiconductor ceramics and polymers are mixed together to obtain composites [11-13]. The mixing process is carried out in micromills, is a mixer device that ensures homogeneous mixing of polymer and reinforcing element. It should be noted that polymers with strong dielectric properties were used as the polymer phase [14,15]. Figure 1 shows the sample mixing process.

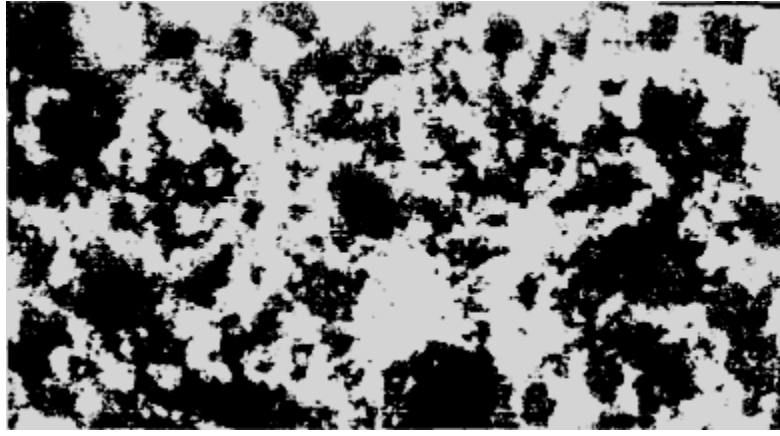


Figure 1. Sample mixing process (Numune karıştırma işlemi)

The individual components of the mixture were first dried in the form of powder, polymers at 413 K, and ZnO, Si, GaAs and InAs ceramics at 523 K. The structure and electrophysical parameters of individual components of the mixture depend on the demand placed on the varistor to be made on its basis [16].

It should be noted that it is of particular importance to obtain a homogeneous mixture. Because interphase interactions are important in the formation of the varistor effect in the semiconductor-polymer composite. Therefore, the equal distribution of the processes taking place at the interphase boundary in the volume of the sample significantly affects its electrophysical parameters [17-19].

For any material to be a varistor, it must have areas in its physical structure that have markedly different electrophysical, thermal, and physical properties (i.e., crystalline and amorphous phases). When composites with this basic requirement are considered, it is seen that polymer-ceramic and polymer-semiconductor composites meet this requirement [20]. Namely, the role of the crystalline phase is assumed by the ceramic or semiconductor, and the role of the amorphous phase is undertaken by the polymer matrix. However, many microscopic and structural studies expression that it is the third phase that powerfully impacts the development of the varistor effect in composite materials and the electrophysical properties, supramolecular structure and electronic events at the interphase boundary. This phase occurs at the polymer-ceramic and polymer-semiconductor boundaries.

Figure 2 shows the interaction between the third phase formed at the polymer-ceramic boundary in the ceramic-polymer composite.

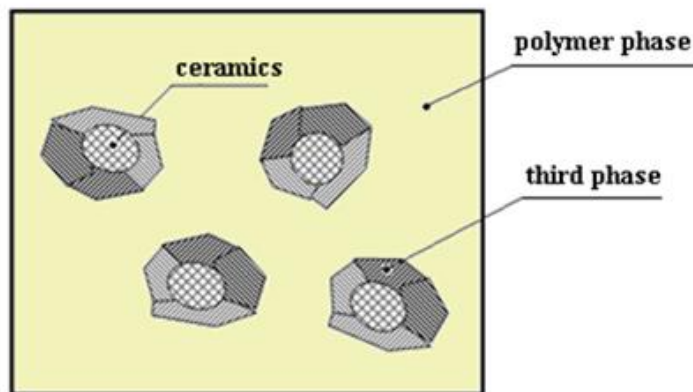


Figure 2. Interphase interactions (Fazlararası etkileşimler)

It can be seen from Figure 2 that the 3rd phase is formed by the effect of the surface of inorganic particles. The nonlinearity of the opening voltage and volt-ampere characteristics of polymer-ceramic and polymer-semiconductor composites mainly depends on the properties of the 3rd phase.

It has recently been established that between the numerous identified organic compounds and composites based on them, there is not a large class of multiphase materials with a very strange combination of properties: bipolar non-ohmic conductivity, heat resistance, sufficiently high mechanical and electrical strengths, and a symmetrical probable barrier on the phase boundary. Such materials named active composites include, particularly, varistors based on polymers distributed by ZnO, monocrystalline Si, GaAs, InAs semiconductor ceramic particles [19]. A novel group of composite elements has been created, whose distinguishing feature is non-bipolar conductivity. Contrasting ordinary non-linear devices, they do not cover asymmetric potential barriers and current-voltage characteristic (CVC). These materials have a wide scope, ranging from nanoelectronics, integrated circuits, to low-power switches for numerous goals [19]. The prospect of polymer composites with bipolar conductivity is due to both wide functional capabilities (for example: in the function of energy-intensive and low-power varistors), and a relatively simple and low-temperature manufacturing technology. The obvious nonlinearity of conductivity and the symmetric nonlinear CVC property of polymer-semiconductor composites attract attention as an active composite for varistors with wide possibilities for varying the non-linearity coefficient of the current-voltage characteristic, operating voltage (U_{op}), and the temperature range of operation. By the gathering of experimental records, the model idea of the creation mechanism of the varistor impact and the conductivity of composites transformed from a model in which the main role was ascribed to the polymer sheets among ZnO and Si particles to a model wherein various grain-boundary properties in the ZnO, Si, GaAs and InAs particle itself and events on the boundary sheets of the polymer phase with involving particles of ZnO, Si, GaAs and InAs.

3. DISCUSSION OF RESULTS (SONUÇLARIN TARTIŞILMASI)

By means of the gathering of experimental records, the model idea of the formation mechanism of the varistor impact and the conductivity of composites transformed from a model in which the chief role was ascribed to the polymer sheets among ZnO, monocrystalline Si, GaAs and InAs particles to a model wherein various grain-boundary effects in the semiconductor ceramics particle itself and events on the boundary sheets of the polymer phase with involving particles of semiconductor ceramics.

Since the main parameters determining the varistor effect of varistor materials are the non-linearity of their volt-ampere characteristic (β) and opening voltage (U_{op}), analogous parameters of composite varistors have been determined. The graphs based on the obtained results are shown in Figure 3 and Figure 4.

Figure 3 shows the dependence of the non-linearity (β) of the volt-ampere characteristic in the filled ZnO-Pe composite varistor on the filler volume percentage.

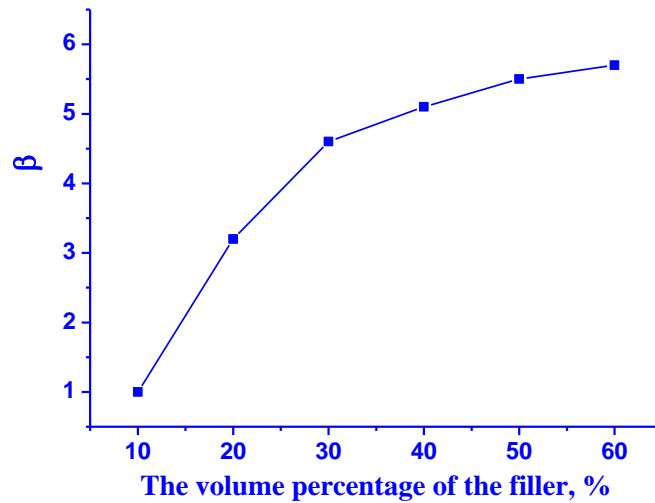


Figure 3. Dependence of the nonlinearity of the volt-ampere characteristic ZnO-Pe composite varistor on the filler volume percentage (Volt-amper karakteristiği ZnO-Pe kompozit varistörün doğrusal olmama durumunun dolgu hacmi yüzdesine bağımlılığı)

It is clear from Figure 3 that the non-linearity coefficient (β) of the composite varistor's volt-ampere characteristic increases significantly ($\beta=1-5.5$) as the volume fraction of the filler in the composite increases.

Figure 4 shows the dependency of the nonlinearity coefficient of monocrystalline Si-polymer composite varistors on the volume percentage of the disperser.

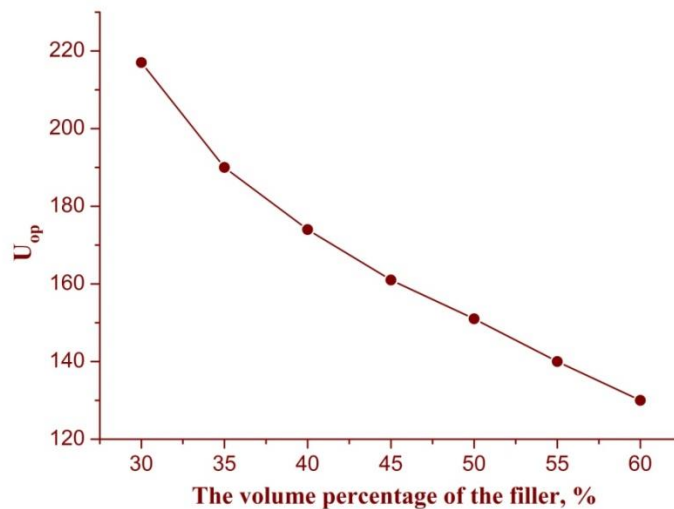


Figure 4. Dependence of the opening voltage in the ZnO-Pe composite varistor on the filler volume percentage (ZnO-Pe kompozit varistördeki açılış geriliminin dolgu hacmi yüzdesine bağımlılığı)

It can be seen from Figure 4 that in filled ZnO-Pe based composite varistors, as the filler volume percentage increases, the opening voltage value also increases.

Figure 6 shows the dependence of the opening voltage on the volume fraction of the filler in a monocrystalline Si-polymer varistor.

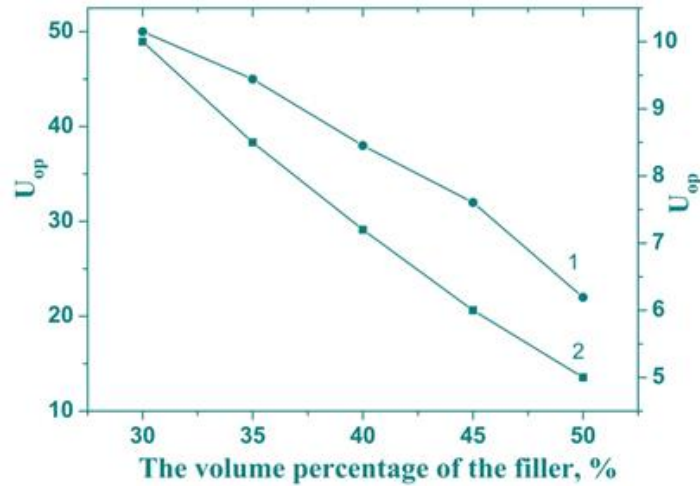


Figure 5. Dependence of the opening voltage on the volume percentage of the filler in monocrystalline Si-polymer based composites; 1-Si-PP; 2-Si – PVDF. (Monokristal Si-polimer bazlı kompozitlerde açılma voltajının dolgu maddesinin hacim yüzdesine bağlılığı)

It can be seen from Figure 6 that the opening voltage (U_{op}) of the composite varistor decreases as the volume fraction of the filler in the composite increases. The explanation of Figure 3-6 is as follows.

The interaction between phases in polymer composites depends the intermolecular structure of the polymer phase, the polarity of its macromolecule, and the surface movement of the dispersant particles. In turn, the interphase mutual influence ultimately affects the chief properties of the semiconductor-polymer varistor[20-30].

As we said, the key reason for the formation of the varistor influence in composites is the formation of a potential barrier at the boundary between the particles of semiconducting ZnO ceramics and the polymer phase and the possibility of its modulation (regulation) through the applied electric field. It can be considered that the parameters of the potential barrier, which determine the opening voltage of the polymer-ZnO varistor and the nonlinearity of the volt-ampere characteristic, depend on the electrophysical characteristics and chemical structure of the contacting surface of the phases. Additives injected into ZnO in certain amounts significantly affect the parameters of the ZnO-Pe composite varistor. Initially, we believe that the additives affect the chemical and physical structures of ZnO and ultimately change the electron-ion process at the boundary of the polymer and ZnO phases. Therefore, the opening voltage value of ZnO-polymer composite is higher than that of Si-polymer based composites.

Figure 6 shows the volt-ampere characteristics of composite varistors based on disperser and non-polar PP with different volume percentages.

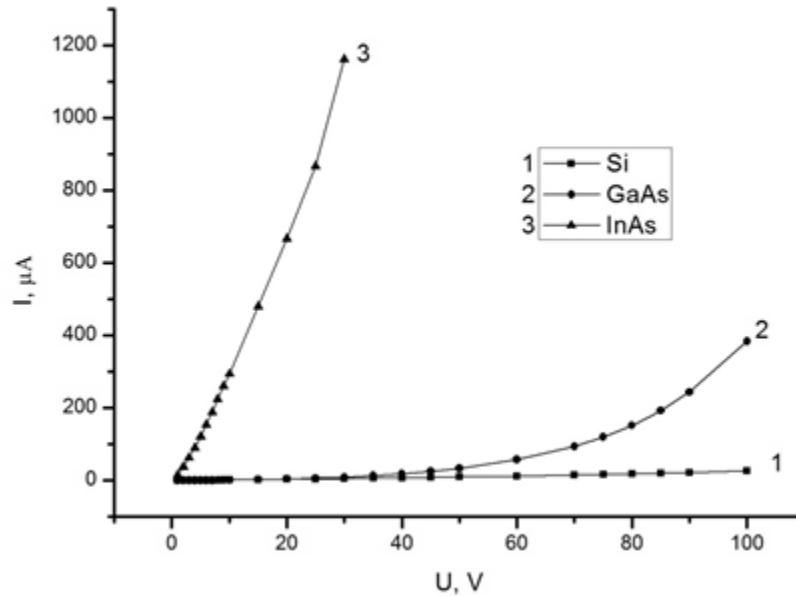


Figure 6. Volt-ampere characteristics of 50% semiconductor + 50% polypropylene based composites (%50 yarı iletken + %50 polipropilen bazlı kompozitlerin volt-amper özellikleri)

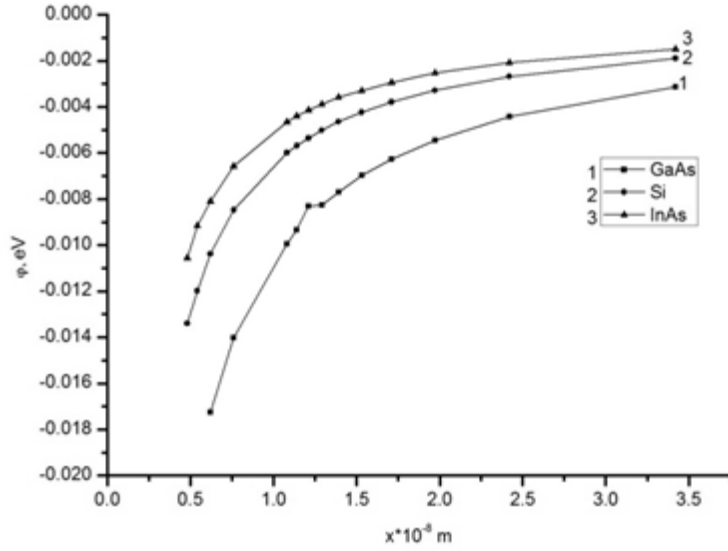
It can be seen from figure 6 that, depending on the type of dispersers, the opening voltages of varistors vary in the range of 50-5 V. From the analysis of the pictures, it can be seen that the influence of the components of the composites on the volt-ampere characteristics of the studied samples is evident.

The obtained results are explained from the point of view of the mechanism of heat transfer in polycrystalline structures. So, these mechanisms; a) tunneling of the potential barriers created due to the dielectric (polymer) nature between the dispersant and polymer particles; b) is the emission of electric currents from the gap between the polymer and semiconductor particles and the transfer of electric currents along the chain formed as a result of the direct contact of the dispersant particles in the composite. Another reason for observing the non-linearity in volt-ampere characteristic is the direct contact of neighboring particles formed during their cooking. Such a contact causes microheating due to electron emission from the sharp ends of the particles when the current passes through the sample.

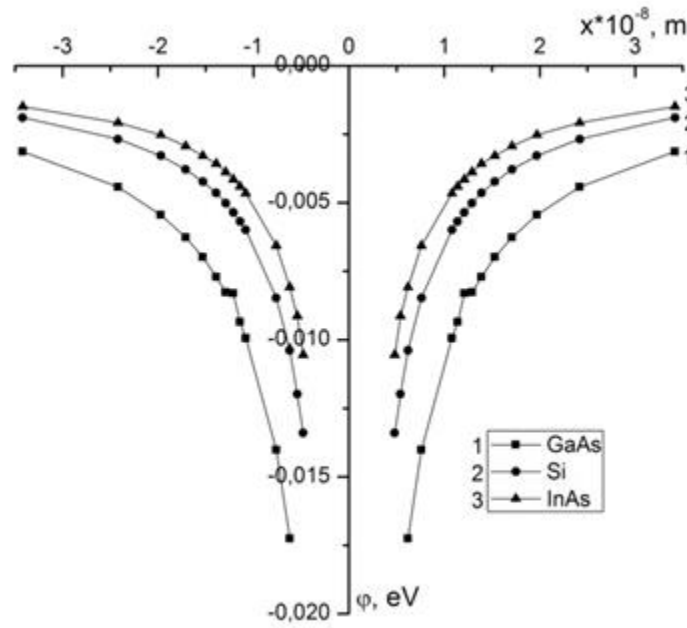
According to the work of [11-25], they say that the conductivity of the composite is a function of the average of the contacts corresponding to one particle. Also, based on the theory of electrical contacts, the flow of electric current between 2 conductors is possible not only by their direct contact, but also by the existence of a thin dielectric layer between them. In this case, the conductivity is created by tunneling through the potential barrier of the superconductors. In turn, the tunnel resistance is exponentially dependent on the value of the potential barrier [15].

In small percentages of the dispersant, the value of the probable barrier is high due to the high density of the polymer nature between the semiconductor particles. On the other hand, due to the exponential dependency of the tunnel resistance on the value of the probable barrier, the probability of the superconductors tunneling through the fire barrier decreases sharply, and the tunnel permeability will be small in small percentages of the disperser. Accordingly, the strength of the composite will be determined mainly by the strength of the polymer. In this part, the tolerance is of a sliding nature. With the increase of the volume percentage of the disperser, the thickness of the polymer layer between the semiconductor particles decreases and the mean value of the contacts between the particles rises, as a result, the strength of the potential difference and the value of the tunnel resistance decreases.

Figure 7a,b shows the shape of the potential hole in the positive(+) and negative(-) regions in different dispersant-based composites.



a)



b)

Figure 7. a - Shape of the potential hole in different dispersant-based composites,
 b- Shape of the potential hole in the positive(+) and negative(-) region
 (a - Farklı dağıtıcı bazlı kompozitlerdeki potansiyel deliğın şekli,
 b- Pozitif(+) ve negatif(-) bölgedeki potansiyel deliğın şekli)

Figure 7a,b clearly shows the influence of the type of dispersant on the formation of the potential well in the composites. So, on the one hand, in all three types of semiconductor-based composites, the shape of the potential cross-section is similar, as the value of x increases, the value of ϕ also increases. On the other hand, the value of the forbidden zone decreases in the order of GaAs, Si and InAs, and the value of the strength of the potential barrier decreases sharply.

It should be noted that electron exchange takes place at the contact boundary between polymer and ceramic due to the different work functions of polymer and ceramic. As a result of electron

exchange, a boundary potential similar to the Schottky barrier is generated at the boundary. It can be calculated that because the work function of the polymer is greater than the work function of the ceramic, electrons transfer from the ceramic to the polymer. Each night is positively charged in an electron-compatible ceramic. Therefore, a potential barrier is formed at the boundary, consisting of charges in ceramics, and electrons in polymer. Depending on the strength of the potential barrier, the boundary resistance changes. The smaller the height and width of the potential cross-section, the more electrons will be transferred at the polymer-ceramic interface based on the tunnel effect at smaller gaps [21-32].

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

Interphase interactions are important in the formation of varistor influence in semiconductor-polymer composite. In order to study the interphase interactions, one of the important issues is the determination of the main parameters that determine the varistor effect of composite varistors - the nonlinearity of their volt-ampere characteristic (β) and opening voltage (U_{op}), as well as the optimal sample percentages. For this purpose, analogous parameters of composite varistors are defined in the article. The homogeneity of composites obtained on the basis of additive ZnO, monocrystalline Si, GaAs and InAs ceramics and polymers was ensured. During the analysis of the studies, it was found that the opening voltage of the semiconductor-polymer composites and the nonlinearity of the volt-ampere characteristic mainly depend on the properties of the 3rd phase.

The obtained experimental results show that the non-linearity coefficient (β) of the volt-ampere characteristic of the composite varistors increases sufficiently as the volume fraction of the filler increases in both ZnO-polymer and monocrystalline Si-polymer based composites under the conditions of stability of all other electrophysical and geometric size factors, and the opening voltage decreases (U_{op}). It should be noted that the dispersion of polymer dielectrics with ceramic particles leads to the formation of a potential barrier at the interphase boundary, which leads to the formation of the varistor effect in the composite and its change under the influence of the electric field. Stabilization of electrons with available beams reduces the resistance of the varistor and the thickness of the potential barrier between the crystallites, which leads to a decrease in the opening voltage of the composites. A sufficiently large non-linearity ratio indicates the effectiveness of composite varistors.

It should be noted that the type of disperser is established based on the formation of a potential hole in composites. Thus, the shape of the potential barrier in different types of dispersant-based composites has a similar character. In the order of GaAs, Si and InAs, the value of the forbidden zone decreases, and the value of the potential barrier decreases sharply.

All the mentioned parameters ultimately affect the breakdown voltage (U_{op}) and nonlinearity coefficient (β) of the volt-ampere characteristic. The change of the opening principle in a wide interval and the variation of the nonlinearity coefficient allow the preparation of effective and high-quality composite varistors according to the purpose.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

1. S. Hirose, K. Nishita, H. Niimi, Influence of distribution of additives on electrical potential barrier at grain boundaries in ZnO-based multilayered chip varistor, *J Appl Phys.*, 100: 083706, 2006.
2. A.M. Hashimov, K.B. Kurbanov, S.M. Hasanli, R.N. Mehdizadeh, Sh.M. Azizova, K.B. Bayramov, Method of preparation of composite varistors of thin layers, State Agency for Standardization, Metrology and Patent, Azerbaijan, 172, I, 2007.
3. Z.J. Xu, H.R. Bai, S. Ma, Effect of a Bi–Cr–O synthetic multi-phase on the microstructure and electrical properties of ZnO–Bi₂O₃ varistor ceramics, *Ceram Int.*, 42: 14350–14354, 2016.
4. S.T. Kuo, W.H. Tuan, Y.W. Lao, et al., Grain growth behavior of Bi₂O₃-filled ZnO grains in a multilayer varistor, *J Am Ceram Soc.*, 91: 1572–1579, 2008.
5. M. Peiteado, Reyes Y, Cruz AM, et al., Microstructure engineering to drastically reduce the leakage currents of high voltage varistor ceramics, *J Am Ceram Soc.*, 95: 3043–3049, 2012.

6. J.N. Cai, Y.H. Lin, M. Li, et al., Sintering temperature dependence of grain boundary resistivity in a rare-earth-filled ZnO varistor, *J Am Ceram Soc.*, 90: 291–294, 2007.
7. D. Szwagierczak, J. Kulawik, A. Skwarek, Influence of processing on microstructure and electrical characteristics of multilayer varistors, *Journal of Advanced Ceramics*, 8(3): 408–417, 2019.
8. N. Gurbanov, Investigation of the effect of Clay, GNP and SiO₂ nanoparticle additions on the mechanical properties of hybrid FMLs, *Advanced Physical Research*, 5(3): 146-155, 2023.
9. S. Savaş, N. Gurbanov, M. Doğan, Effect of fiber type, fiber content, and compatibilizer on two-body abrasive wear performance of HDPE matrix composites, *Journal of Composite Materials*, 53(19): 2743–2760, 2019.
10. N. Gurbanov, M.Y. Askin, M. Babanli, Y. Turen, An investigation of mechanical properties of different nanoparticle reinforced 7075-T6 Al matrix hybrid fiber metal laminated composites, *Functional Materials*, 29(1): 172-181, 2022.
11. N.A. Gurbanov, M.B. Babanli, Investigation of effects of graphene nanoplatelets addition on mechanical properties of 7075-T6 aluminium matrix hybrid fibre metal laminates, *Metallophysics and Advanced Technologies*, 43(12): 1589-1599, 2021.
12. M. Babanli, Y. Turen, N. Gurbanov, R. Mehtiyev, M.Y. Askin, M. Ismayilov, Theory and experiment in predicting the strength of hybrid fiber metal laminates, *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 9(4): 987-999, 2023.
13. M.B. Babanli, N.A. Gurbanov, R.K. Mehtiyev, Formation and growth of cracks in 7075-T6 aluminium matrix hybrid FML nanocomposite materials, *Progress in Physics of Metals*, 23(3): 489-509, 2022.
14. N.A. Gurbanov, I.I. Abbasov, K.H. Ismayilova, N.A. Hasanova, Production of polypropylene matrix polymer composites with hazelnut shell fillings, physical and mechanical properties, *Nanosistemi Nanomateriali Nanotehnologii*, 16(3): 559–565, 2018.
15. M. Babanli, R. Mekhtiyev, N. Gurbanov, J. Aslanov, Yu. Tanriverdiev, Cracks in hybrid fiber metal laminated nanocomposites under uniaxial tension, *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 63:876–883, 2022.
16. Hasanov, I. Abbasov, N.Gurbanov, Stress-deformed state of a packing ring with eccentric holes. *Proceedings of The Latvian Academy of Sciences. Section B*, 74(4): 287–292, 2020.
17. T.G. Jabbarov, N.A. Gurbanov, Synthesis of optimal technological parameters of “iron-cast-glass” grinding composite materials using fuzzy logic and big data concepts, *International Conference on Theory and Applications of Fuzzy Systems and Soft Computing*, 254-259, 2020.
18. A.M. Hashimov, Sh.M. Hasanli, R.N. Mehtizadeh, Kh.B. Bayramov, Sh.M. Azizova, Zinc oxide and polymer based composite varistors, *PhysicaStatus Solidi*, 3(8): 2871- 2875, 2006.
19. A.M. Hashimov, S.M. Hasanli, R.N. Mehtizadeh, Sh.M. Azizova, K.B. Bayramov, The Nonlinear Resistor on the Basis of a Composition Polymer - Ceramics, *JTF*, 77(8): 127-130, 2007.
20. M.A. Kurbanov, Sh.M. Ahadzade, I.S. Ramazanova, Z.A. Dadashov, I.A. Farajzade, Varistor effect in highly heterogeneous polymer-ZnO systems, *FTP*, 51(7): 992-997, 2017.
21. Sh.M. Ahadzade, A.M. Hashimov, Variation of the main parameters composite varistors based on ZnO”, *The 16th International Conference on Technical and Physical Problems of Engineering (ICTPE-2020)*, Rumeli University, Number 21, pp.99-101, Istanbul, Turkey, 12-13 October 2020.
22. Sh.M. Ahadzade, A.M. Hashimov, Sh.G. Khalilova, Research of the electrical properties of composite varistors based on ZnO-Polymer, *17th International Conference on Technical and Physical Problems of Engineering (ICTPE-2021)*, Rumeli University, 18-19 October 2021, Istanbul, Turkey.
23. A.M. Hashimov, S.M. Hasanli, R.N. Mehtizadeh, K.B. Bayramov, Sh.M. Azizova, Zinc oxide and polymer based composite varistors, *PhysicalStatus Solidi*, 8: 2871-2875, 2006.
24. Sh.M. Ahadzade, A.M. Hashimov, Possibility varistor effect of different properties in polymers, *12th International Conference on Technical and Physical Problems of Power Engineering (ICTPE-2016)*, University of the Basque, Number 36, 7-9 September 2016, Bilbao, Spain.
25. A.M. Hashimov, K.B. Kurbanov, S.M. Hasanli, R.N. Mehtizadeh, Sh.M. Azizova, K.B. Bayramov, Varistor, State Agency for Standardization, Metrology and Patent of Azerbaijan, 60, I, 2007.
26. M.A. Kurbanov, Sh.M. Ahadzade, I.S. Ramazanova, Z.A. Dadashov, I.A. Farajzade, Varistor effect in highly heterogeneous polymer-ZnO systems, *FTP*, 51(7): 992-997, 2017.
27. Sh.M. Ahadzade, I.A. Vakulenko, Kh. Askerov, Research of electrophysical parameters of composite varistors, *82nd International Scientific and Practical Conference -Problems and Prospects of the Development of Rail Transport*, 20-21 April 2023, Dnipro, Ukraine.

28. Sh.M. Ahadzadeh, A.M. Hashimov, Sh.G. Khalilova, Research of the electrical properties of composite varistors based on ZnO-Polymer, *International Journal on Technical and Physical Problem of Engineering (IJTPE)*, 14(1): 166-171, 2022.
29. Sh.M. Ahadzade, T.K. Nurubeyli, E.Z. Quliyev, A.N. Sultanli. Technological and electrophysical parameters of ZnO varistor with impurities, *IJTPE*, 15(2): 307-311, 2023.
30. Sh.M. Ahadzade, A.Y. Imanova. Varistor characteristics of composites made based on ZnO and Si semiconductor materials, *The 5th International scientific and practical conference-Science and innovation of modern world*, January 25-27 2023, London, United Kingdom.
31. Sh.M. Ahadzade, I.A. Vakulenko, K. Asgarov, Influence Factors on Electrophysical Parameters of Composite Varistors, *Transport Science and Progress*, 1:101, 29-36, 2023.
32. Sh.M. Ahadzade, T.K. Nurubeyli, E.Z. Quliyev, Role kinetic and electrophysical parameters on conductivity in semiconductor- polymer based thin film composites with different ceramic phase. *The 19th International Conference on Technical and Physical Problems of Engineering*, 63-68, 31 October, 2023.

İşlenmesi Zor Malzemelerin Tornalanması İçin En Uygun İşleme Sıcaklıklarının Makine Öğrenmesi İle Belirlenmesi

Ebru ADIYAMAN^{1,*} , Ali Osman ER¹ 

¹Kırıkkale Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 02.04.2024

Kabul: 26.04.2024

Anahtar Kelimeler:

Talaşlı imalat
Ön ısıtılmalı işleme
İşleme sıcaklığı
CNC tornalama
Makine öğrenmesi

ÖZET

Talaşlı imalat, geleneksel bir işleme yöntemi olmasına rağmen diğer alternatif işleme yöntemlerine göre işlenmesi zor, yüksek mukavemetli ya da kırılğan malzemelerin işlenmesine ve bunun yanı sıra yüzey kalitesinin de iyileştirilebilmesine olanak sağladığı için tercih sebebi olmaktadır. Yüksek mukavemetli titanyum alaşımlarının, paslanmaz çeliklerin, takım çeliklerinin, kompleks özelliklere sahip silisyum nitrür seramiklerin, yani işlenmesi zor malzemelerin geleneksel işlenmesi, düşük kesme hızlarının kullanılması nedeniyle verimsiz olmaktadır. Bu durumun etkisini azaltmak ve üretkenliği artırmak için ileri kesici takımların tercih edilmesi, soğutma ve yağlama sistemlerinin kullanılması ve ön ısıtılmalı işleme gibi yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada en uygun işleme sıcaklığını tespit etmek için makine öğrenmesi kullanılmıştır. Makine öğrenmesi modeli, Karar Ağacı Regresyon (Decision Tree Regression) ve Rastgele Orman Regresyon (Random Forest Regression) algoritmaları kullanılarak oluşturulmuştur. Makine öğrenmesi modelinin performans metriklerinden R^2 değeri her iki model için de 0.98 bulunurken, Ortalama Mutlak Yüzde Hata (MAPE) değeri Karar Ağacı Regresyonu için %1.27, Rastgele Orman Regresyonu için %1.87 olarak bulunmuştur. Bulunan metrikler değerlendirildiğinde, modelin performansının başarılı olduğu görülmektedir. Çalışmanın sonucunda verileri girilen malzemeler ve koşullar için istenilen işleme değişkenlerine karşılık uygun işleme sıcaklığını tespit edecek makine öğrenmesi gerçekleştirilmiştir.

Determination of the Most Suitable Machining Temperatures for Turning Hard-to-Cut Materials by Machine Learning

ARTICLE INFO

Received: 02.04.2024

Accepted: 26.04.2024

Keywords:

Machining
Preheated machining
Processing temperature
CNC turning
Machine learning

ABSTRACT

Although machining is a traditional machining method, it is preferred because it allows the processing of difficult-to-machine, high-strength or brittle materials compared to other alternative machining methods, as well as improving the surface quality. Conventional machining of high-strength titanium alloys, stainless steels, tool steels, silicon nitride ceramics with complex properties, i.e. difficult-to-machine materials, is inefficient due to the use of low cutting speeds. In order to reduce the impact of this situation and increase productivity, methods such as the preference of advanced cutting tools, the use of cooling and lubrication systems, and preheated machining are used. In this study, machine learning was used to determine the optimal processing temperature. The machine learning model was created using Decision Tree Regression and Random Forest Regression algorithms. Among the performance metrics of the machine learning model, the R^2 value was 0.98 for both models and the Mean Absolute Percentage Error (MAPE) value was 1.27% for Decision Tree Regression and 1.87% for Random Forest Regression. When the metrics found are evaluated, it is seen that the performance of the model is successful. As a result of the study, machine learning was performed to determine the appropriate machining temperature for the desired machining variables for the materials and conditions for which data were entered.

*Sorumlu yazar, e-posta: adymnnebru@gmail.com

To cite this article: E. Adıyaman, A O. Er, İşlenmesi Zor Malzemelerin Tornalanması İçin En Uygun İşleme Sıcaklıklarının Makine Öğrenmesi İle Belirlenmesi, Manufacturing Technologies and Applications, 5(1),46-64, 2024.

<https://doi.org/10.52795/mateca.1463257>, This paper is licensed under a CC BY-NC 4.0

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Talaşlı imalat, iş parçası üzerinden talaş kaldırılarak malzemeyi istenilen forma getirmek için kullanılan geleneksel bir imalat yöntemidir. Geleneksel bir imalat yöntemi olmasına rağmen talaşlı imalat, otomotiv, medikal, havacılık, savunma sanayi, makine imalatı vb. birçok sektör için geçmişte olduğu gibi gelecekte de önemini korumaya devam edecek olan bir sektördür. İmalat sektöründe bu kadar büyük öneme sahip olan talaşlı imalatın, avantajlarının yanı sıra dezavantajları da bulunmaktadır. İşlenmesi zor malzemelerin, işlenmesi sırasında açığa çıkan yüksek ısı nedeniyle işlenen malzeme ve kesici takımında deformasyonlar meydana gelmektedir. Aynı zamanda kaldırılan talaşın sünekliliği nedeniyle de malzeme yüzeyinde pürüzler oluşmaktadır. Bütün bu durumlar maliyet ve zaman açısından istenmeyen durumlardır. Bu durumların önüne geçmek için kullanılan yöntemler arasında bulunan ön ısıtılmalı işleme yöntemleri, torna tezgahına monte edilmiş harici bir ısı kaynağı ile malzemeyi ısıtarak, direncini ve akma dayanımını azaltıp, normal işleme ile işlenmesi zor olan malzemeleri daha kolay işlemeyi, malzeme ve takım deformasyonunu en aza indirmeyi ve malzemenin yüzey kalitesini iyileştirmeyi hedeflemektedir. Günümüz teknolojisiyle birlikte imalat sektöründeki rekabetin artmasıyla, üreticilerden istenilen yalnızca uygun maliyetli ürünler değil, aynı zamanda yüksek kalitede ve en kısa sürede teslim edilen ürünler olmuştur[1]. Bu nedenle geleneksel imalat sektörünün daha verimli hale getirilebilmesi için, üretim süreçlerinin analiz edilerek iyileştirilmesi, modern teknolojilerin veya veri odaklı yaklaşımların uygulanması gerekmektedir. Binali vd, (2022), yaptıkları çalışmada S960QL yapı çeliğinin işlenebilirliğini artırmak için sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlardır. İşlenmesi zor bir malzeme olan S960QL yapı çeliğinin, talaşlı imalatı sırasında yüksek güç tüketimi meydana gelmekte ve maliyeti artırmaktadır. Bu durumu en aza indirmek amacıyla, S960QL yapı çeliğinin frezelenmesinde, kesme parametrelerine bağlı olarak sonlu elemanlar yöntemi ile güç tüketimi modellemesi yapmışlardır. Çalışmanın sonucunda, işleme parametrelerinin güç tüketimine etkisinin belirlenmesi için FE modelinin uygun olduğunu tespit etmişlerdir[2]. Asiltürk vd. (2023), yaptıkları çalışmada AISI 4140 çeliğinin tormalanmasında kesme hızı, kesme derinliği ve ilerleme gibi kesme parametrelerinin, yüzey pürüzlülüğü ve titreşimler üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Tormalama işlemi sonrasında yüzey pürüzlülüğü ve akustik emisyon değerleri ölçülmüştür. Matlab programı kullanılarak kural tabanlı bulanık mantık modeli oluşturulmuş ve deney sonrası ölçülen değerler ile bulanık mantık modelinin tahmin sonuçları karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Değerlendirmeler sonucunda, kural tabanlı bulanık mantık modelinin başarılı olduğu tespit edilmiştir[3]. Gupta vd. (2022) yaptıkları çalışmada Ti6Al4V alaşımının kuru tormalama ve LN₂/CO₂ soğutma destekli tormalama işlemleri sırasında, kesme kuvvetlerini ve kesme sıcaklıklarını ölçmüşlerdir ve bu prosesin sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile simülasyonunu yaparak deney sonuçları ile simülasyon sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Çalışmanın sonucunda, kesme sıcaklığı için sonlu elemanlar modeli ile deneysel sonuçlar arasındaki sapmaların; kuru, LN₂ ve CO₂ soğutma koşulları için sırasıyla ortalama %5,54, %5,18 ve %8,42 olduğunu, kesme kuvveti için sonlu elemanlar modeli ve deney sonuçları arasındaki sapmaların; kuru, LN₂ ve CO₂ soğutma koşulları için sırasıyla %3.74, %3.358 ve %3.03 olduğunu tespit etmişlerdir [4].

Bu çalışmanın amacı, işlenmesi zor malzemelerin tormalanmasında belirli malzemeler için en uygun işleme sıcaklığını, deneyleri yapılarak bulunmuş en düşük yüzey pürüzlülük değerlerini veren deney parametreleri ve deney esnasında ölçülen sıcaklık değerleri ile oluşturulan veri seti kullanılarak makine öğrenmesi modeli oluşturmak ve bu model ile ara değerler için de tahminler yapabilmektir. Çalışmanın sonucunda, veri seti baz alınarak istenilen değerlerde; kesme hızı, ilerleme hızı, kesme derinliği, malzeme, kesici takım ve yüzey pürüzlülük değeri parametreleri modele girilerek, en uygun işleme sıcaklığı tahmin edilebilecektir. İstenilen parametre değerleri girilerek, sıcaklık tahmininde bulunulacağı için, ara değerler için de yapılmak istenen deney için ön hazırlık ile belirlenmiş parametreler için de deneme yanılma yöntemine gerek kalmadan, tahmin edilen sıcaklığa göre işlem yapılabilir. Tespit edilen en uygun işleme sıcaklığı ile deney öncesinde uygun ortam koşulları sağlanarak deneye başlanacağı için kesme kuvvetinin, takım aşınmasının, iş parçasının aşınmasının/kırılmasının ve yüzey pürüzlülüğünün azaltılması sağlanarak

maliyetten ve zamandan tasarruf edilmiş olacaktır. Makine öğrenmesi için gerekli veri seti, diğer araştırmacılar tarafından deneyleri yapılarak elde edilmiş değerlerden oluşmaktadır.

2. İŞLENMESİ ZOR MALZEMELER (MATERIALS DIFFICULT TO CUT)

- Ti6Al4V, düşük yoğunluk ve yüksek mukavemet gibi önemli mekanik özelliklere sahiptir ve korozyona karşı oldukça dirençlidir. Bu özellikleri, uzay endüstrisi, havacılık, denizcilik, tıbbi implantlar ve diğer birçok uygulamada tercih edilmesini sağlamaktadır.
- Yüksek manganlı çelik, yüksek mukavemet, yüksek sertlik ve yüksek darbe dayanımı özelliklerine sahiptir. Diğer çelik türlerine göre oldukça zor işlenmektedir. Yüksek miktarda mangan içermesi sebebiyle, işleme esnasında sertleşebilir ve işleme için özel yöntem ve ekipmanlar gerektirebilmektedir. Yüksek manganlı çelik, aşınma direnci gerektiren uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Bunlar arasında, raylar, madencilik ekipmanları, inşaat makineleri, kırıcılar gibi alanlar bulunmaktadır.
- Basınçsız sinterlenmiş mullit seramikler, yüksek sıcaklık ve atmosfer basıncı altında sinterleme işlemiyle üretilmektedir. Sinterleme işlemi, yüksek sıcaklıkta seramik tozlarının yoğunlaştırılmasını sağlayarak mukavemetini ve yoğunluğunu artırmaktadır. Basınçsız sinterlenmiş mullit seramikler, refrakter malzemeler, termoelektrik uygulamalar, yüksek sıcaklıkta izolasyon, endüstriyel fırınlar, ısı motorları, metal eritme fırınları, potalar ve diğer yüksek sıcaklık gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.
- S960QL yapı çeliği, iyi tokluk, yüksek mukavemet, iyi korozyon direnci ve düşük sıcaklıklarda çatlama direnci gibi önemli özelliklere sahiptir. Soğuk iklimlerde veya düşük sıcaklık gerektiren uygulamalarda kullanılabilir. Çeşitli endüstriyel uygulamalarda, özellikle dayanıklı ve sağlam yapılar için tercih edilmektedir. Kara taşıtları, köprüler, ekskavatörler, tarım makineleri, vinçler, madencilik ekipmanları, vinç kolları ve diğer benzeri uygulamalar için kullanılmaktadır.
- AISI 4140 çeliği, yüksek sertlik, tokluk, kaynaklanabilirlik ve aşınma direnci gibi özelliklere sahiptir. Dişliler, miller, ağır makineler, kamyonlar ve diğer endüstriyel makineler için yapısal parçaların üretiminde kullanılmaktadır.
- AISI 4340 çeliği, yüksek mukavemet ve tokluk özellikleriyle bilinen bir alaşım çeliğidir. Genellikle sertleştirilmiş olarak kullanılmakta ve sertleştirildiğinde yüksek mukavemet, iyi bir yorulma direnci, sertlik ve darbe dayanımı gibi özelliklere sahip olmaktadır. Özellikle havacılık, otomotiv, savunma ve enerji sektörlerinde kullanılmaktadır. Uçak parçaları, şanzıman ve aks parçaları, askeri ekipmanlar, denizcilik ekipmanları gibi yüksek mukavemet ve tokluk gerektiren durumlarda tercih edilmektedir.

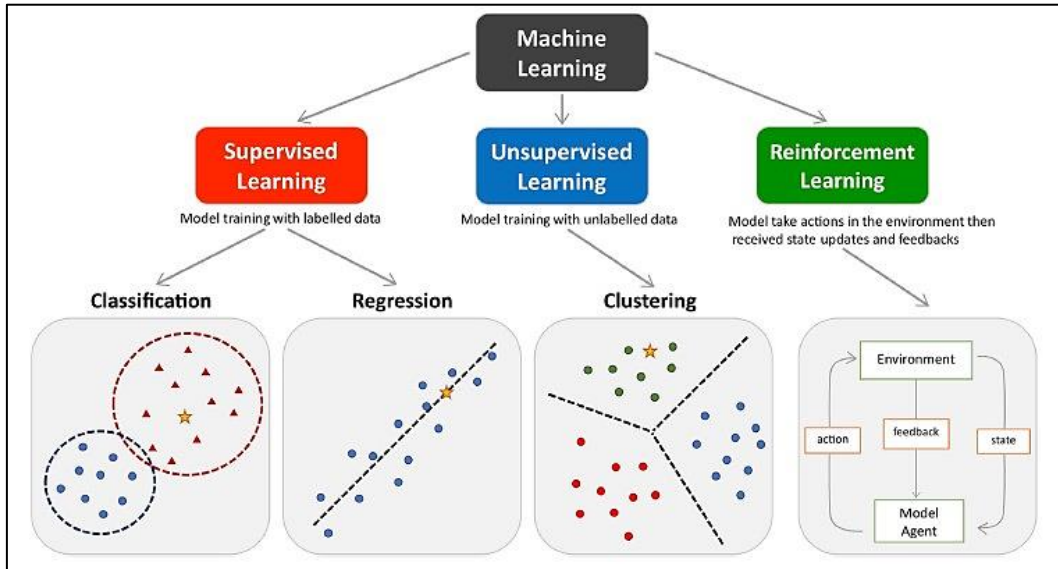
2.1. İşlenmesi Zor Malzemelerin Ön Isıtmalı Tornalama Deneyleri İle Tespit Edilen En Uygun İşleme Sıcaklıkları (Optimal Machining Temperatures Determined by Pre-Heated Turning Experiments for Difficult-to-Cut Materials)

Torna tezgahında farklı ısıtma yöntemleri kullanılarak işlenmiş titanyum alaşımı (Ti6Al4V) için en uygun işleme sıcaklıkları; alevle ısıtma yöntemi için 450 °C [5], CO₂ lazer ile ısıtma yöntemi için 250 °C [6], bir başka lazerle ısıtma yöntemi deneyinde ise 500W için yaklaşık 350°C ve 1000W için 600°C [7] olduğu deneylerle tespit edilmiştir. Tosun vd. (2002), yaptıkları çalışmada torna tezgahında sıvı petrol gazı aleviyle ısıtılan yüksek manganlı çelik numuneler kullanarak, ilerleme hızı, kesme derinliği, kesme hızları ve yüzey sıcaklıkları gibi farklı kesme koşulları altında deneyler yapmışlardır. Takım ömrünün tahmini için ANN (yapay sinir ağları) ve regresyon analizi yöntemlerini kullanmışlardır. Yapılan deneylerin sonuçları incelendiğinde, yüksek manganlı çelik numunelerin sıcak işlenmesinde takım ömrünün, oda sıcaklığındaki işlemeye göre oldukça arttığı gözlemlenmiştir. En uzun takım ömrü 600 °C sıcaklığında elde edilirken, 400 °C için de yaklaşık

olarak aynı değerler elde edildiği için iş parçasının mikro yapısı ve maliyeti göz önünde bulundurularak optimum işleme sıcaklığı 400 °C seçilmiştir [8]. Yüksek manganlı çelik kullanılarak yapılan bir başka çalışmada ise Maity vd. (2008), torna tezgahında alevle ısıtılarak işlenen yüksek manganlı çelik için en uygun işleme sıcaklığının 200-600°C aralığında olduğunu tespit etmişlerdir [9]. Rebro vd. (2004), yaptıkları çalışmada basınçsız sinterlenmiş mullit seramiklerin, lazer destekli işlenmesinin değerlendirilmesine odaklanmışlardır. Lazer ısı kaynağı olarak CO₂ lazer kullanmışlardır. Tornalama işlemi, CNC taret torna tezgahında gerçekleştirilmiştir. 1100-1300°C'lerde en iyi yüzey pürüzlülüğünü, takım aşınma direncini ve talaş formunu elde etmişlerdir [10]. AISI 4340 alaşımlı çeliğin, alevle ısıtılarak tornalanmasında ise en uygun işleme sıcaklığı 650 °C olarak bulunmuştur [5]. AISI 4340 alaşımlı çelik kullanılarak yapılan bir başka çalışmada, TIG kaynağı ile ısıtılarak yapılan tornalama işlemlerinde ise en düşük yüzey pürüzlülük değerini veren en uygun işleme sıcaklığı 469 °C olarak bulunmuştur. Aynı çalışmada 49HRC sertliğindeki AISI 4340 alaşımlı çeliğin tornalanmasında ise en düşük yüzey pürüzlülük değerini veren en uygun işleme sıcaklığı 497 °C olarak bulunmuştur [13]. Bu çalışmalar incelendiğinde büyük sorunlardan birinin işleme değişkenleri değiştikçe değişen uygun sıcaklığın belirlenmesi olduğu görülmektedir. Bu sebeple günümüzün önemli çalışma alanlarından olan yapay zeka kullanımı ve makine öğrenmesi ile bu problemin çözülebileceği düşünülmektedir.

3. MAKİNE ÖĞRENMESİ (MACHINE LEARNING)

Makine öğrenmesi, yapay zeka alanının önemli bir alt dalıdır. Temel olarak, bilgisayar sistemlerinin veri setlerini kullanarak, belirli görevleri yerine getirebilmesi için öğrenme yeteneği kazanmalarını sağlayan algoritmalar ve teknikler bütünüdür. Bu algoritmalar ve teknikler, bir modelin veri setindeki desenleri tanımasını, ilişkileri anlamasını ve tahminler yapabilmesini sağlamaktadır. Makine öğrenimi, denetimli öğrenme, denetimsiz öğrenme ve pekiştirilmiş öğrenme olmak üzere üç ana kategoride incelenmektedir.



Şekil 1. Makine öğrenimi türleri (Types of machine learning) [11]

3.1. Denetimli Öğrenme (Supervised Learning)

Modelin eğitilmesi için etiketlenmiş veriler kullanılmaktadır. Etiketler, giriş verileriyle ilişkilendirilmiş doğru çıktıları temsil etmektedir. Yani model veri setine bağlı olarak, kendisine öğretilen bağımsız değişkenleri (özellikleri) kullanarak, bağımlı (hedef) değişkeni tahmin etmektedir. Sınıflandırma ve regresyon problemlerini çözmek için kullanılmaktadır.

- Sınıflandırma: Algoritmanın amacı, giriş verilerini önceden tanımlanmış bir dizi kategoriye veya sınıfa atamaktır. Bir e-postanın spam veya spam olmayan olarak sınıflandırılması bu kategori için örnek gösterilebilir.
- Regresyon: Çıktı değişkeni sürekli bir sayısal değer olmakla birlikte algoritma, giriş verileri arasındaki ilişkiyi modelleyerek, belirli bir girdiye karşılık gelen bir çıktı değerini tahmin etmektedir. Bir evin fiyatının belirlenmesi için evin özelliklerine dayalı bir regresyon modeli kullanılarak, evin fiyatı hakkında tahminlerde bulunulması bu kategori için örnek gösterilebilir.
- Karar Ağacı Regresyon (Decision Tree Regression): Veri setindeki bağımsız değişkenler ile hedef değişken arasındaki ilişkiyi modellemek için kullanılmaktadır. Her bir bağımsız değişken için bir bölme kriteri belirlenerek veri seti bölünmekte ve bir ağaç yapısı oluşturulmaktadır. Ancak veri setindeki özelliklerin karmaşık ilişkilerini temsil etmek için tek ağaç yapısı kullanılması nedeniyle aşırı uyum (overfitting) riski taşımaktadır. Aşırı uyum, eğitim verilerine aşırı uyum sağlaması ya da eğitim verilerini ezberlemesi anlamına gelmektedir. Bu durum ise modelin performansını düşüreceği için istenilmeyen bir durumdur.
- Rastgele Orman Regresyon (Random Forest Regression): Birden fazla karar ağacının (ensemble) bir araya gelerek güçlü bir tahmin modelinin oluşturulduğu regresyon yöntemidir. Her bir ağaç, eğitim verilerinden rastgele örneklemeler (boots trap sampling) olarak oluşturulmaktadır. Bu yöntem, her ağacın farklı veri alt kümeleri üzerinde eğitilmesini sağladığı için ağaçlar birbirinden farklıdır ve genelleme yeteneği fazladır. Bu çeşitlilik ise ensemble modelinin aşırı uyum (overfitting) riskini azaltmaktadır.

3.2. Denetimsiz Öğrenme (Unsupervised Learning)

Veri setinde etiketlerin olmadığı durumları ele almaktadır. Algoritma, veri setindeki yapıları kendisi keşfetmeye çalışır ve veri noktalarını birbirlerine olan benzerliklerine göre gruplandırır. Kümeleme ve boyut azaltma gibi görevlerde kullanılmaktadır. Örneğin, bir sosyal medya platformundaki kullanıcıları farklı ilgi alanlarına göre gruplandırmak için denetimsiz öğrenme modeli kullanılmaktadır.

Makine öğrenmesi, kompleks veri setlerini analiz etmek, kararlar vermek, tahminler yapmak ve otomatik sistemler oluşturmak için geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu yöntem sağlık, üretim, otomotiv, finans ve daha birçok endüstriye uygulanabilmekte ve bu endüstrilerde veriye dayalı karar alma süreçlerini güçlendirmektedir. Makine öğrenmesi sağlık sektöründe, hastaların sağlık verilerini (örneğin, kan basıncı, nabız, oksijen seviyeleri) analiz ederek, sağlık durumlarını değerlendirmek ve belirli hastalıklara yakalanma risklerini tahmin etmek için kullanılmaktadır. Bu durum, belirli bir hastalığa yakalanma riski yüksek olan bireylerin tanımlanmasına ve proaktif tedbirler alınmasına yardımcı olmaktadır. Talaşlı imalat sektöründe ise Gündüz (2006) yaptığı çalışmada, CNC torna tezgahında PA malzemelerini işleyerek ilerleme, kesme hızı ve kesme derinliği parametrelerine bağlı olarak kesici uca etki eden kuvvetleri dinamometre yardımıyla ölçmüştür. Bulanık mantık ve yapay sinir ağları tekniklerini kullanarak, kesme kuvveti tahmin modelleri oluşturup, deneysel çalışmayla elde edilen değerler ile karşılaştırarak yorumlamış ve kesme kuvvetlerinin tahmininde hangi yöntemin daha uygun olduğunu araştırmıştır. Burada yapay zeka tekniklerine başvurulmasının amacı, ara değerlerdeki parametreler ile kesme kuvvetlerinin tespit edilmesinde maliyet ve zaman açısından çok sayıda deney yapmanın mümkün olmadığı durumlarda, ara değerlere göre de kesme kuvvetlerinin tahminlerinde bulunabilmektir [12]. Tosun vd. (2002), yaptıkları çalışmada torna tezgahında alevle ısıtılan yüksek manganlı çelik numuneler kullanarak, ilerleme hızı, kesme derinliği, kesme hızları ve yüzey sıcaklıkları gibi farklı kesme

koşulları altında deneyler yaparak takım ömrünün tahmini için yapay sinir ağları ve regresyon analizi yöntemlerini kullanmışlardır [8].

Yukarıdaki çalışmaların incelenmesi neticesinde işlenmesi güç malzemelerin belirli sıcaklıklarda daha kolay işlendiği görülmüş fakat bu sıcaklığın tahmin edilmesi için makine öğrenmesi ile bir çalışma yapılmadığı tespit edilmiştir. Bu sebeple çalışmanın sonucunda verileri girilen malzemeler ve koşullar için istenilen işleme değişkenlerine karşılık uygun işleme sıcaklığını tespit edecek makine öğrenmesi uygulaması gerçekleştirilmiştir.

4. YÖNTEM (METHOD)

Makine öğrenmesi modeli için kullanacağımız veri seti, Uğraş (2022), ‘İşlenmesi Zor Malzemelerin Yüksek Talaş Kaldırma Oranlarıyla İşlenmesi İçin Isı Destekli Hibrid Sistemin Geliştirilmesi Ve Çalışma Parametrelerinin Belirlenmesi’ isimli çalışmada yaptığı deney parametrelerinden ve Kavak (2019), ‘İşlenmesi Zor Malzemenin Tornalanmasının Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin İstatistiksel Yöntem İle İncelenmesi’ isimli çalışmada yaptığı deney parametrelerinden oluşmaktadır [13,5].

Uğraş (2022), İşlenmesi Zor Malzemelerin Yüksek Talaş Kaldırma Oranlarıyla İşlenmesi İçin Isı Destekli Hibrid Sistemin Geliştirilmesi ve Çalışma Parametrelerinin Belirlenmesi isimli doktora tezi deney parametreleri Tablo 1’de gösterilmektedir [13].

Tablo 1. Deney parametreleri (Experimental parameters) [13]

Kesme Hızı (m/dak)	Kesme Derinliği (mm)	İlerleme Hızı (mm/dev)	Yüzey Pürüzlülük Değeri (μm)	Malzeme	Kesici Takım	Sıcaklık ($^{\circ}C$)
275	1	0.11	0.871	AISI4340	Kaplamalı_Karbür	388
275	1	0.11	0.805	AISI4340	Kaplamalı_Karbür	463
275	1	0.11	0.787	AISI4340	Kaplamalı_Karbür	466
275	1	0.11	0.72	AISI4340	Kaplamalı_Karbür	475
275	1	0.18	1.412	AISI4340	Kaplamalı_Karbür	265
275	1	0.18	1.294	AISI4340	Kaplamalı_Karbür	453
275	1	0.18	1.254	AISI4340	Kaplamalı_Karbür	455
275	1	0.18	1.204	AISI4340	Kaplamalı_Karbür	455
275	1	0.24	2.655	AISI4340	Kaplamalı_Karbür	257
275	1	0.24	2.416	AISI4340	Kaplamalı_Karbür	394
275	1	0.24	2.388	AISI4340	Kaplamalı_Karbür	405
275	1	0.24	2.405	AISI4340	Kaplamalı_Karbür	410
305	1	0.11	0.827	AISI4340	Kaplamalı_Karbür	386
305	1	0.11	0.763	AISI4340	Kaplamalı_Karbür	447
305	1	0.11	0.684	AISI4340	Kaplamalı_Karbür	449
305	1	0.11	0.649	AISI4340	Kaplamalı_Karbür	472
305	1	0.18	1.404	AISI4340	Kaplamalı_Karbür	263
305	1	0.18	1.273	AISI4340	Kaplamalı_Karbür	441
305	1	0.18	1.261	AISI4340	Kaplamalı_Karbür	446
305	1	0.18	1.233	AISI4340	Kaplamalı_Karbür	446
305	1	0.24	2.542	AISI4340	Kaplamalı_Karbür	255
305	1	0.24	2.406	AISI4340	Kaplamalı_Karbür	387
305	1	0.24	2.371	AISI4340	Kaplamalı_Karbür	392
305	1	0.24	2.418	AISI4340	Kaplamalı_Karbür	405

335	1	0.11	0.817	AISI4340	Kaplamalı_Karbür	383
335	1	0.11	0.745	AISI4340	Kaplamalı_Karbür	435
335	1	0.11	0.673	AISI4340	Kaplamalı_Karbür	445
335	1	0.11	0.646	AISI4340	Kaplamalı_Karbür	469
335	1	0.18	1.38	AISI4340	Kaplamalı_Karbür	261
335	1	0.18	1.27	AISI4340	Kaplamalı_Karbür	428
335	1	0.18	1.268	AISI4340	Kaplamalı_Karbür	433
335	1	0.18	1.228	AISI4340	Kaplamalı_Karbür	444
335	1	0.24	2.429	AISI4340	Kaplamalı_Karbür	253
335	1	0.24	2.381	AISI4340	Kaplamalı_Karbür	360
335	1	0.24	2.366	AISI4340	Kaplamalı_Karbür	368
335	1	0.24	2.378	AISI4340	Kaplamalı_Karbür	401
159	1	0.11	0.833	49HRC_AISI4340	Kaplamalı_Karbür	458
159	1	0.11	0.788	49HRC_AISI4340	Kaplamalı_Karbür	492
159	1	0.11	0.757	49HRC_AISI4340	Kaplamalı_Karbür	495
159	1	0.11	0.648	49HRC_AISI4340	Kaplamalı_Karbür	501
159	1	0.18	1.681	49HRC_AISI4340	Kaplamalı_Karbür	441
159	1	0.18	1.539	49HRC_AISI4340	Kaplamalı_Karbür	476
159	1	0.18	1.509	49HRC_AISI4340	Kaplamalı_Karbür	479
159	1	0.18	1.513	49HRC_AISI4340	Kaplamalı_Karbür	493
159	1	0.24	2.513	49HRC_AISI4340	Kaplamalı_Karbür	398
159	1	0.24	2.326	49HRC_AISI4340	Kaplamalı_Karbür	453
159	1	0.24	2.328	49HRC_AISI4340	Kaplamalı_Karbür	474
159	1	0.24	2.353	49HRC_AISI4340	Kaplamalı_Karbür	479
176	1	0.11	0.812	49HRC_AISI4340	Kaplamalı_Karbür	451
176	1	0.11	0.741	49HRC_AISI4340	Kaplamalı_Karbür	486
176	1	0.11	0.733	49HRC_AISI4340	Kaplamalı_Karbür	490
176	1	0.11	0.671	49HRC_AISI4340	Kaplamalı_Karbür	500
176	1	0.18	1.623	49HRC_AISI4340	Kaplamalı_Karbür	435
176	1	0.18	1.549	49HRC_AISI4340	Kaplamalı_Karbür	469
176	1	0.18	1.56	49HRC_AISI4340	Kaplamalı_Karbür	471
176	1	0.18	1.42	49HRC_AISI4340	Kaplamalı_Karbür	488
176	1	0.24	2.441	49HRC_AISI4340	Kaplamalı_Karbür	397
176	1	0.24	2.352	49HRC_AISI4340	Kaplamalı_Karbür	452
176	1	0.24	2.305	49HRC_AISI4340	Kaplamalı_Karbür	462
176	1	0.24	2.275	49HRC_AISI4340	Kaplamalı_Karbür	475
194	1	0.11	0.793	49HRC_AISI4340	Kaplamalı_Karbür	447
194	1	0.11	0.744	49HRC_AISI4340	Kaplamalı_Karbür	484
194	1	0.11	0.658	49HRC_AISI4340	Kaplamalı_Karbür	489
194	1	0.11	0.631	49HRC_AISI4340	Kaplamalı_Karbür	497
194	1	0.18	1.526	49HRC_AISI4340	Kaplamalı_Karbür	432
194	1	0.18	1.414	49HRC_AISI4340	Kaplamalı_Karbür	467
194	1	0.18	1.448	49HRC_AISI4340	Kaplamalı_Karbür	470
194	1	0.18	1.446	49HRC_AISI4340	Kaplamalı_Karbür	486
194	1	0.24	2.509	49HRC_AISI4340	Kaplamalı_Karbür	394
194	1	0.24	2.455	49HRC_AISI4340	Kaplamalı_Karbür	442
194	1	0.24	2.394	49HRC_AISI4340	Kaplamalı_Karbür	443
194	1	0.24	2.343	49HRC_AISI4340	Kaplamalı_Karbür	465

Kavak (2019), ‘İşlenmesi Zor Malzemenin Tornalanmasının Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin İstatistiksel Yöntem ile İncelenmesi’ isimli yüksek lisans tezi deney parametreleri Tablo 2’de gösterilmektedir.[5]

Tablo 2. Deney parametreleri (Experimental parameters) [5]

Kesme Hızı (<i>m/dak</i>)	Kesme Derinliği (<i>mm</i>)	İlerleme Hızı (<i>mm/dev</i>)	Yüzey Pürüzlülük Değeri (μm)	Malzeme	Kesici Takım	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)
92.67	1	0.098	1.26	Ti6Al4V	KSZ	20
92.67	1	0.098	1.12	Ti6Al4V	KSZ	250
92.67	1	0.098	0.95	Ti6Al4V	KSZ	450
92.67	1	0.098	1.57	Ti6Al4V	KSZ	650
92.67	1	0.196	2.6	Ti6Al4V	KSZ	20
92.67	1	0.196	2.31	Ti6Al4V	KSZ	250
92.67	1	0.196	1.93	Ti6Al4V	KSZ	450
92.67	1	0.196	3.11	Ti6Al4V	KSZ	650
185.35	1	0.098	1.34	Ti6Al4V	KSZ	20
185.35	1	0.098	1.24	Ti6Al4V	KSZ	250
185.35	1	0.098	1.07	Ti6Al4V	KSZ	450
185.35	1	0.098	1.7	Ti6Al4V	KSZ	650
185.35	1	0.196	2.87	Ti6Al4V	KSZ	20
185.35	1	0.196	2.54	Ti6Al4V	KSZ	250
185.35	1	0.196	2.17	Ti6Al4V	KSZ	450
185.35	1	0.196	3.45	Ti6Al4V	KSZ	650
278.03	1	0.098	1.61	Ti6Al4V	KSZ	20
278.03	1	0.098	1.47	Ti6Al4V	KSZ	250
278.03	1	0.098	1.35	Ti6Al4V	KSZ	450
278.03	1	0.098	2.03	Ti6Al4V	KSZ	650
278.03	1	0.196	3.34	Ti6Al4V	KSZ	20
278.03	1	0.196	2.98	Ti6Al4V	KSZ	250
278.03	1	0.196	2.62	Ti6Al4V	KSZ	450
278.03	1	0.196	3.98	Ti6Al4V	KSZ	650
92.67	1	0.098	1.34	Ti6Al4V	KPL	20
92.67	1	0.098	1.25	Ti6Al4V	KPL	250
92.67	1	0.098	1.13	Ti6Al4V	KPL	450
92.67	1	0.098	1.65	Ti6Al4V	KPL	650
92.67	1	0.196	2.81	Ti6Al4V	KPL	20
92.67	1	0.196	2.53	Ti6Al4V	KPL	250
92.67	1	0.196	2.25	Ti6Al4V	KPL	450
92.67	1	0.196	3.46	Ti6Al4V	KPL	650
185.35	1	0.098	1.41	Ti6Al4V	KPL	20
185.35	1	0.098	1.34	Ti6Al4V	KPL	250
185.35	1	0.098	1.24	Ti6Al4V	KPL	450
185.35	1	0.098	1.77	Ti6Al4V	KPL	650
185.35	1	0.196	3.07	Ti6Al4V	KPL	20
185.35	1	0.196	2.71	Ti6Al4V	KPL	250
185.35	1	0.196	2.43	Ti6Al4V	KPL	450

185.35	1	0.196	3.64	Ti6Al4V	KPL	650
278.03	1	0.098	1.73	Ti6Al4V	KPL	20
278.03	1	0.098	1.59	Ti6Al4V	KPL	250
278.03	1	0.098	1.5	Ti6Al4V	KPL	450
278.03	1	0.098	2.15	Ti6Al4V	KPL	650
278.03	1	0.196	3.62	Ti6Al4V	KPL	20
278.03	1	0.196	3.31	Ti6Al4V	KPL	250
278.03	1	0.196	2.95	Ti6Al4V	KPL	450
278.03	1	0.196	4.35	Ti6Al4V	KPL	650
92.67	1	0.098	1.12	Ti6Al4V	KİG	20
92.67	1	0.098	1.03	Ti6Al4V	KİG	250
92.67	1	0.098	0.79	Ti6Al4V	KİG	450
92.67	1	0.098	1.35	Ti6Al4V	KİG	650
92.67	1	0.196	2.25	Ti6Al4V	KİG	20
92.67	1	0.196	2.15	Ti6Al4V	KİG	250
92.67	1	0.196	1.65	Ti6Al4V	KİG	450
92.67	1	0.196	2.71	Ti6Al4V	KİG	650
185.35	1	0.098	1.24	Ti6Al4V	KİG	20
185.35	1	0.098	1.12	Ti6Al4V	KİG	250
185.35	1	0.098	0.94	Ti6Al4V	KİG	450
185.35	1	0.098	1.45	Ti6Al4V	KİG	650
185.35	1	0.196	2.51	Ti6Al4V	KİG	20
185.35	1	0.196	2.37	Ti6Al4V	KİG	250
185.35	1	0.196	1.9	Ti6Al4V	KİG	450
185.35	1	0.196	2.83	Ti6Al4V	KİG	650
278.03	1	0.098	1.41	Ti6Al4V	KİG	20
278.03	1	0.098	1.35	Ti6Al4V	KİG	250
278.03	1	0.098	1.19	Ti6Al4V	KİG	450
278.03	1	0.098	1.77	Ti6Al4V	KİG	650
278.03	1	0.196	3.05	Ti6Al4V	KİG	20
278.03	1	0.196	2.81	Ti6Al4V	KİG	250
278.03	1	0.196	2.29	Ti6Al4V	KİG	450
278.03	1	0.196	3.44	Ti6Al4V	KİG	650
92.67	1	0.098	2.03	AISI4340	KSZ	20
92.67	1	0.098	1.68	AISI4340	KSZ	250
92.67	1	0.098	1.46	AISI4340	KSZ	450
92.67	1	0.098	1.29	AISI4340	KSZ	650
92.67	1	0.196	4.08	AISI4340	KSZ	20
92.67	1	0.196	3.4	AISI4340	KSZ	250
92.67	1	0.196	3.01	AISI4340	KSZ	450
92.67	1	0.196	2.94	AISI4340	KSZ	650
185.35	1	0.098	1.78	AISI4340	KSZ	20
185.35	1	0.098	1.44	AISI4340	KSZ	250
185.35	1	0.098	1.2	AISI4340	KSZ	450
185.35	1	0.098	1.15	AISI4340	KSZ	650
185.35	1	0.196	3.55	AISI4340	KSZ	20
185.35	1	0.196	2.81	AISI4340	KSZ	250
185.35	1	0.196	2.51	AISI4340	KSZ	450

185.35	1	0.196	2.45	AISI4340	KSZ	650
278.03	1	0.098	1.59	AISI4340	KSZ	20
278.03	1	0.098	1.27	AISI4340	KSZ	250
278.03	1	0.098	1.15	AISI4340	KSZ	450
278.03	1	0.098	1.49	AISI4340	KSZ	650
278.03	1	0.196	3.31	AISI4340	KSZ	20
278.03	1	0.196	2.59	AISI4340	KSZ	250
278.03	1	0.196	2.34	AISI4340	KSZ	450
278.03	1	0.196	3.35	AISI4340	KSZ	650
92.67	1	0.098	1.66	AISI4340	KPL	20
92.67	1	0.098	1.42	AISI4340	KPL	250
92.67	1	0.098	1.2	AISI4340	KPL	450
92.67	1	0.098	1.06	AISI4340	KPL	650
92.67	1	0.196	3.41	AISI4340	KPL	20
92.67	1	0.196	2.81	AISI4340	KPL	250
92.67	1	0.196	2.43	AISI4340	KPL	450
92.67	1	0.196	2.33	AISI4340	KPL	650
185.35	1	0.098	1.4	AISI4340	KPL	20
185.35	1	0.098	1.16	AISI4340	KPL	250
185.35	1	0.098	0.93	AISI4340	KPL	450
185.35	1	0.098	0.87	AISI4340	KPL	650
185.35	1	0.196	2.71	AISI4340	KPL	20
185.35	1	0.196	2.25	AISI4340	KPL	250
185.35	1	0.196	1.89	AISI4340	KPL	450
185.35	1	0.196	1.76	AISI4340	KPL	650
278.03	1	0.098	1.25	AISI4340	KPL	20
278.03	1	0.098	1.02	AISI4340	KPL	250
278.03	1	0.098	0.85	AISI4340	KPL	450
278.03	1	0.098	0.76	AISI4340	KPL	650
278.03	1	0.196	2.54	AISI4340	KPL	20
278.03	1	0.196	1.95	AISI4340	KPL	250
278.03	1	0.196	1.67	AISI4340	KPL	450
278.03	1	0.196	1.62	AISI4340	KPL	650
92.67	1	0.098	1.88	AISI4340	KİG	20
92.67	1	0.098	1.55	AISI4340	KİG	250
92.67	1	0.098	1.29	AISI4340	KİG	450
92.67	1	0.098	1.16	AISI4340	KİG	650
92.67	1	0.196	3.65	AISI4340	KİG	20
92.67	1	0.196	3	AISI4340	KİG	250
92.67	1	0.196	2.61	AISI4340	KİG	450
92.67	1	0.196	2.45	AISI4340	KİG	650
185.35	1	0.098	1.55	AISI4340	KİG	20
185.35	1	0.098	1.29	AISI4340	KİG	250
185.35	1	0.098	1.09	AISI4340	KİG	450
185.35	1	0.098	0.98	AISI4340	KİG	650
185.35	1	0.196	3.01	AISI4340	KİG	20
185.35	1	0.196	2.45	AISI4340	KİG	250
185.35	1	0.196	2.11	AISI4340	KİG	450

185.35	1	0.196	2.05	AISI4340	KİG	650
278.03	1	0.098	1.4	AISI4340	KİG	20
278.03	1	0.098	1.12	AISI4340	KİG	250
278.03	1	0.098	1.01	AISI4340	KİG	450
278.03	1	0.098	1.27	AISI4340	KİG	650
278.03	1	0.196	2.85	AISI4340	KİG	20
278.03	1	0.196	2.23	AISI4340	KİG	250
278.03	1	0.196	1.91	AISI4340	KİG	450
278.03	1	0.196	2.81	AISI4340	KİG	650

Uğraş (2022), çalışmasında 72 adet deney yapmıştır. Yapılan bu deneylerde AISI 4340 çeliği için; 275, 305 ve 335 m/dak hızlarında, kesme derinliği 1 mm olacak şekilde sabit tutularak ve ilerleme hızları; 0.11 mm/dev için 4 adet deney, 0.18 mm/dev için 4 adet deney ve 0.24 mm/dev için 4 adet deney olmak üzere 12'şer adet, toplamda 36 deney yapmıştır. 49 HRC sertliğindeki AISI 4340 çeliği içinse; 159, 176 ve 194 m/dak hızlarında, kesme derinliği 1 mm olacak şekilde sabit tutularak ve ilerleme hızları; 0.11 mm/dev için 4 adet deney, 0.18 mm/dev için 4 adet deney ve 0.24 mm/dev için 4 adet deney olmak üzere 12'şer adet toplamda 36 deney yapmıştır.

Kavak (2019) çalışmasında, kesme derinliği 1 mm olacak şekilde sabit tutularak toplam 144 adet deney yapmıştır. Yapılan bu deneylerde Ti6Al4V titanyum alaşımı için, KİG (kriyojenik işlem görmüş karbür) kesici takım kullanarak, hız: 92,67 m/dak için; 0.098 mm/dev ilerleme hızında 4 adet deney, 0.196 mm/dev ilerleme hızında 4 adet deney, hız: 185,35 m/dak için; 0.098 mm/dev ilerleme hızında 4 adet deney, 0.196 mm/dev ilerleme hızında 4 adet deney, hız: 278,03 m/dak için; 0.098 mm/dev ilerleme hızında 4 adet deney, 0.196 mm/dev ilerleme hızında 4 adet deney olmak üzere toplam 24 adet deney, KPL (PVD kaplamalı karbür) kesici takım kullanarak, hız: 92,67 m/dak için; 0.098 mm/dev ilerleme hızında 4 adet deney, 0.196 mm/dev ilerleme hızında 4 adet deney, hız: 185,35 m/dak için; 0.098 mm/dev ilerleme hızında 4 adet deney, 0.196 mm/dev ilerleme hızında 4 adet deney, hız: 278,03 m/dak için; 0.098 mm/dev ilerleme hızında 4 adet deney, 0.196 mm/dev ilerleme hızında 4 adet deney olmak üzere toplam 24 adet deney, KSZ (kaplamasız karbür) kesici takım kullanarak, hız: 92,67 m/dak için; 0.098 mm/dev ilerleme hızında 4 adet deney, 0.196 mm/dev ilerleme hızında 4 adet deney, hız: 185,35 m/dak için; 0.098 mm/dev ilerleme hızında 4 adet deney, 0.196 mm/dev ilerleme hızında 4 adet deney, hız: 278,03 m/dak için; 0.098 mm/dev ilerleme hızında 4 adet deney, 0.196 mm/dev ilerleme hızında 4 adet deney olmak üzere toplam 24 adet deney, genel toplamda ise 72 adet deney yapmıştır. AISI 4340 çeliği için aynı şekilde, KİG (kriyojenik işlem görmüş karbür) kesici takım kullanarak, hız: 92,67 m/dak için; 0.098 mm/dev ilerleme hızında 4 adet deney, 0.196 mm/dev ilerleme hızında 4 adet deney, hız: 185,35 m/dak için; 0.098 mm/dev ilerleme hızında 4 adet deney, 0.196 mm/dev ilerleme hızında 4 adet deney, hız: 278,03 m/dak için; 0.098 mm/dev ilerleme hızında 4 adet deney, 0.196 mm/dev ilerleme hızında 4 adet deney olmak üzere toplam 24 adet deney, KPL (PVD kaplamalı karbür) kesici takım kullanarak, hız: 92,67 m/dak için; 0.098 mm/dev ilerleme hızında 4 adet deney, 0.196 mm/dev ilerleme hızında 4 adet deney, hız: 185,35 m/dak için; 0.098 mm/dev ilerleme hızında 4 adet deney, 0.196 mm/dev ilerleme hızında 4 adet deney, hız: 278,03 m/dak için; 0.098 mm/dev ilerleme hızında 4 adet deney, 0.196 mm/dev ilerleme hızında 4 adet deney olmak üzere toplam 24 adet deney, KSZ (kaplamasız karbür) kesici takım kullanarak, hız: 92,67 m/dak için; 0.098 mm/dev ilerleme hızında 4 adet deney, 0.196 mm/dev ilerleme hızında 4 adet deney, hız: 185,35 m/dak için; 0.098 mm/dev ilerleme hızında 4 adet deney, 0.196 mm/dev ilerleme hızında 4 adet deney, hız: 278,03 m/dak için; 0.098 mm/dev ilerleme hızında 4 adet deney, 0.196 mm/dev ilerleme hızında 4 adet deney olmak üzere toplam 24 adet deney, genel toplamda ise 72 adet deney yapmıştır.

Veri setimiz (dataset) ise, en uygun işleme sıcaklığını tespit etmeyi amaçladığımız için; aynı parametreler ile 4'er adet tekrarlanarak ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri arasından, en düşük yüzey pürüzlülüğünün ölçüldüğü sıcaklık değerleri ve deney parametreleri seçilerek oluşturulmuştur. Bu şekilde, Uğraş (2022) ve Kavak (2019) tarafından deneyleri yapılarak elde edilmiş toplam 216 adet olan veri sayısı (Tablo 1 ve Tablo 2'de gösterilmiştir), en düşük yüzey pürüzlülüğünün elde edildiği sıcaklık değerleri seçilerek oluşturulduğu için 54 adede düşürülmüştür. Oluşturulan veri seti Tablo 3'te gösterilmektedir.

Tablo 3. Veri seti (Data set) [13,5]

	Kesme_Hızı	Kesme_Derinliği	İlerleme	YPD	Malzeme	Kesici_Takım	Sıcaklık
1	275	1	0.11	0.72	AISI4340	Kaplamalı_Karbür	475
2	275	1	0.18	1.204	AISI4340	Kaplamalı_Karbür	455
3	275	1	0.24	2.388	AISI4340	Kaplamalı_Karbür	405
4	305	1	0.11	0.649	AISI4340	Kaplamalı_Karbür	472
5	305	1	0.18	1.233	AISI4340	Kaplamalı_Karbür	446
6	305	1	0.24	2.371	AISI4340	Kaplamalı_Karbür	392
7	335	1	0.11	0.646	AISI4340	Kaplamalı_Karbür	445
8	335	1	0.18	1.228	AISI4340	Kaplamalı_Karbür	444
9	335	1	0.24	2.366	AISI4340	Kaplamalı_Karbür	368
10	159	1	0.11	0.648	49HRC_AISI4340	Kaplamalı_Karbür	501
11	159	1	0.18	1.509	49HRC_AISI4340	Kaplamalı_Karbür	479
12	159	1	0.24	2.326	49HRC_AISI4340	Kaplamalı_Karbür	453
13	176	1	0.11	0.671	49HRC_AISI4340	Kaplamalı_Karbür	500
14	176	1	0.18	1.42	49HRC_AISI4340	Kaplamalı_Karbür	488
15	176	1	0.24	2.275	49HRC_AISI4340	Kaplamalı_Karbür	475
16	194	1	0.11	0.631	49HRC_AISI4340	Kaplamalı_Karbür	497
17	194	1	0.18	1.414	49HRC_AISI4340	Kaplamalı_Karbür	467
18	194	1	0.24	2.343	49HRC_AISI4340	Kaplamalı_Karbür	465
19	92.67	1	0.098	0.79	Ti6Al4V	KİG	450
20	92.67	1	0.196	1.65	Ti6Al4V	KİG	450
21	92.67	1	0.098	0.95	Ti6Al4V	KSZ	450
22	92.67	1	0.196	1.93	Ti6Al4V	KSZ	450
23	92.67	1	0.098	1.29	AISI4340	KSZ	650
24	92.67	1	0.196	2.94	AISI4340	KSZ	650
25	92.67	1	0.098	1.16	AISI4340	KİG	650
26	92.67	1	0.196	2.45	AISI4340	KİG	650
27	92.67	1	0.098	1.06	AISI4340	KPL	650
28	92.67	1	0.196	2.33	AISI4340	KPL	650
29	92.67	1	0.098	1.13	Ti6Al4V	KPL	450
30	92.67	1	0.196	2.25	Ti6Al4V	KPL	450
31	185.35	1	0.098	0.94	Ti6Al4V	KİG	450
32	185.35	1	0.196	1.9	Ti6Al4V	KİG	450
33	185.35	1	0.098	1.07	Ti6Al4V	KSZ	450
34	185.35	1	0.196	2.17	Ti6Al4V	KSZ	450
35	185.35	1	0.098	1.15	AISI4340	KSZ	650
36	185.35	1	0.196	2.45	AISI4340	KSZ	650
37	185.35	1	0.098	0.98	AISI4340	KİG	650
38	185.35	1	0.196	2.05	AISI4340	KİG	650

39	185.35	1	0.098	0.87	AISI4340	KPL	650
40	185.35	1	0.196	1.76	AISI4340	KPL	650
41	185.35	1	0.098	1.24	Ti6Al4V	KPL	450
42	185.35	1	0.196	2.43	Ti6Al4V	KPL	450
43	278.03	1	0.098	1.19	Ti6Al4V	KİG	450
44	278.03	1	0.196	2.29	Ti6Al4V	KİG	450
45	278.03	1	0.098	1.35	Ti6Al4V	KSZ	450
46	278.03	1	0.196	2.62	Ti6Al4V	KSZ	450
47	278.03	1	0.098	1.15	AISI4340	KSZ	450
48	278.03	1	0.196	2.34	AISI4340	KSZ	450
49	278.03	1	0.098	1.01	AISI4340	KİG	450
50	278.03	1	0.196	1.91	AISI4340	KİG	450
51	278.03	1	0.098	0.76	AISI4340	KPL	650
52	278.03	1	0.196	1.62	AISI4340	KPL	650
53	278.03	1	0.098	1.5	Ti6Al4V	KPL	450
54	278.03	1	0.196	2.95	Ti6Al4V	KPL	450

Makine öğrenmesi modeli Python dili kullanılarak Google Colab üzerinde yazılmıştır. Karar Ağacı Regresyon ve Rastgele Orman Regresyon algoritmaları kullanılarak oluşturulan makine öğrenmesi modelinin performans metrikleri (R^2 , MAE, MSE, MAPE) değerlendirilmiştir.

- R-squared (R^2 , R-kare): Modelin veri setine bağlı olarak ne kadar doğru tahminler yaptığını gösteren bir ölçüttür. Yüzde olarak ifade edilir. 0 ile 1 arasında değer alır ve 1'e yakın olması modelin performansının daha iyi olduğunu ve daha iyi uyum sağladığını gösterir.
- MSE (Mean Squared Error-Ortalama Kare Hata): Tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasındaki farkların karelerinin ortalamasıdır. MSE ne kadar düşüğe tahminler gerçek değerlere o kadar yakındır. Yani model daha iyi bir performans gösterir.
- MAE (Mean Absolute Error-Ortalama Mutlak Hata): Tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasındaki farkların mutlak değerleri alınır ve bu değerlerin ortalaması hesaplanarak bulunur. Regresyon modelinde tahmin edilen değerlerin gerçek değerlerden ne kadar uzaklıkta olduğunu ölçen bir hata metriğidir. MAE değerinin düşük olması modelin daha doğru tahminler yaptığını gösterir.
- MAPE (Mean Absolute Percentage Error-Ortalama Mutlak Yüzde Hata): Tahmin edilen değerlerin gerçek değerlere oranla yüzde olarak ne kadar hata yaptığını ölçer. MAPE değerinin düşük olması modelin yüzde olarak daha az hata yaptığını gösterir.

Makine öğrenmesi modelini kurmak için ilk önce gerekli olan Pandas ve Numpy kütüphaneleri çağırıldı. Bu kütüphanelerden Pandas kütüphanesi, veri analizi ve veri manipülasyonu için kullanılmaktadır. Bu kütüphane, verileri işlemek, temizlemek, analiz etmek ve dönüştürmek için bir dizi veri yapıları ve fonksiyonlar sağlamaktadır. Pandas'ın temel veri yapıları Series ve DataFrame'dir. Numpy kütüphanesi ise, bilimsel hesaplamalar yapmak için kullanılan temel bir kütüphanedir. Numpy, çok boyutlu diziler (arrays) oluşturmak ve bu diziler üzerinde hızlı matematiksel işlemler gerçekleştirmek için kullanılmaktadır.

```
[ ] import numpy as np
import pandas as pd

[ ] df= pd.read_excel("VeriSeti.xlsx")

[ ] df=pd.get_dummies(df,columns=[ "Malzeme", "Kesici_Takım"])
[ ] df.head()
```

	Kesme_Hızı	Kesme_Deriniği	İlerleme	YPD	Sıcaklık	Malzeme_49HRC_AISI4340	Malzeme_AISI4340	Malzeme_Ti6Al4V	Kesici_Takım_KPL	Kesici_Takım_KSZ	Kesici_Takım_Kaplamalı_Karbür	Kesici_Takım_KİG
0	275.0	1	0.11	0.720	475	False	True	False	False	False	True	False
1	275.0	1	0.18	1.204	455	False	True	False	False	False	True	False
2	275.0	1	0.24	2.388	405	False	True	False	False	False	True	False
3	305.0	1	0.11	0.649	472	False	True	False	False	False	True	False
4	305.0	1	0.18	1.233	446	False	True	False	False	False	True	False

Şekil 2. Google Colab ile yazılan makine öğrenmesi modelinin 1.bölümünün ekran görüntüsü (Screenshots of the first part of the machine learning model written with Google Colab)

Şekil 2’de görüldüğü üzere Pandas kütüphanesi kullanılarak ‘VeriSeti’ isimli ve excel uzantılı veri seti çağırıldı. Daha sonra veri setinde bulunan bütün değerlerin numerik olması gerektiği için ‘Malzeme ve Kesici_Takım’ sütunları Pandas’ın ‘get_dummies’ metodu ile kategorik verilere dönüştürüldü. Veri setinin ilk 5 satırını görmek içinse ‘df.head()’ komutu kullanıldı.

```
[ ] y=df[["Sıcaklık"]]
x=df.drop(columns=["Sıcaklık"])

[ ] from sklearn.preprocessing import StandardScaler
sc_x=StandardScaler()
x=sc_x.fit_transform(x)

[ ] from sklearn.model_selection import train_test_split

[ ] x_train, x_test, y_train, y_test = train_test_split(x,y, train_size=0.85, random_state=16)
```

Şekil 3. Google Colab ile yazılan makine öğrenmesi modelinin devamının ekran görüntüsü (Screenshot of the continuation of the machine learning model written with Google Colab)

Şekil 3’te ise tahmin modelini kurmak için x’e bağımsız değişkenler, y’ye ise bağımlı değişken atandı. Burada tahmin etmek istenilen değer yani ‘Sıcaklık’ bağımlı (hedef) değişkeni, diğer veriler ise sıcaklığı tahmin etmek için kullanılacak olan bağımsız değişkenleri ifade etmektedir. Daha sonra verilerin özelliklerini standartlaştırmak için kullanılan bir ön işleme tekniği olan StandardScaler sınıfı kullanıldı. Bu metot, veri özelliklerini (değişkenleri) ortalama değeri sıfır ve standart sapması bir olacak şekilde dönüştürmektedir. Daha sonra ise bağımsız (x) ve bağımlı (y) değişkenleri, eğitim ve test olmak üzere parçalara ayrılarak teste tabi tutuldu ve daha güvenilir bir makine öğrenmesi gerçekleştirildi. Burada eğitim için %85’lik bir parça ayrıldı ve %85’lik kısmı öğrenmesi istenildi. Geriye kalan %15’lik kısım içinse teste tabi tutularak tahminlerde bulunması istenildi.

```
[ ] from sklearn.tree import DecisionTreeRegressor
tree_regression = DecisionTreeRegressor(random_state=42)
dtr = tree_regression.fit(x_train, y_train)
tahmin_tree_regression= dtr.predict(x_test)
dtr.score(x_test,y_test)
```

0.983444879106377

```
[ ] from sklearn.ensemble import RandomForestRegressor
rf= RandomForestRegressor (n_estimators=100, random_state=13)
model=rf.fit(x_train, y_train)
tahmin_random_regression = model.predict(x_test)
model.score(x_test,y_test)
```

0.982117463590517

Şekil 4. Google Colab ile yazılan makine öğrenmesi modelinin devamının ekran görüntüsü (Screenshot of the continuation of the machine learning model written with Google Colab)

Şekil 4’te ise eğitim ve test olmak üzere iki parçaya ayrılarak oluşturulan makine öğrenmesi modelinin Karar Ağacı Regresyon (Decision Tree Regression) ve Rastgele Orman Regresyonu (Random Forest Regression) performans skorları gösterilmektedir.

5. ÇALIŞMANIN BULGULARI (FINDINGS OF THE STUDY)

Makine öğrenmesi algoritmaları ile oluşturulan modelimizin yapacağı tahminlere ait performans metrikleri, her iki regresyon modeli için de doğruluk oranının yüksek olduğunu göstermektedir.

```
[ ] from sklearn.metrics import mean_squared_error, mean_absolute_error, mean_absolute_percentage_error, r2_score
```

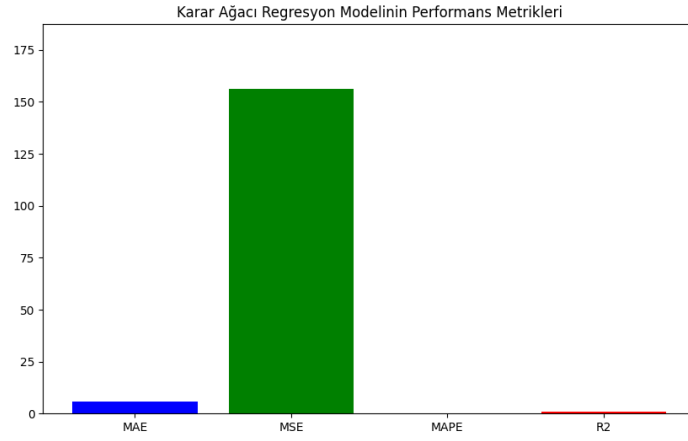
```
[ ] r2= r2_score(y_test,tahmin_tree_regression)
mse= mean_squared_error(y_test, tahmin_tree_regression)
mae= mean_absolute_error(y_test, tahmin_tree_regression)
mape= mean_absolute_percentage_error(y_test, tahmin_tree_regression)
```

```
[ ] print(f"r2_score: {r2}, MSE: {mse}, MAE: {mae}, MAPE: {mape}")
```

r2_score: 0.983444879106377, MSE: 156.11111111111111, MAE: 5.888888888888889, MAPE: 0.012733170368707466

Şekil 5. Google Colab İle yazılan makine öğrenmesi modelinin devamının ekran görüntüsü (Screenshot of the continuation of the machine learning model written with Google Colab)

Şekil 5’te Karar Ağacı Regresyon (Decision Tree Regression) modelinin performans metrikleri gösterilmektedir. Bulunan metrikler değerlendirildiğinde. Karar Ağacı Regresyon algoritması kullanılarak oluşturulan modelin R2 değerinin 0.98 bulunduğu ve 1’e yakın olduğu için çok iyi bir performansa sahip olduğu görülmektedir. MSE değerinin ise 156.1 bulunduğu ve iyileştirilebilir olduğu görülmektedir. MAE (5.8) ve MAPE (%1.27) değerlerinin ise oldukça düşük olduğu ve bulunan metrikler bir bütün olarak değerlendirildiğinde, modelin performansının başarılı olduğu görülmektedir. Karar Ağacı Regresyon modeli performans metrik grafiği Şekil 6’da gösterilmektedir.



Şekil 6. Karar ağacı regresyon modelinin performans metrikleri (Performance metrics of decision tree regression model)

```
[ ] from sklearn.metrics import mean_squared_error, mean_absolute_error, mean_absolute_percentage_error, r2_score
```

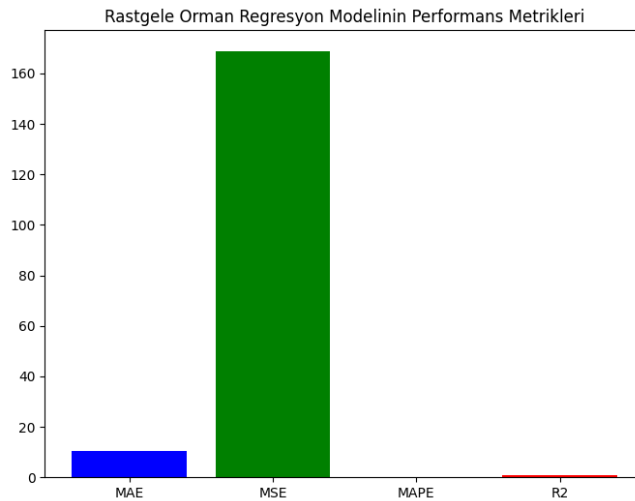
```
[ ] R2= r2_score(y_test,tahmin_random_regression)
MSE= mean_squared_error(y_test, tahmin_random_regression)
MAE= mean_absolute_error(y_test, tahmin_random_regression)
MAPE= mean_absolute_percentage_error(y_test, tahmin_random_regression)
```

```
[ ] print(f"r2_score: {R2}, MSE: {MSE}, MAE: {MAE}, MAPE: {MAPE}")
```

```
r2_score: 0.982117463590517, MSE: 168.62834444444444, MAE: 10.469999999999995, MAPE: 0.018746633508780395
```

Şekil 7. Google Colab ile yazılan makine öğrenmesi modelinin devamının ekran görüntüsü (Screenshot of the continuation of the machine learning model written with Google Colab)

Şekil 7’de ise Rastgele Orman Regresyon (Random Forest Regression) modelinin performans metrikleri gösterilmektedir. Bulunan metrikler değerlendirildiğinde, Rastgele Orman Regresyon algoritması kullanılarak oluşturulan modelin R2 değerinin 0.98 bulunduğu ve 1’e yakın olduğu için çok iyi bir performansa sahip olduğu görülmektedir. MSE değerinin ise 168.62 bulunduğu ve iyileştirilebilir olduğu görülmektedir. MAE (10.46) ve MAPE (%1.87) değerlerinin ise oldukça düşük olduğu ve bulunan metrikler bir bütün olarak değerlendirildiğinde, modelin performansının başarılı olduğu görülmektedir. Rastgele Orman Regresyon modeli performans metrik grafiği Şekil 8’de gösterilmektedir.



Şekil 8. Rastgele orman regresyon modelinin performans metrikleri (Performance metrics of random forest regression model)

İncelenen skorlar neticesinde, makine öğrenmesi modelinin her iki yöntem için de yapacağı tahminlerin doğruluk oranlarının yüksek olduğu görülmektedir. Ancak aşırı uyum (overfitting) riskinin daha az ve yapacağı tahminlerin daha güvenilir olması nedeniyle Rastgele Orman Regresyon (Random Forest Regression) algoritması tercih edilmiştir.

```
[ ] df.head()
  Kesme_Hızı Kesme_Derinliği İlerleme YPD Sıcaklık Malzeme_49HRC_AISI4340 Malzeme_AISI4340 Malzeme_Ti6Al4V Kesici_Takım_KPL Kesici_Takım_KSZ Kesici_Takım_Kaplamalı_Karbür Kesici_Takım_KİG
0 275.0 0.8 0.1 0.65 475 False True False False False True False
1 275.0 1.1 0.35 2.4 455 False True False False False True False
2 172.0 0.7 0.2 1.8 447.07 False True False False False True False
3 300.0 0.5 0.65 2.1 446.54 False True False False False True False
4 98.0 0.8 0.12 1.2 433.85 False True False False False True False

[ ] model.predict([[270,0.8,0.10,0.65,0,1,0,0,0,1,0]])
array([438.3])
```

Şekil 9. Google Colab İle yazılan makine öğrenmesi modelinin tahmin bölümünün ekran görüntüsü (Screenshot of the prediction section of the machine learning model written with Google Colab)

Şekil 9’da ise veri setimiz baz alınarak, eğitim ve test olmak üzere iki parçaya ayrılarak oluşturulan makine öğrenmesi modelinin. Rastgele Orman Regresyon (Random Forest Regression) algoritmasını kullanarak bir tahminde bulunması istenilmiştir. Kendi belirlediğimiz parametreler ile kesme hızı:270 m/dak. kesme derinliği:0.8 mm, ilerleme:0.10 mm/dev, YPD (yüzey pürüzlülük değeri):0.65 μ m, malzeme: AISI4340 ve kesici takım: kaplamalı karbür olacak şekilde bir tahmin yapmasını istediğimizde, tahmin ettiği en uygun sıcaklık değerinin 438.3 $^{\circ}$ C olduğu görülmektedir.

Tablo 4. Tahmin edilen sıcaklık değerleri (The estimated temperature values)

Kesme Hızı (m/dak)	Kesme Derinliği (mm)	İlerleme (mm/dev)	YPD (μ m)	AISI4340 49HRC	AISI4340	Ti6Al4V	Kaplamalı karbür	KPL	KSZ	KİG	Tahmin Edilen Sıcaklık ($^{\circ}$ C)
270	0.8	0.1	0.65	0	1	0	1	0	0	0	438.3
320	1.1	0.35	2.4	0	1	0	1	0	0	0	428.53
172	0.7	0.2	1.8	1	0	0	1	0	0	0	447.07
300	0.5	0.65	2.1	1	0	0	1	0	0	0	446.54
98	0.8	0.12	1.2	0	0	1	0	0	0	1	433.85
105	0.9	0.2	1.82	0	0	1	0	0	1	0	447.16
180	1	0.22	2.5	0	0	1	0	1	0	0	444.35
253	0.95	0.087	1.92	0	1	0	0	0	0	1	452.43
315	1.2	0.2	3	0	1	0	0	0	1	0	447.83
166	1.3	0.18	0.75	0	1	0	0	1	0	0	587.75

Tablo 4’te örnek olarak, kendi oluşturduğumuz ara değerlere göre makine öğrenmesi modelimizin tahmin ettiği en uygun sıcaklık değerleri gösterilmektedir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER (CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS)

Çalışmanın sonucunda, belirli malzemeler için kesme hızı, yüzey pürüzlülük değeri, ilerleme hızı, kesme derinliği, malzeme ve kesici takım parametreleri girilerek en uygun işleme sıcaklığını tahmin etmek için Karar Ağacı Regresyon (Decision Tree Regression) ve Rastgele Orman Regresyon (Random Forest Regression) algoritmaları kullanılarak makine öğrenmesi modeli oluşturulmuştur. İncelenen skorlar neticesinde, oluşturulan modellerin R^2 değerinin 0.98 bulunduğu ve 1’e yakın olduğu için çok iyi bir performansa sahip olduğu görülmektedir. Ortalama Mutlak Yüzde Hata (MAPE) değeri. Karar Ağacı Regresyon için %1.27 ve Rastgele Orman Regresyon için

%1.87 olarak bulunmuştur. Makine öğrenmesi modelinin, her iki yöntem için de yapacağı tahminlerin doğruluk oranlarının yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ancak aşırı uyum (overfitting) riskinin daha az ve yapacağı tahminlerin daha güvenilir olması nedeniyle Rastgele Orman Regresyon algoritması tercih edilmiştir.

Özellikle her alanda otomasyona geçilen günümüzde bu bilgilerin tahmin edilmesine her geçen gün daha fazla ihtiyaç duyulmaktadır. Tahmin edilen uygun sıcaklığın kullanılması sayesinde kesme kuvvetinin, takım aşınmasının, iş parçasının aşınmasının/kırılmasının ve yüzey pürüzlülüğünün azaltılması sağlanarak maliyetten ve zamandan tasarruf edilmiş olacaktır.

Veri setindeki değerler baz alınmak suretiyle, istenilen parametre değerleri girilerek sıcaklık tahmininde bulunulacağı için, ara değerler için de yapılmak istenen deney için ön hazırlık ile belirlenmiş parametreler için de deneme yanılma yöntemine gerek kalmadan tahmin edilen sıcaklığa göre işlem yapılabilecektir.

Bu çalışmada en uygun işleme sıcaklığını tespit etmek için, en düşük yüzey pürüzlülük değerleri kullanılmıştır. Aynı şekilde en düşük kesme kuvveti ve en az takım aşınması değerlerini içeren deney parametreleri kullanılarak oluşturulan yeni veri setleri ile de en uygun işleme sıcaklıkları tahmin edilebilir.

Makine öğrenmesi modelinin performansı, veri setindeki deney parametre değerlerinin artırılması ile daha iyi olacaktır. Bu sayede daha fazla tahminde bulunabilir. Ayrıca farklı malzemeler için yapılacak çalışmalar yapay zeka uygulamaları için veri tabanı oluşturulmasına yardımcı olacaktır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. R. Binali, S. Yıldız, S. Neşeli, S960QL yapı çeliğinin işlenebilirliğinin sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi, *European Journal of Science and Technology*, 31:85-91,2021.
2. R. Binali, S. Yıldız, S. Neşeli, Investigation of power consumption in the machining of S960QL steel by finite elements method. *European Journal of Technique*, 12, 2022.
3. İ. Asiltürk, M. Kuntoğlu, R. Binali, H. Akkuş, E. Salur, A comprehensive analysis of surface roughness, vibration, and acoustic emissions based on machine learning during hard turning of AISI 4140 steel. *Metals*. 13(2); 437, 2023.
4. M.K. Gupta, M.E. Korkmaz, M. Sarıkaya, G.M. Krolczyk, M. Günay, In-process detection of cutting forces and cutting temperature signals in cryogenic assisted turning of titanium alloys: An analytical approach and experimental study, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 169: 108772, 2022.
5. Y. Kavak, İşlenmesi zor malzemenin tornalanmasının yüzey pürüzlülüğüne etkisinin istatistiksel yöntem ile incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce, Türkiye, 2019.
6. C.R. Dandekar, Y.C. Shin, J. Barnes, Machinability improvement of titanium alloy (Ti-6Al-4V) via LAM and hybrid machining, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 50(2): 174-182, 2010.
7. Y. Ayed, G. Germain, W. Ben Salem, H. Hamdi, Experimental and numerical study of laser-assisted machining of Ti6Al4V titanium alloy, *Finite Elements in Analysis and Design*, 92: 72-79, 2014.
8. N. Tosun, L. Özler, A study of tool life in hot machining using artificial neural Networks and regression analysis method, *Journal of Materials Processing Technology*, 124(1-2): 99-104,2002.
9. K.P. Maity, P.K. Swain, An experimental investigation of hot-machining to predict tool life, *Journal of Materials Processing Technology*, 198(1-3):344-349, 2008.
10. P.A. Rebro, Y.C. Shin, F.P. Incropera, Design of operating conditions for crack free laser-assisted machining of mullite, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(7-8): 677-694, 2004.
11. J. Peng, E. C. Jury, P. Dönnies, C. Ciurtin. Machine learning techniques for personalised medicine approaches in immune-mediated chronic inflammatory diseases: Applications and challenges, *Frontiers in Pharmacology*, 12, 2021.
12. A. Gündüz, Tornalama işleminde oluşan kesme kuvvetlerinin bulanık mantık ve yapay sinir ağlarıyla tahmini, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2006.

13. A. Uğraş, İşlenmesi zor malzemelerin yüksek talaş kaldırma oranlarıyla işlenmesi için ısı destekli hibrid sistemin geliştirilmesi ve çalışma parametrelerinin belirlenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2022.