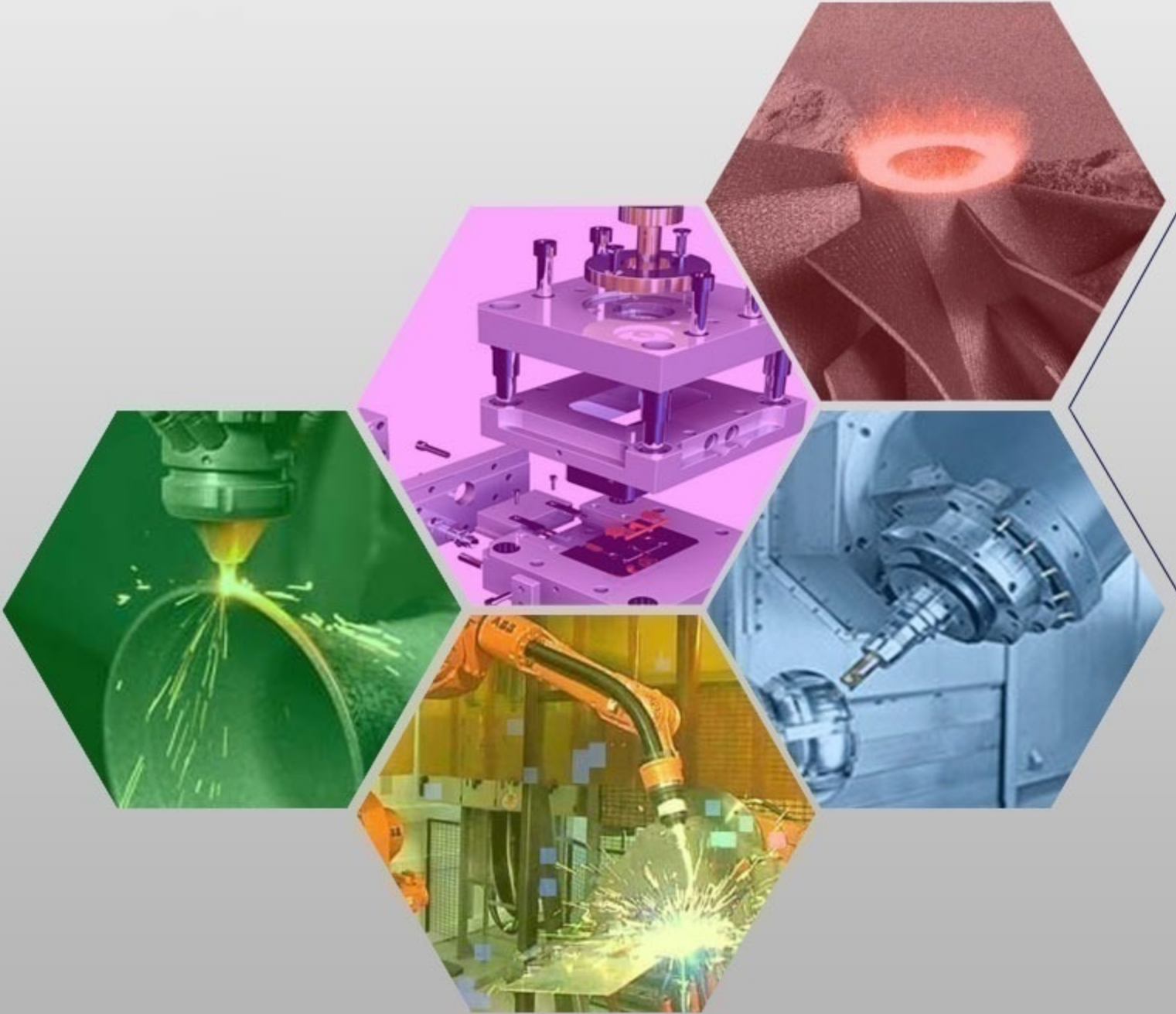




İMİLAT TEKNOLOJİLERİ VE UYGULAMALARI

CİLT:4 SAYI:2 YIL: 2023

e-ISSN: 2717-7475



MANUFACTURING TECHNOLOGIES AND APPLICATIONS

VOLUME:4 ISSUE:2 YEAR:2023



Cilt (Volume) : 4
Sayı (Issue) : 2
Yıl (Year) : 2023
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 Editor (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
Dr. Munish Kumar Gupta, Opole University of Technology
Dr. Öğr. Üyesi Serkan Apay, Düzce Üniversitesi

Dil Editörü (Language Editor)

Doç. Dr. Mehmet Erdi Korkmaz, Karabük Üniversitesi

Teknik Editörler (Technical Editors)

Doç. Dr. Ramazan Çakıroğlu, Gazi Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Ramazan Özmen, 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. Oğuzhan Yılmaz, 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
Dr. Mozammel Mia, Imperial College London
Dr. Catalin Pruncu, University of Strathclyde
Dr. Ferhat Yıldırım, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi
Dr. Selçuk Yağmur, Gazi Üniversitesi



Cilt (Volume) : 4
Sayı (Issue) : 2
Yıl (Year) : 2023
e-ISSN: 2717-7475

Yayıncı (Publisher)
Mustafa GÜNAY

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

Yayın Tarihi (Publication Date)
Ağustos 2023 (August 2023)

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

Instructions for authors and all articles in this journal can be reached at
<https://dergipark.org.tr/en/pub/mateca>

İÇİNDEKİLER (CONTENTS)

Araştırma Makalesi (Research Article)

Sayfa (Page)

- Kalın S235JR Malzemelerinin Mekanik Özelliklerine Kök Boşluklu ve Boşluksuz Kaynağın Etkisi**
(*Effect of Welding With and Without Root Gaps on The Mechanical Properties of Thick S235JR Materials*)
Gizem USLU, Aykut İNANOĞLU 59-71
- Analysis and Optimization of Process Parameters Affecting on the Tensile Strength of PLA and Iron-Reinforced PLA Samples Fabricated by Fused Deposition Modeling Method** (*Eriyik Yığıma Modelleme Yöntemi ile Üretilen PLA ve Demir Takviyeli PLA Numunelerinin Çekme Dayanımını Etkileyen Proses Parametrelerinin Analizi ve Optimizasyonu*)
Yasin KURUOĞLU, Mahir AKGÜN, Halil DEMİR 72-80
- Eİ İçin Tasarlanan Kafes Yapıların Yapısal Davranışlarının İncelenmesi**
(*Investigation of The Structural Behaviors of Lattices Designed for AM*)
Aysu AKBULUT, Neslihan TOP, Harun GÖKÇE 92-100
- Ergonomic Analysis of Operator Consoles on Air Support Aircraft**
(*Hava Destek Uçağındaki Operatör Konsollarının Ergonomik Analizi*)
İbrahim Mert KILIÇ, Cengiz ELDEM, Neslihan TOP, Oğulcan EREN, İsmail ŞAHİN 101-110
- Numerical Analysis of Metals under the Influence of Electromagnetic Field at Different Current Values**
(*Farklı Akım Değerlerinde Elektromanyetik Alan Etkisi Altındaki Metallerin Sayısal Analizi*)
Kadir GÜNDOĞAN, Veli ÇELİK 111-119
- ### **Derleme Makale (Review Article)**
- Ultrasonik Atomizasyon: Toz Üretiminde Alternatif Bir Yol**
(*Ultrasonic Atomization: An Alternative Path to Powder Production*)
Yağız AKYILDIZ, Serdar SARI, Onur Furkan KAYA, Rıdvan YAMANOĞLU 81-91

Kalın S235JR Malzemelerinin Mekanik Özelliklerine Kök Boşluklu ve Boşluksuz Kaynağın Etkisi

Gizem Uslu¹ , Aykut İnanoğlu^{2,*} 

¹Düzce Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Düzce, Türkiye

²Dekorol Alüminyum San. Tic. A.Ş. Düzce, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 07.04.2023

Kabul: 27.06.2023

Anahtar Kelimeler:

Kök boşluk

S235JR

Metalografi

MIG-MAG Kaynağı

ÖZET

Bu çalışmada, S235JR çeliğinin kök boşluklu ve kök boşluksuz kaynak uygulama yönteminin kaynak kalitesine ve malzemenin mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Kaynaklı numunelere çekme testi, çentik darbe testi, sertlik ölçüm testi ve mikro yapı analizleri uygulanmıştır. Test sonuçları verilerine göre, hangi yöntemin malzeme mekanik özelliklerini iyileştirebildiği gözlemlenmiştir. Alınan sonuçlara göre, kök boşluğu bırakılarak kaynak işlemi yapılan numunelerin mikro yapı incelemelerine bakıldığında kaynak nüfuziyetinin tam sağlandığı görülmüş olup kök boşluğu bırakılmadan kaynatılan numunelerde ise kaynağın nüfuz etmediği alanlar tespit edilmiştir. Bu durum, çekme testi deneyinde, çentik darbe testinde ve sertlik ölçüm testlerinde de kök boşluklu numunelerin çekme dayanımının, absorbe edebildiği enerjinin ve sertliğinin artış göstermesini sağlarken, kök boşluklu olmayan numunelerde ise bu değerlerin daha düşük çıkmasına neden olmuştur. En iyi çekme testi sonucu 419 MPa, en iyi çentik darbe sonucu ise 159 J olarak kök boşluklu kaynak uygulamalarında alınan sayısal değerlerin sonuçlarıdır.

Effect of Welding With and Without Root Gaps on The Mechanical Properties of Thick S235JR Materials

ARTICLE INFO

Received: 07.04.2023

Accepted: 27.06.2023

Keywords:

Root gap

S235JR

Metallography

MIG-MAG welding

ABSTRACT

This study investigated the effect of the root gap and root gap welding application method of S235JR steel on the material's weld quality and mechanical properties. Tensile test, notch impact test, hardness test and microstructure analysis were applied to welded samples. According to the test results data, it has been observed which method can improve the mechanical properties of the material. According to the results obtained, when the microstructure examinations of the samples that were welded by leaving a root gap were examined, it was seen that the weld penetration was fully achieved. The areas where the weld did not penetrate were determined in the samples welded without leaving a root gap. This situation increased the tensile strength, absorbable energy and hardness of the hollow root samples in the tensile test, notch impact test and hardness measurement tests. At the same time, these values were lower in the samples without root voids. The best tensile test result is 419 MPa, and the best notch impact result is 159 J, the results of numerical values taken in root gap welding applications.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Gelişmekte olan ülkelerde, nüfus artışı ile beraber kentleşme oranı da her geçen gün artış göstermektedir. Kentleşme oranının artış gösterme nedenlerinden birisi de sanayileşme ile birlikte köyden kente olan göçlerin artmasıdır. Büyük şehirlerin göç alması ile birlikte artan nüfusun gereksinimlerini karşılamak amacı ile üretim modellerinde dikey mimariye doğru bir değişim yaşanmıştır. Gelen kalabalık, beraberinde çevresel kaygıları da getirdiği için yapılarda yüksek katlı

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

To cite this article: G. Uslu, A. İnanoğlu, Kalın S235JR Malzemelerinin Mekanik Özelliklerine Kök Boşluklu ve Boşluksuz Kaynağın Etkisi, Manufacturing Technologies and Applications, 4(2),59-71, 2023.

<https://doi.org/10.52795/mateca.1278868>, This paper is licensed under a CC BY-NC 4.0

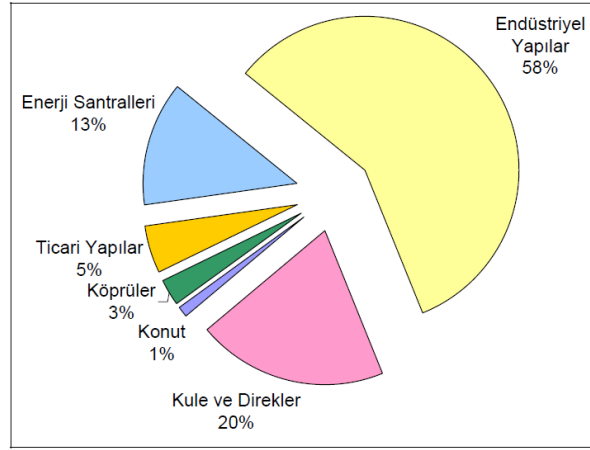
tasarımların zorunlu bir ihtiyaç olduğu ortaya çıkmıştır. Son dönemlerde ivmelenen çelik yapı sektöründeki hızlı büyüme ve artan rekabet, alternatif imalat uygulamalarının geliştirilmesine zemin hazırlamıştır. Artan müşteri taleplerini karşılayabilmek adına; geliştirilen farklı imalat yöntemleri, bazı yöntemlerin diğerlerine kıyasla öne çıkmasını sağlamıştır [1].

Çelik yapı sektörü, bir ülkenin yaşam koşullarının yükselmesinde ve ekonomik açıdan ilerlemesinde büyük bir pay sahibidir. Konu bu açıdan ele alınır, yapının oluşturulmasında görev alan herkesin dünyada çelik yapı sektörünün nasıl ve nereye doğru evrildiğinden, son gelişmelerden haberdar olması gerektiği kaçınılmaz bir gerçektir. Son zamanlarda çelik yapı sektöründe öne çıkan gelişmeler, özellikle yaşanan sarsıcı depremler dolayısı ile yapılarda dayanıklılık ve imalat kalitesi üzerinde yoğunlaşmış durumdadır [2].

Türkiye, jeolojik ve topografik yapısı nedeniyle sık sık yıkıcı ve sarsıcı depremlere maruz kalmaktadır. Ülkemiz topraklarının %92'si deprem bölgelerinde yer almaktadır ve insanlarımızın %95'i bu bölgelerde yaşamaktadır. 1903'ten 1999'a kadar 100.000'den fazla insanın hayatını kaybetmesi ve 420.000 evin 58 büyük depremle çökmesine neden olan depremler, Türkiye'nin tehdit altında olduğu deprem felaketinin boyutlarını açıkça gözler önüne sermektedir. Bu nedenle, günümüzde depreme dayanıklı yapıların tasarımı ve özellikle yeni yapılacak yapıların tasarım ve imalat süreçlerindeki dikkat edilmesi gereken önemli kriterler, yapıların dayanımının ve ömrünün en önemli belirleyicileri olmaktadır. Çelik yapılar, ülkemizde konutlarda da kullanılmakla birlikte özellikle endüstriyel yapılar için de tercih edilmektedir. Bunlar arasında, geniş açıklıklı köprüler, spor salonları, sergi ve konferans salonları örnek olarak verilebilmektedir. Günümüzde özellikle son on yılda artış gösteren deprem olaylarının yaşanmasına paralel olarak, yapılarda çelik kullanımının giderek artış gösterdiği gözlenmektedir [3]. Çelik, mimari yapılarda gösterdiği üstün mekanik özellikleri sayesinde günümüzde dünyada birçok ülke tarafından yaygın olarak tercih edilmektedir [2].

Çelik, demir elementi ile genellikle %0,02 ila %2,1 oranlarında değişen karbon miktarının bileşiminden meydana gelen bir alaşımdır. Çelik alaşımındaki karbon miktarları çeliğin sınıflandırılmasında önemli rol oynamaktadır. Dünyanın altyapısını ve endüstrilerini inşa etmek için açık ara en yaygın kullanılan malzeme olan çelikler, dikiş iğnelerinden petrol tankerlerine ve devasa gökdelenlere kadar her şeyi imal etmek için kullanılmaktadır. Ayrıca bu tür eşyaları ve yapıları imal etmek için gerekli aletler de yine çelikten yapılmaktadır. Çeliğin ana metali demirdir. Sıcaklığa bağlı olarak, iki kübik kristal yapı (allotropik form) alabilir: hacim merkezli kübik ve yüzey merkezli kübik. Demirin allotroplarının, başta karbon olmak üzere alaşım elementleriyle etkileşimi, çeliğe ve dökme demire benzersiz özellikler katmaktadır. Demire kıyasla mukamevet açısından ve işlenebilirlik özelliklerinden ötürü oldukça üstün özellikler barındıran çelik, aynı zamanda demirden daha hafiftir. Çeliğe göre daha kırılğan bir özellik taşıyan demirin aksine çelik, ağırlık ve baskı karşısında daha dirençli bir özellik sergilemektedir. Çelik malzemenin bu gibi avantajlar taşıyor olması, ona köprü inşası, yüksek katlı binalarda kullanımı, büyük projelerde ana yapı elemanı olarak kullanılması ve demiryolu rayları gibi ağırlık taşıyan araçlar için oldukça yaygın bir kullanım alanı kazandırmıştır [4-6].

Türkiye'de üretilen çelik yapıların yaklaşık olarak %60'ı endüstriyel yapılar olarak göze çarpmaktadır. Bu orana, kuleler ve enerji altyapı yatırımları da eklendiğinde bu oran %90'lara çıkmaktadır. Şekil 1'de görüldüğü üzere, ticari yapılar ve köprüler ise kalan payın %10'unu oluşturmaktadır [7].



Şekil 1. Türkiye’de çelik yapıların dağılımı (Distribution of steel structures in Türkiye) [7]

Yapılarda çelik kullanımı, mimari özgünlük, estetik, hafiflik, çok katlı bina yapımına uygunluk, depreme dayanıklılık, prefabrikasyon, kolay denetim, hızlı yapı üretimi, nakliye kolaylığı, %100 geri dönüştürülebilirlik, güçlendirme etkisi gibi kolaylıkları da beraberinde getirmektedir. Bu avantajların varlığı bağlamında “neden çelik yapı?” diye sorulduğunda şöyle bir sonuca ulaşılmaktadır: Yapı çeliğinin kırılğan değil sünek bir yapıda olması, kalıp ve iskele kullanma zorunluluğu olmadığı için daha küçük temel ve kazı yapılabilmesi, yeniden kullanılabilirliğe uygun olması ve en kötü zeminleri bile değerlendirebilmek için daha geniş kullanım alanları oluşturabilmesidir. Ayrıca kolon sayısını azaltabilmek için, ucuz değil ekonomik olabildiği için, yapım esnasında kolay denetlenebildiği için, işletme giderlerini asgari seviyeye indirebildiği için, çevreyi kirletmemek için, ormanların sürekliliğini sağlamak için ve depremlere dayanabildiği için, yapı çeliği sıkça tercih edilmektedir [8].

Yapılara ve sektörlere sağlamış olduğu avantajlar sayesinde çelik, dünya üzerinde birçok ülkede yaygın olarak üretilmekte ve kullanılmaktadır. Dünyada çeliğin üretim ve kullanım oranlarına bakıldığında, Dünya çelik üretiminin yaklaşık olarak yarısını Çin’in gerçekleştirdiği görülmektedir. Son yıllarda yükselen bir ekonomiye sahip olan Çin ekonomisi, diğer birçok sektörde olduğu gibi, çelik sektöründe de üstün ve belirleyici bir konum elde etmiştir. Çelik üretimi, çelik kullanımı, çelik ihracatı ve ithalatında ilk sırada olan Çin’in ardından Japonya, Güney Kore gibi Uzakdoğu ülkeleri gelmektedir. Türkiye, çelik üretimi konusunda İtalya, Fransa ve Belçika gibi ülkeler ile aynı kategoride bulunurken, Brezilya ve İspanya gibi ülkeler ise katma değeri yüksek çelik ürün imalatı yapan diğer ülkelerdir [9].

Çelik malzemeler, ihtiyaca ve şartlara göre, kesilerek, bükülerek, kaynatılarak kullanılabilir. Yapılara kattığı değer sayesinde her sektörde kendine kullanım alanı bulan çeliğin birleştirilmesi, bir diğer ifade ile çelik malzemelerin kaynatılması, doğru yöntem ve uygulamalar ile gerçekleştirildiği takdirde çeliğin bütün özelliklerinden fayda sağlamak mümkün olabilecektir. Çünkü uygulanan kaynak yöntemindeki en küçük bir hata, birleştirilen çeliklerin birbirinden kopmasına, yapılarda meydana gelebilecek hasarlara, yapıların çökmesine ve hatta insanların yaralanmasına ya da ölümüne bile sebebiyet verebilecek türden büyük çaplı sorunlara yol açabilecektir. Dolayısıyla, çelik malzemelerin kullanılacak olduğu alana, ortama ve taşıyacak olduğu yüke göre en uygun ve kaliteli kaynak yönteminin seçilmesi hayati bir önem taşımaktadır. Bu nedenle, çelik malzemelerin kaynak yöntemleri ve mekanik dayanımları ile ilgili yapılan çalışmaların, yol gösterici olması açısından önemi büyüktür [10 - 14].

Bu çalışmada, Dünya genelinde özellikle yapı sektöründe oldukça yaygın bir kullanım alanı bulunan S235JR kalitesindeki çelik malzemelerin kaynak yapım aşamalarında, AWS-D1.1-D1.1M-2020 [15] standardında belirtildiği gibi kaynak kök boşluğu bırakmanın ne gibi sonuçlar ortaya çıkarabileceği detaylı bir şekilde analiz edilerek, kaynak üzerindeki mekanik özelliklerinin ve mikro yapı analizlerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Alın kaynağı için; 450x37x8mm ölçülerinde, köşe kaynağı için ise 450x37x8x10mm ölçülerindeki numuneler, 450x400mm ölçülerinde kaynatılan 4 adet plakadan telerozyon yöntemi ile kesilerek çıkarılmıştır. Bu çalışma, 2 opsiyon olarak gerçekleştirilmiştir. Birinci opsiyonda numuneler arasında boşluk bırakılmadan kaynak işlemi gerçekleştirilirken ikinci opsiyonda ise kaynatılan numuneler arasında 4mm kök boşluğu bırakılarak kaynak uygulaması yapılmıştır. Kaynak işlemi öncesi numune yüzeyleri kir, yağ, toz ve çapak gibi istenmeyen maddelerden arındırılmıştır. Kaynak işlemlerinde 1mm çapında Magmaweld marka SG2 (TS EN ISO 14341-A) kaynak teli seçilmiştir.

Yapılan deneysel çalışmada kullanılan S235JR çeliğinin kimyasal kompozisyonu Tablo 1’de, mekanik özellikleri Tablo 2’de, malzeme standardı Tablo 3’de, gösterilmiştir.

Tablo 1. S235JR çeliğinin kimyasal kompozisyonu (Chemical composition of S235JR steel) [16]

Malzeme No	C	Mn	P	S	N	Fe
1.0254	0.17	1.4	0.035	0.04	0.0012	Kalan

Tablo 2. S235JR çeliğinin mekanik özellikleri (Mechanical properties of S235JR steel) [16]

Malzeme No	Çekme Dayanımı (Mpa)	Akma Dayanımı (Mpa)	Uzama %
1.0254	350.0-480.0	235.0	25.0

Tablo 3. S235JR çeliğinin malzeme standardı (Material standard of S235JR steel) [16]

DIN	AISI/SAE/St	EN
17100	St 37	S235JR

Çalışmada kullanılan gaz altı kaynak telinin kimyasal kompozisyonu Tablo 4’de verilmiştir. Kaynak esnasında kullanılan deneysel kaynak parametreleri ise Tablo 5’de verilmiştir.

Tablo 4. Gazaltı kaynak telinin kimyasal kompozisyonu (Chemical composition of arc welding wire) [17]

Malzeme	C	Si	Mn	Fe
SG2 Kaynak Teli	0.08	0.85	1.45	Kalan

Tablo 5. Kaynak parametreleri (The welding parameters)

Tel ilerleme hızı (cm/dk)	Kaynak gerilimi (V)	Kaynak hızı (mm/dk)	Koruyucu gaz	Gaz debisi (lt/dk)	Tel Çapı (mm)	Akım türü
800	22.7	450	CO ₂	14	1.2	DC

Bu çalışmada S235JR çeliğinin alın ve köşe kaynak uygulaması sonrası kök boşluğunun gereksiniminin önemini açıklayabilmek için çekme testi ve mikro yapı analizleri gerçekleştirilmiştir. Her opsiyon için 3 farklı numune üzerinde detaylı bir veri elde edebilmek adına mikro yapı incelemesi, sertlik ölçümü, çekme deneyi ve çentik darbe uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Köşe kaynağı için, kök boşluklu ve kök boşluksuz olarak 2 opsiyon, alın kaynağı için de aynı şekilde kök boşluklu ve kök boşluksuz olmak üzere 2 opsiyonlu kaynak işlemi uygulanmıştır. Deney için hazırlanan bütün numunelerde kök boşluğu değişkeni dışındaki bütün etkenler (kaynak voltaj değeri, kaynak hızı, kaynak amper değeri vb.) sabit tutularak kaynak işlemi yapılmıştır. Test numuneleri, kaynak sonrası oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Soğuma

gerçekleştikten sonra mikro yapı analizi, sertlik ölçümü, çekme testi ve çentik darbe uygulamalarına başlanmıştır.

Çalışmada, kaynaklı birleştirme işlemi için Gaz altı kaynağı (MIG-Metal Inert Gas, GMAW-Gas Metal Arc Welding) yöntemi tercih edilmiştir. Gaz altı kaynağı, iki ayrı metalin, gaz ortamında kaynak işlemi ile birleştirildiği bir kaynak yöntemidir. Bu yöntemde, genellikle argon gazı kullanılarak kaynak işlemi gerçekleştirilmektedir. Gaz altı kaynak, elektrik arkı kullanarak metal parçaları birleştirmek için kullanılan ve sıkça tercih edilen bir kaynak yöntemidir. Bu yöntemde, elektrik arkı, bir metal elektrot ve kaynak malzemesi arasında oluşurken, koruyucu bir gaz kaynak havuzunu çevreleyerek havadan oksijen ve diğer toz, polen, parikül gibi kirleticilerin kaynağa zarar vermesini önler. Gaz altı kaynak, oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir ve özellikle alüminyum ve paslanmaz çelik gibi metallerin birleştirilmesinde sıklıkla tercih edilmektedir. Gazaltı kaynak yöntemi; yüksek kalite, az deformasyon, estetik görünüm, atmosfer koruması, az spatter (sıçranti-sıçrama) gibi avantajları bulunduğu için dolayısıyla genellikle inşaat, otomotiv, havacılık, gemi yapımı, basınçlı kaplar ve hassas endüstriyel uygulamalar gibi alanlarda tercih sebebi olmaktadır. Gaz altı kaynağı, gazla çalışan bir kaynak makinesidir ve genellikle oksijen ve aketilen gazlarının yanmasıyla yüksek sıcaklıkta metal birleştirmek için kullanılmaktadır. Gaz altı kaynağının uygulama prosesi kısaca şu şekilde gerçekleştirilir: Oksijen ve aketilen gazının sağlanması, gaz kaynağı için kaynak makinesi seçimi (yapılan işe göre seçilmelidir), güvenlik önlemlerinin alınması (iyi havalandırma ve yangın risklerine karşı alınacak önlemler gibi), gazların bağlanması ve son kontroller, kaynak işlemine başlanması [12-21].

Gaz altı kaynak işleminde, voltaj değerleri ve kaynak hızı; kaynak işleminin doğruluğu, erime hızı ve malzeme birleştirme kalitesi açısından önemlidir. Bu değerler, kullanılan gaz türüne, kaynak malzemesine ve kaynak uygulamasının gerektirdiği spesifikasyonlara bağlı olarak değişebilir. Voltaj değerleri, kaynak arkının istenen performansı sağlaması için uygun bir seviyede olmalıdır. Genellikle gaz altı kaynakta, DC (doğru akım) veya AC (alternatif akım) kullanılabilir. DC kaynak, daha yüksek bir derinlik kontrolü sağlarken, AC kaynak daha iyi temizleme etkisi ortaya çıkartır. Genellikle, kaynak yapılacak malzemenin kalınlığı ve kaynak uygulamasının gereksinimleri göz önünde bulundurularak voltaj değeri ayarlanır. Kaynak hızı ise, erime hızını ve malzeme birleştirme kalitesini etkiler. Hızlı bir kaynak işlemi, daha az ısı girişi ve daha küçük bir etkilenen bölge anlamına gelir, ancak malzeme penetrasyonunu ve kaynak dikişi kalitesini etkileyebilir. Yavaş bir kaynak hızı ise daha fazla ısı girişi ve daha büyük bir etkilenen bölgeye neden olabilir, bu da malzeme deformasyonu ve termal gerilmelere neden olabilir. Kaynak hızı, malzeme kalınlığına, kaynak uygulamasının gerektirdiği penetrasyon derinliğine ve diğer parametrelere bağlı olarak dikkatlice ayarlanmalıdır. Her kaynak işlemi için spesifik voltaj ve kaynak hızı değerleri kullanılır. Bu nedenle, belirli bir uygulama için doğru voltaj ve kaynak hızını belirlemek için, kaynak operatörü tarafından uygulama gereksinimleri, kaynak malzemesi ve kaynak makinesinin üretici talimatları göz önüne alınmalıdır. Ayrıca, kaynak işlemi sırasında kaynak kalitesini izlemek ve gerekirse anlık müdahaleler ve ayarlamalar yapmak da önemlidir [10-20].

2.1. Deney Düzenegi

Bu makaledeki deneysel çalışmalar Dekoral Alüminyum A.Ş. bünyesinde gerçekleştirilmiştir. Test için hazırlanan numuneler üzerinde ilk olarak mikro dağlama yöntemi kullanılarak mikro yapı analizleri gerçekleştirilmiştir. Mikro yapı incelemesi; TS EN ISO 17639 standardına göre 20 °C de ve %51 nem oranına sahip bir ortamda yapılmıştır. Analiz için Nikon Ters Metal Mikroskobu test cihazı olarak seçilmiştir.

Sertlik ölçümü uygulaması, TS EN ISO 9015-1 standardına göre yapılmıştır. Ölçüm, 25.01.2023 tarihinde, 20°C sıcaklıkta ve 51 % nemli bir ortamda gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümü, mikro vickers sertlik ölçümü ile yapılmıştır.

Çekme testi uygulaması; 25.01.2023 tarihinde, ASTM A 143/ DIN EN ISO 6892-1 standartlarına göre 20 °C de ve %51 nem oranına sahip bir ortamda yapılmıştır. Test cihazı olarak Zwick marka, 25000 KN kapasiteye sahip bir cihaz kullanılmıştır.

Çentik darbe testi, TS EN ISO 148-1 standardına göre gerçekleştirilmiştir. 25.01.2023 tarihinde gerçekleştirilen testi sırasında ortam sıcaklığı 20°C, nem miktarı ise, %51 olarak kayıt altına alınmıştır. Gerçekleştirilen bütün test uygulamalarında ortam sıcaklığının ve nem oranının sabit olmasına özen gösterilmiştir.



Şekil 2. Test için hazırlanan numune görselleri (Sample images prepared for testing)

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

Kök boşluklu-kök boşluksuz olarak 2 farklı opsiyon ve köşe kaynağı-alın kaynağı olarak 2 çeşit kaynak şeklinde hazırlanan numunelerin mikro yapı analiz ölçümleri, sertlik ölçümleri, çekme testi ve çentik darbe testi deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Tablo 6. Opsiyonların özellikleri (features of options)

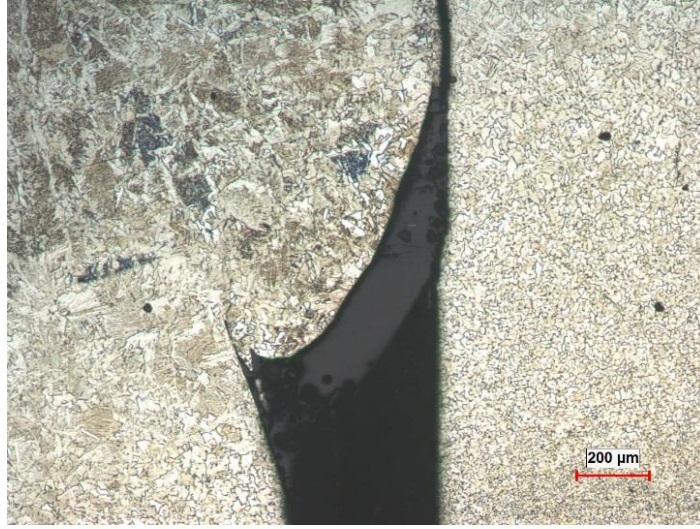
Opsiyon Kodu	Opsiyon Yöntemi
Opsiyon A	Kök Boşluksuz Köşe Kaynağı ve Alın Kaynağı Uygulaması
Opsiyon B	4mm Kök Boşluklu Köşe Kaynağı ve Alın Kaynağı Uygulaması

Mikro yapı analizi malzemenin kaynak dağılımlarının, geometrik yapılanmasının ve hacim içerisinde nasıl yayındığının mikroskop altında incelenmesidir [18]. Şekil 3'te ana malzemenin mikro görüntüsü verilmiştir. Tüm kaynak işlemlerinde hem ısı girdisi hem de tüm parametreler kontrol altında tutulmuştur. Buna bağlı olarak, tüm kaynakların tam nüfuziyetle tamamlanması esastır. Herhangi bir gözeneklilik, gaz boşluğu, erimemiş bölge, cüruf kalıntıları (hacimsel hata) ve tüm kaynaklı malzemeleri araştırmak için mikro incelemesine tabi tutulmuştur [19].



Şekil 3. Ana malzeme (Main material)

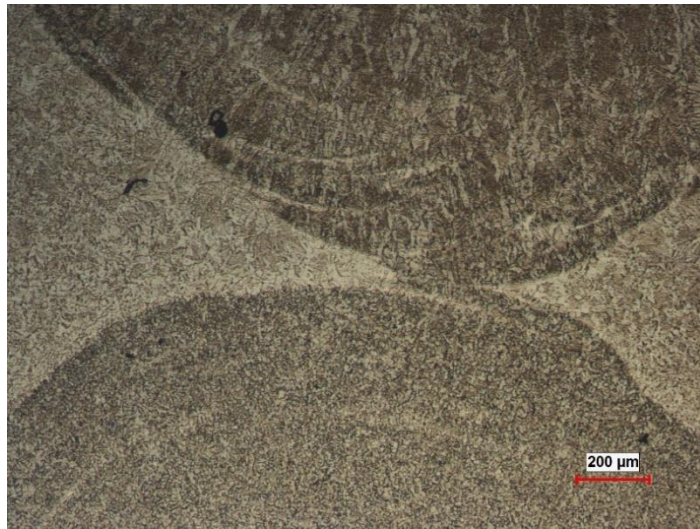
Şekil 4'te Opsiyon A'nın mikro yapı görüntüsü verimiştir. Opsiyon A'ya kök boşluksuz bir şekilde kaynak işlemleri uygulanmıştır.



Şekil 4. Kök boşluksuz kaynaklı numunenin mikro yapı görüntüsü (Microstructure image of the sample welded without root space)

Şekil 4'te görüldüğü gibi kök boşluk bırakılmadan kaynaklı numunenin malzemeleri arasında nüfuziyet eksikliği görüldüğü saptanmıştır. İnce taneli yapıdan iri taneli yapıya geçişin düzenli sağlanmadığı gözlemlenmiştir.

Opsiyon B'de ise kaynak işlemleri uygulanırken malzemeler arası kök boşluk bırakılarak kaynak işlemleri uygulanmıştır. Mikro yapı görüntüsü Şekil 5'te verilmiştir.

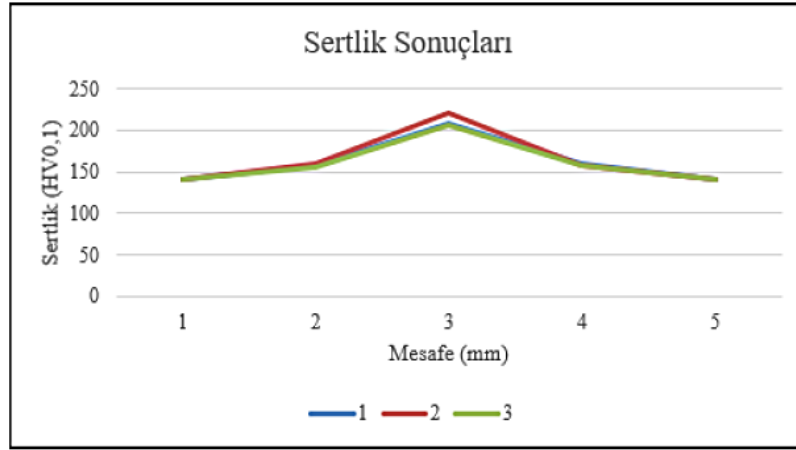


Şekil 5. Kök boşluklu kaynaklı numunenin mikro yapı görüntüsü (Microstructure image of welded sample with root cavities)

Şekil 5'te görüldüğü gibi kök boşluk bırakılarak kaynaklı numunede malzemeler arasında tam nüfuziyet sağlanmıştır. İTAB bölgesinde geçiş eksikliği yoktur. Uygulanan kaynak işlemleri sonucunda numunenin mikro yapısında ve ısıdan etkilenen bölgelere doğru (ITAB) taneler arası geçiş sağlanmıştır [20].

Mikro analizler gerçekleştirildikten sonra numunelere TS EN ISO 9015-1 standardında bir sertlik ölçümü yapılmıştır. Kök boşluklu ve kök boşluksuz olarak kaynağı yapılmış malzemelerin mikro

sertlik test grafiği Şekil 6 'da, sertlik ölçüm sonuçları ve kaynak bölgeleri ise Tablo 7'de gösterilmiştir.



Şekil 6. Sertlik ölçüm grafiği (hardness measurement chart)

Tablo 7. Sertlik ölçüm sonuçları ve kaynak bölgeleri (hardness measurement results and weld zones)

Ölçüm No	Malzeme	HAZ	Kaynak	HAZ	Malzeme	Kaynak Bölgeleri
1	140	156.9	209	158.8	140	ITAB
2	140	159.5	221	157.4	140	Kaynak Bölgesi
3	140	155.8	207	156.9	140	Kaynak Numunesi

Kök boşluklu kaynak işleminde kaynak havuzu ve numuneler arası nüfuziyet daha iyi bir sonuç vererek sertliği olumlu yönde etkilemiştir. Kaynak uygulaması ve kaynaktan etkilenen bölge (ITAB) sertlik değerlerinin en yüksek olduğu yerlerdir. Kaynak uygulaması alanından numuneye doğru gidildikçe sertlik değerleri azalma göstermiştir. Topçu'da yaptığı çalışmada bu bulguya ulaştığını belirtmiştir [20]. Kaynak sonrası incelemelerde sertlik testinin temel amacı, sertlik değerinin bir bölgeden diğerine geçişindeki eğilim yönünü izlemektir [20].

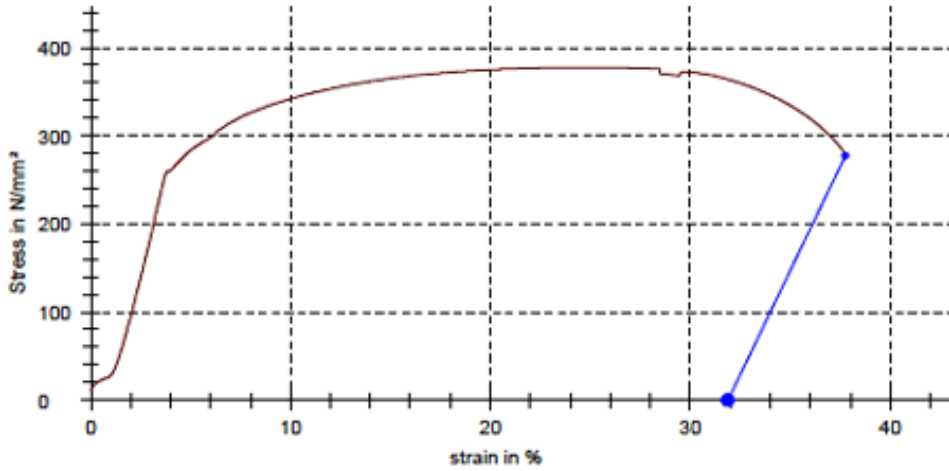
Şekil 6 'daki grafiğe ve Tablo 7'deki değerlere göre, uygun kök boşluğunun kaynak kalitesini arttırdığı görülmektedir. Aynı şekilde bu durumun malzemede tam nüfuziyet sağlaması ile birlikte malzemenin sertliğini de doğru oranda artırmış olduğu gözlemlenmektedir.

Numunelere mikro yapı analizi, sertlik ölçüm testleri uygulandıktan sonra çekme deneyi testi uygulanmıştır. Çekme testi deneyi numunenin kopana dek tek eksenli bir şekilde çekme kuvvetlerine maruz bırakıldığı ve buna bağlı olarak da numunenin kaynak kalitesinin ölçülmesini ve malzeme ile arasındaki dayanımı ölçmeye sağlayan bir testtir. Özdeş türdeki iki çeliğin kaynakla birleştirilmesinde, numunelerin çekme dayanımının ana malzemeye eşit veya yakın olması istenmektedir [21]. Bu çalışmada özdeş türdeki malzemeler kaynakla birleştirilip çekme testine tabi tutulmaktadır. Şekil 7'de hazırlanan numunelerin çekme testi sonucu görselleri verilmiştir.



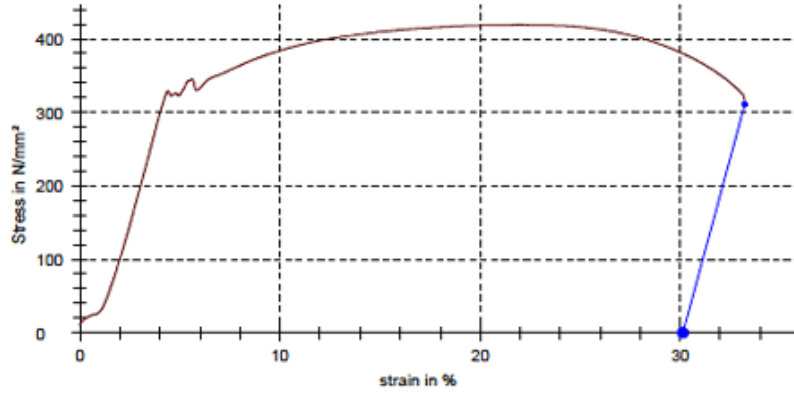
Şekil 7. Numune görselleri (Sample images)

Şekil 8’de numuneler arası kök boşluğu bırakılmadan kaynak işlemi uygulanmıştır. Çekme testi deneyi sonuçları Şekil 8’de verilmiştir. Şekil 8’de de görüldüğü gibi, kök boşluksuz uygulama ile kaynatılan numunenin gerilme direnci 377 MPa sonuç vermiştir. Bu değer de malzemenin maksimum çekme dayanımının 377 MPa değerinde olduğunu göstermektedir.



Şekil 8. Kök boşluksuz kaynatılan numunenin çekme testi deneyi sonucu (Tensile test result of welded sample without root gap)

Diğer opsiyon olarak kök boşluklu kaynak uygulamasının çekme testi yapılmıştır. Çekme testi deneyi Şekil 9’da verilmiştir. Şekil 9’da görüldüğü gibi kök boşluklu kaynak uygulaması ile kaynatılan numunelerin gerilme direnci 419 MPa sonuç vermiştir. Bu sonuç bu uygulama ile kaynatılan numunelerin maksimum çekme dayanımının 419 MPa değerinde olduğunu göstermektedir.



Şekil 9. Kök boşluklu kaynatılan numunenin çekme testi deneyi sonucu (Tensile test result of welded sample with root space)

Son olarak numunelere çentik darbe testi deneyi uygulanmıştır. Bu tip deneylerin nedeni, numunenin gerilmeye karşı gösterdiği tepkiyi belirlemek amacıyla numuneye önceden yapay bir çentik oluşturup bir kırılma etkisi yaratarak gösterdiği tepkiyi ölçmektir [20]. 2 farklı uygulama şeklinde kaynak işlemi yapılan numuneler arasında kök boşluğu bırakılarak kaynatılan numunenin çentik darbe testi sonuçları Tablo 8’de verilmiştir.

Tablo 8. Kök boşluğu bırakılarak kaynatılan numunenin çentik darbe testi sonucu (Notch impact test result of the sample welded by leaving a root cavity)

Test Yeri/ Test Location	Çentik Tipi Notch Type	Test Sıcaklığı Test Temperature	Ölçüler (mm)/ Sample Dimensions	Numune Yönü/ Sample Direction	Sonuç/ Result (Joule)			Ortalama/ Average
					1	2	3	
Malzeme/Material	V	23°C	10x10x55	Material/Transverse	174	160	144	159
Kaynak/Weld	V	23°C	10x10x55	Weldseam/90°	20	12	16	16

Tablo 8’de de görüldüğü gibi kök boşluğu bırakılarak kaynatılan numunelerin ortalama absorbe edebildiği enerji 159 J olarak sonuçlanmıştır.

Kök boşluksuz şekilde kaynak işlemi yapılan numunenin çentik darbe testi sonuçları Tablo 9’da verilmiştir.

Tablo 9. Kök boşluğu bırakmadan kaynatılan numunenin çentik darbe testi sonucu (Notch impact test result of the sample welded without leaving a root cavity)

Test Yeri/ Test Location	Çentik Tipi Notch Type	Test Sıcaklığı Test Temperature	Ölçüler (mm)/ Sample Dimensions	Numune Yönü/ Sample Direction	Sonuç/ Result (Joule)			Ortalama/ Average
					1	2	3	
Malzeme/Material	V	23°C	10x10x55	Material/Transverse	160	126	148	145
Kaynak/Weld	V	23°C	10x10x55	Weldseam/90°	52	44	68	55

Tablo 9’da görüldüğü gibi kök boşluğu bırakılarak kaynatılan numunenin ortalama absorbe edebildiği enerji değeri 145 J olarak sonuç vermiştir.

Kaynak sonrası her iki opsiyon uygulamasından da tahribatlı muayenelerden birisi olan çentik darbe testi için numune alınırken, kesimlerde numunelerin iç yapısını bozacak sıcak uygulamalardan uzak durulmuş ve soğutucu bir sıvı kullanılarak işlem tezgahında ihtiyaç duyulan çentikler dikkatle atılmıştır. Çentik darbe testi numunelerinin görselleri, Şekil 10’da verilmiştir [21].



Şekil 10. Çentik darbe testi numuneleri (Notch impact test specimens)

Her iki uygulama çeşidi de ISO148-1 standartlarına göre yapılmıştır. ISO148-1 standartlarına göre çentik darbe testi sonuçları Şekil 11’de gösterilmiştir [22].

Designation	Symbol and no.	V-notch test piece			U-notch test piece		
		Nominal dimension	Machining tolerance		Nominal dimension	Machining tolerance	
			Tolerance class ^a				Tolerance class ^a
Length	<i>L</i>	55 mm	±0,60 mm	js15	55 mm	±0,60 mm	js15
Width	<i>W</i>	10 mm	±0,075 mm	js12	10 mm	±0,11 mm	js13
Thickness ^c	<i>B</i>	10 mm	±0,11 mm	js13	10 mm	±0,11 mm	js13
— standard test piece		10 mm	±0,11 mm	js13	10 mm	±0,11 mm	js13
— subsize test piece		7,5 mm	±0,11 mm	js13	7,5 mm	±0,11 mm	—
— subsize test piece		5 mm	±0,06 mm	js12	5 mm	±0,06 mm	—
— subsize test piece		2,5 mm	±0,05 mm	js12	—	—	—
Angle of notch	1	45°	±2°	—	—	—	—
Ligament	2	8 mm	±0,075 mm	js12	5 mm	±0,09 mm	js13
Notch radius	3	0,25 mm	±0,025 mm	—	1 mm	±0,07 mm	js12
Notch position (centering)	4	27,5 mm	±0,42 mm ^d	js15	27,5 mm	±0,42 mm ^d	js15
Angle between plane of symmetry of notch and longitudinal axis of test piece		90°	±2°	—	90°	±2°	—
Angle between adjacent longitudinal faces of test piece	5	90°	±2°	—	90°	±2°	—
Surface roughness ^b	NA	<5 µm			<5 µm		

^a In accordance with ISO 286-1.

^b The test pieces shall have a surface roughness better than Ra 5 µm except for the ends.

^c If another thickness (2 mm or 3 mm) is specified, the corresponding tolerances shall also be specified.

^d For machines with automatic positioning of the test piece, it is recommended that the tolerance be taken as ±0.165 mm instead of ±0.42 mm.

Şekil 11. ISO 148-1 standartlarına göre çentik darbe testi sonuçları (Notch impact test results according to ISO 148-1 standards)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, kaynak kök boşluğu uygulamasının kaynak kalitesine etkisi ve malzemenin mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Mikro yapıları incelendiğinde ana malzemede düşük karbonlu çeliklere ait eş eksenli tane yapısı görülmüştür. Kaynak dikişlerinde asiküler ferrit tane yapısı vardır. Bu yapının oluşumu kaynak dikişinde bir miktar sertlik artışına neden olmuştur. Mikro yapılarına bakıldığında kaynak kök boşluğu bırakılan numunelerde tam nüfuziyet sağlandığı görülürken kaynak kök boşluğu bırakılmamış olan numunelerde ise nüfuziyet eksikliği tespit edilmiştir.
- Sertlik ölçümlerine bakıldığında sertlik ölçümleri mikro vickers sertlik ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Ana malzemedeki kaynak metaline doğru gidildikçe sertliğin arttığı görülmüştür. Bu artış genel kabul kriterlerine ve önceki deneysel çalışmalara uygun olduğu ve sertlik miktarlarının kabul kriterleri arasında olduğu tespit edilmiştir.
- Çekme testi sonuçlarına bakıldığında teste tabi tutulan numunelerin ana malzemedeki kırıldığı, yüzde uzama miktarlarının kabul kriterleri arasında olduğu tespit edilmiştir. Kök boşluksuz kaynak uygulamasına göre kök boşluklu kaynak uygulamasının çekme dayanım değeri daha yüksek sonuç vermiştir.
- Çentik darbe testi sonuçları incelendiğinde ise kök boşluklu uygulamanın absorbe edebildiği enerji miktarı kök boşluksuz kaynak uygulamasından daha fazla değerde sonuç vermiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Yazarlar, çalışmaya olan katkılarından dolayı Dekoral Alüminyum San. Tic. A.Ş.'ye teşekkür etmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. H. Çapın, S235 JR alaşımsız çelik boruların dik pozisyonda orbital kaynak cihazı ile birleştirilmesi ve uygulamanın optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2014.
2. B. Güler, Türk inşaat sektöründe yapısal çelik üretim-örgütlenme-uygulama, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Kültür Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2005.
3. G. Altay, E.M. Güneyisi, Türkiye'de yapısal çelik sektörü ve yeni gelişimler, Boğaziçi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 2005.
4. Britannica, Steel, <https://www.britannica.com/technology/steel> Erişim tarihi 02.04.2023.
5. M. F. Ashby, Engineering Materials 2, Oxford: Pergamon Press. 0-08-032532-7.
6. World History Encyclopedia, İngiltere sanayi devriminde çelik endüstrisi, <https://www.worldhistory.org/trans/tr/2-2206/ingiltere-sanayi-devriminde-celik-endustrisi>, Erişim tarihi:02.04.2023.
7. TUCSA (Türk Yapısal Çelik Derneği), yapısal çelik kullanımı, üretim kapasiteleri, çeliğin Avrupa ve Türkiye inşaat sektöründeki yeri, Türk Yapısal Çelik Derneği, 2005.
8. EAG Demir San. Ve Tic. A.Ş., Yapısal çeliğin önemi, <https://www.eagdemir.com/yapisal-celigin-onemi-icerik-71>, Erişim tarihi:01.04.2023.
9. T. Ersöz, D. Ünver, B. Eyiol, Demir çelik sektörüne genel bir bakış ve beş milyon ton üstü demir çelik ihracatı yapan ülkelerin kümeleme analizi ile incelenmesi, Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi, 4(2): 75-90, 2015.
10. N. Kahraman, B. Gülenç, A. Hüseyin, Ark kaynak yöntemi ile birleştirilen ostenitik paslanmaz çelik ile düşük karbonlu çeliğin mekanik özelliklerinin incelenmesi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 17(2): 75-85, 2002.
11. K. Yakup, S235JR ile S355JR yapı çeliklerinin özlü tel elektrotla MAG kaynak yöntemiyle birleştirilebilirliğinin araştırılması, Politeknik Dergisi, 21(3): 597-602, 2018.

12. R. Yılmaz, Z. Barlas, Paslanmaz eliklerin gazaltı kaynak yöntemi ile birleştirilmesinde koruyucu gaz kompozisyonunun mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 11(3): 391-400, 2011.
13. N. Yavuz, R. Özcan, F. G. Polat, Tozaltı kaynak bağlantısının sonlu elemanlar yöntemi ile termal ve mekanik analizi, Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 10(2):9-19, 2005
14. A. Akın, Gazaltı kaynak parametrelerinin kaynak mukavemetine etkilerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, Türkiye, 2015.
15. D1.1-D1.1M, AWS, American Welding Society, 2020.
16. H. Çağlar, ST37 eliğinin mekanik ve termal yüzey işlemleri uygulamaları ile mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük, Türkiye, 2022.
17. B. Çevik, Örtülü elektrot ark kaynağı ve MIG kaynağında akım şiddetinin kaynak nüfuziyetine etkisinin incelenmesi, İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi, 2(2): 22-29,2013.
18. N. Yavuz, R. Özcan, F. G. Polat, Tozaltı kaynak bağlantısının sonlu elemanlar yöntemi ile termal ve mekanik analizi, Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 10(2):9-19, 2005.
19. B. Çiçek, T. Aydoğmuş, E. G. İş, Y. Sun, Invetigations of mechanical properties after dissimilar steels post-weld of Q345B steel, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 26(7): 1328-1334, 2020.
20. İ. Topçu, TIG ve MIG Kaynağı ile İşlem Gören 304 ve 1040 eliklerin ITAB Bölgesindeki Mekanik Özelliklerin İncelenmesi, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 34(3): 171-181, 2019.
21. A. Yürük, Y. Kaya, N. Kahraman, Alüminyum Alaşımlarının MIG Kaynak Yöntemi ile Kaynak Edilebilirliđinin İncelenmesi, Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 4(1): 42-52, 2021.
22. Y. Gür, B. Gülenç, The effect of MAG weld applied to high tensiles 700mc structural steel on hardness and toughness values, 3rd International Turkish World Engineering and Science Congress, October 22-24 2021, Ankara.

Analysis and Optimization of Process Parameters Affecting on the Tensile Strength of PLA and Iron-Reinforced PLA Samples Fabricated by Fused Deposition Modeling Method

Yasin Kuruoğlu¹ , Mahir Akgün^{2,*} , Halil Demir³ 

¹TÜBİTAK SAGE, Defense Industries Research and Development Institute, Ankara, Turkey

²Aksaray University, Vocational School of Technical Sciences, Aksaray, Türkiye

³Karabük University, Faculty of Engineering, Karabük, Turkey

ARTICLE

INFORMATION

Received: 25.07.2023

Accepted: 18.08.2023

Keywords:

Fused deposition modeling

Optimization

Tensile strength

PLA

ABSTRACT

This study focuses on investigating the influence of printing parameters on the tensile strength of PLA and iron-reinforced PLA samples produced using FDM technology. Filament material (PLA and iron-reinforced PLA), infill ratio (20, 40 and 60%), layer thickness (0.1, 0.2 ve 0.3 mm), printing speed (40, 60 and 80 mm/s) and raster angle (30, 45 and 60°) were selected as process parameters. The experimental design was based on the Taguchi L18 index. Signal-to-Noise (S/N) ratio, variance analysis (Anova) and regression analyses were used to statistically analyze the tensile strength values obtained as a result of experimental measurements. The outcomes of this study show that the reinforcement to PLA material decreases the tensile strength and increases the % elongation. The maximum tensile strength was measured as 33.55 MPa at 60% infill rate, 0.3 mm layer thickness, 60 mm/s printing speed and 60° raster angle in PLA filament material, which is the optimum process parameters.

Eriyik Yığıma Modelleme Yöntemi ile Üretilen PLA ve Demir Takviyeli PLA Numunelerinin Çekme Dayanımını Etkileyen Proses Parametrelerinin Analizi ve Optimizasyonu

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 25.07.2023

Kabul: 18.08.2023

Anahtar Kelimeler:

Eriyik yığıma modelleme

Optimizasyon

Çekme dayanımı

PLA

ÖZET

Bu çalışma, FDM teknolojisi kullanılarak üretilen PLA ve demir takviyeli PLA numunelerin çekme mukavemeti üzerinde baskı parametrelerinin etkisini araştırmaya odaklanmaktadır. Proses parametreleri olarak filament malzemesi (PLA ve demir takviyeli PLA), dolgu oranı (20, 40 ve 60%), katman kalınlığı (0.1, 0.2 ve 0.3 mm), baskı hızı (40, 60 ve 80 mm/s) ve tarama açısı (30, 45 ve 60°) seçilmiştir. Deneysel tasarımı Taguchi L18 indeksine göre yapılmıştır. Deneysel ölçümler sonucunda elde edilen çekme dayanımı değerlerini istatistiksel olarak analiz etmek için Sinyal Gürültü (S/N) oranı, varyans analizi (Anova) ve regresyon analizleri kullanılmıştır. Bu çalışmanın sonuçları PLA malzemeye demir takviyesinin çekme dayanımını düşürdüğünü ve % uzamayı arttırdığını göstermektedir. Maksimum çekme dayanımı optimum proses parametreleri olan PLA filament malzemesinde, 60 doluluk oranında, 0.3 mm katman kalınlığı, 60 mm/s baskı hızında ve 60° tarama açısında 33.55 MPa olarak ölçülmüştür.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Today, Fused Deposition Modeling (FDM) technology has become a widely used technique to produce complex-shaped parts that are difficult to manufacture due to its advantages over traditional methods [1]. Unlike traditional manufacturing methodologies where a final small design is achieved by removing material from a large part, FDM allows complex shapes to be created with

*Corresponding author, e-mail: mahirakgun@aksaray.edu.tr

To cite this article: Y. Kuruoğlu, M. Akgün, H. Demir, Analysis and Optimization of Process Parameters Affecting on the Tensile Strength of PLA and Iron-Reinforced PLA Samples Fabricated by Fused Deposition Modeling Method, Manufacturing Technologies and Applications, 4(2), 72-80, 2023. <https://doi.org/10.52795/mateca.1332694>, This paper is licensed under a CC BY-NC 4.0

less material waste by combining materials layer upon layer [2, 3]. This technology can help increase industrial productivity and reduce production costs by reducing time-to-market [4]. Due to these superior aspects, its use in industrial applications such as aerospace, automotive, medical, and construction, is becoming widespread [3-5]. In addition, this method can produce 40-60% lighter and structurally robust products for applications where weight savings are critical [6]. Thermoplastic polymers are utilized in this technique as construction materials [7]. The type of construction materials has a significant impact on print quality and mechanical properties. The quality and mechanical properties of the printed samples are also influenced by several process variables such as layer thickness, raster angle, infill percentage, extruder temperature, bed temperature, printing speed and extrusion [8]. Günay et al. applied the Taguchi method to investigate the effect of printing parameters on the tensile strength of PLA+ material fabricated by FDM technology [9]. Their results showed that the most effective parameter on the tensile strength was the fill rate, and the scanning angle and printing speed were the other important parameters, respectively. Roa et al. investigated the effect of printing parameters such as layer thickness, print temperature, and infill pattern on the tensile strength of carbon fiber PLA [10]. The results showed that the interaction between layer thickness and infill pattern has a significant effect on the tensile strength of carbon fiber PLA. Kamer et al. investigated the mechanical properties of ABS and PLA material fabricated with different printing speeds by FDM technology [11]. As a result, the authors indicated that the tensile strength of the samples produced with PLA material is higher than the samples produced with ABS material. Altan et al. [12] investigated the effects of process parameters on the quality of PLA composites produced by FDM method and reported tensile strength and surface quality of the FDM samples improved by about 25% and 12%, respectively at optimal process conditions. Schirmeister et al. investigated the effects of printing parameters such as temperature and diameter of the nozzle, extrusion rate, build plate temperature, and build plate material on the mechanical properties and surface quality of samples produced using HDPE (high density polyethylene) [13]. The authors reported that the nozzle diameter and printing speed affect the surface quality but not the mechanical properties. Sammaiah et al. investigated the influence of process parameters on the surface quality of ABS composites produced by FDM [14]. The results showed that the surface roughness values increased with the increase of the layer thickness and decreased with the increase of the filling density. Liu et al. investigated the effects of wood, ceramic, metal, and carbon fiber reinforcements on the mechanical characteristics of PLA composites fabricated by FDM method [15]. The authors reported that ceramic, copper, and aluminum-based PLA composite samples exhibit similar mechanical properties to PLA samples. Zhang et al. studied the characterization of the mechanical properties of PLA and copper/PLA composite part produced by FDM method [16]. As a result, they observed that copper reinforcement decreased the tensile strength and increased the % elongation compared to PLA material.

In this study, it is aimed to compare the tensile strength of PLA and iron reinforced PLA composites produced using fused deposition modeling (FDM) at different printing parameters. In this context, tensile samples have been produced using the Taguchi L18 orthogonal array. Analysis of the Signal-to-Noise (S/N) ratio, variance analysis (ANOVA) and regression analysis have been used in statistical evaluation of the data obtained as a result of tensile tests. Finally, the validation of the optimization has been checked by verification tests.

2. MATERIAL AND METHOD (MATERYAL VE YÖNTEM)

In this study, it is aimed to analyze the effect of filament materials and process parameters on the mechanical properties of tensile specimens produced by the FDM method. In this context, tensile specimens conforming to ASTM D638-IV standards have been produced using PLA and iron-reinforced PLA filaments with Zaxe brand 3D printer. These filaments, which are suitable for production by the fused deposition modeling (FDM) method, were commercially available from Zaxe. The printing temperature and table temperature were selected as 210°C and 40°C, considering the manufacturer's recommendation. Figure 1 shows the experimental set. Three different fill rates (20, 40 and 60%), three different layer thicknesses (0.1, 0.2 and 0.3 mm), three different printing

speeds (40, 60 and 80 mm/s) and three different raster angles (30°, 45° and 60°) were selected as process parameters. According to these parameters, tensile specimens were produced using the Taguchi L18 orthogonal array. Tensile tests were carried out on an INSTRON brand test device (Instron Corp., Canton, MA, USA) with a capacity of 100 kN.

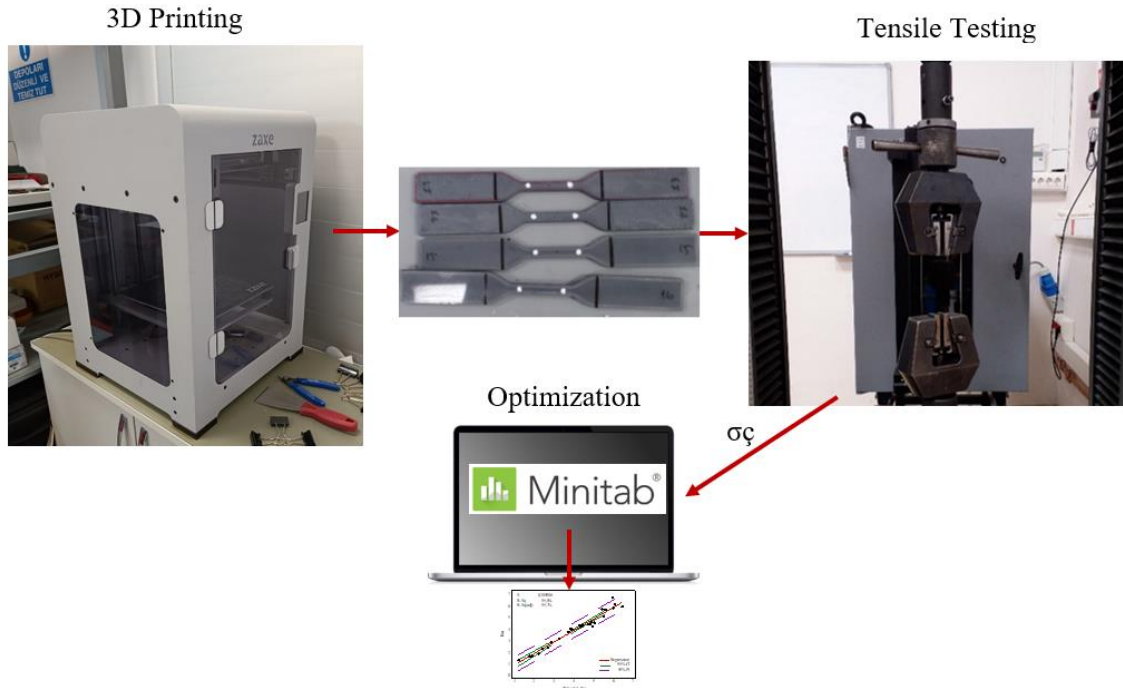


Figure 1. Experimental setup (Deney düzeneği)

In the optimization process, filament material (A), infill ratio (B), layer thickness (C), printing speed (D), and raster angle (E) were selected as input factors while tensile strength was selected as output parameters. Analysis of variance (ANOVA) and regression analyses were used to explain and model the relationship between tensile strength values obtained from experimental measurements and process parameters, respectively [17, 18]. The "largest best" approach in Equation 1 was used to determine the maximum tensile strength value.

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

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

3.1. Analysis of the Signal-to-Noise (S/N) ratio (Sinyal-Gürültü (S/N) Oranı Analizi)

The tensile strength values of the samples produced with PLA and iron-reinforced filaments at different printing parameters and the corresponding S/N values for each printing combination and S/N analysis response results are given in Table 1 and Table 2, respectively. In Table 2, the highest value for each process factor indicates the optimum level of control. From this table, the optimal combination of process parameters for maximum tensile strength is found to be: A2B3C3D2E3. The symbols A, B, C, D and E represents process parameters: filament material, infill ratio, layer thickness, printing speed, and raster angle, respectively. Figure 2 shows the scatter plot of process parameters on the average S/N ratio. In this graph, the point where the S/N ratio is the highest for each process parameter indicates the optimum level.

Table 1. Results of the experiment (Deney sonuçları)

Test Id	Parameters					Tensile strength (MPa)	Tensile strength S/N (dB)
	A	B	C	D	E		
1	Iron-reinforced PLA	20	0.1	40	30	10.82	20.684
2	Iron-reinforced PLA	20	0.2	60	45	11.92	21.525
3	Iron-reinforced PLA	20	0.3	80	60	12.35	21.833
4	Iron-reinforced PLA	40	0.1	40	45	15.43	23.767
5	Iron-reinforced PLA	40	0.2	60	60	16.04	24.104
6	Iron-reinforced PLA	40	0.3	80	30	16.19	24.184
7	Iron-reinforced PLA	60	0.1	60	30	19.06	25.602
8	Iron-reinforced PLA	60	0.2	80	45	19.11	25.625
9	Iron-reinforced PLA	60	0.3	40	60	19.54	25.818
10	PLA	20	0.1	80	60	24.86	27.910
11	PLA	20	0.2	40	30	25.14	28.007
12	PLA	20	0.3	60	45	25.89	28.262
13	PLA	40	0.1	60	60	27.85	28.896
14	PLA	40	0.2	80	30	28.12	28.980
15	PLA	40	0.3	40	45	28.36	29.054
16	PLA	60	0.1	80	45	32.28	30.178
17	PLA	60	0.2	40	60	33.10	30.396
18	PLA	60	0.3	60	30	33.55	30.513

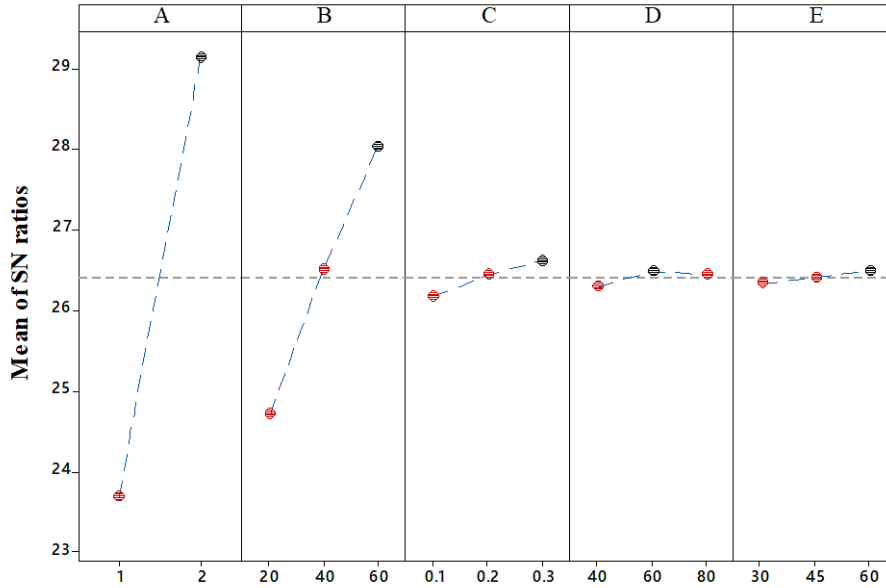


Figure 2. Distribution of process parameters on average S/N ratio (Ortalama S/N oranı üzerinde proses parametrelerinin dağılımı)

Table 2. ANOVA results for tensile strength (Çekme dayanımı için ANOVA sonuçları)

Level	A	B	C	D	E
1	23.68	24.70	26.17	26.29	26.33
2	29.13	26.50	26.44	26.48	26.40
3		28.02	26.61	26.45	26.49
Delta	5.45	3.32	0.44	0.20	0.16
Rank	1	2	3	4	5

As a result, the maximum tensile strength value was measured as 33.55 MPa at 60% infill rate, 0.3 mm layer thickness, 60 mm/s printing speed and 60° raster angle in PLA filament material, which is the optimum process parameters.

3.2. Evaluation of Tensile Test Results (Çekme Testi Sonuçlarının Değerlendirilmesi)

Figure 3 shows the variation of tensile strength of the samples produced with PLA and iron-reinforced PLA filament materials at different printing parameters. When Figure 3 is examined, it is seen that the tensile strengths increase with the increase in the filling ratio and layer thickness for the two filament materials. Günay et al. associated the increase in tensile strength with the increase in the filling ratio with the increase in the tensile load carrying capacity per unit area as a result of the increase in the filling ratio in the cross-sectional area [9]. According to the general trend, the tensile strength of both filament materials increased slightly with the increase in printing speed but showed a decreasing trend after 60 mm/s press speed. Raster angle, on the other hand, does not seem to have a significant effect on the tensile strength.

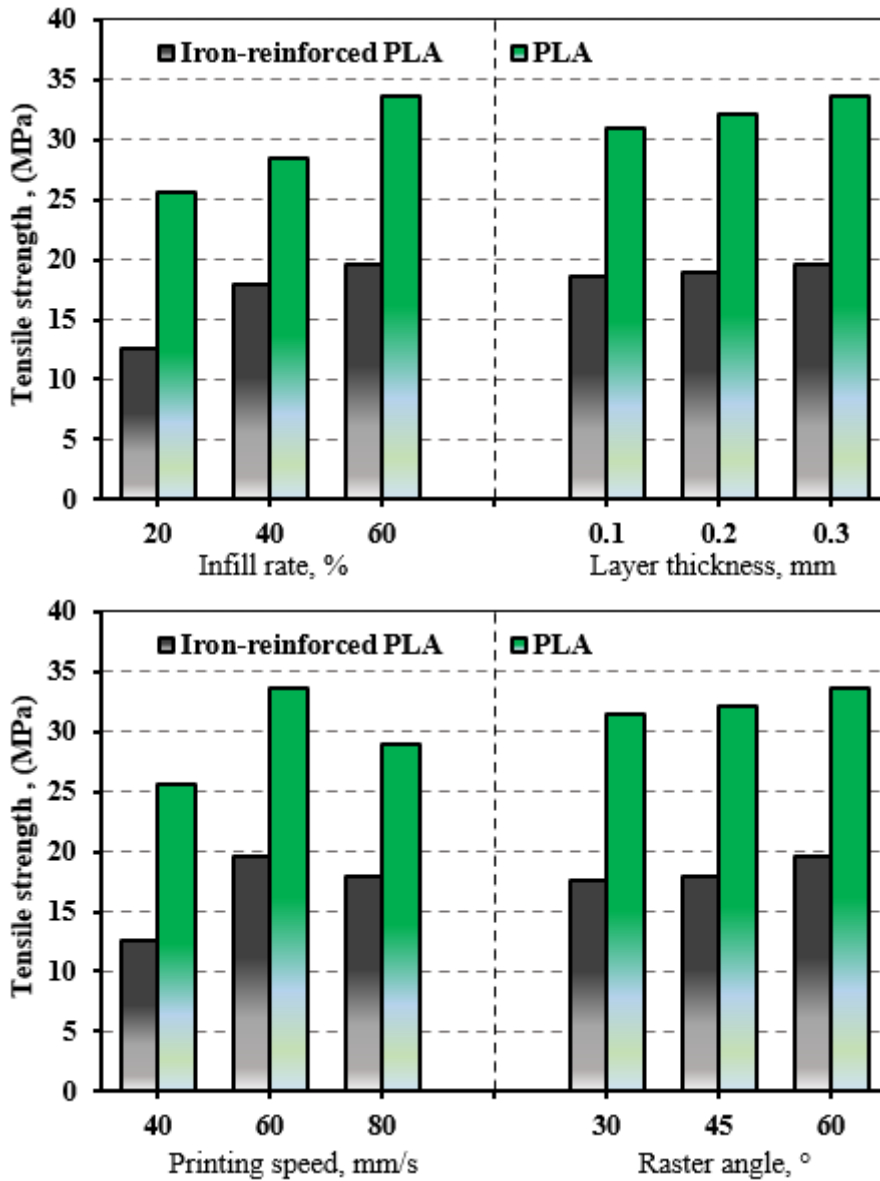


Figure 3. Variation of tensile strength according to proses parameters (Proses parametrelerine göre çekme dayanımının değişimi)

On the other hand, it is clearly seen that the filament material plays an effective role on the tensile strength. The tensile strength values measured in PLA filament are higher than the tensile

strength values obtained in iron-reinforced PLA filament under all printing conditions. In a similar study, Uzun and Erdoğan reported that the tensile strength of the carbon and copper-doped samples was lower than the PLA samples [19]. Moreover, Özsoy et al. reported that PLA specimens had higher strength values than ABS specimens and explained this with the fact that the bonding between the layers during the specimen production process was better for PLA material specimens than ABS specimens [20]. Figure 4 shows the SEM images taken from the fracture surfaces of the specimens after the tensile test. When Figure 4 is examined, it is seen that the top and bottom layers adhere perfectly to each other for all filaments, but there are more air pockets and porous structures containing voids between the layers in the iron-doped PLA sample compared to the PLA sample. The formation of these porous structures is thought to be the cause of the decrease in the tensile strength of the iron-reinforced PLA sample. In short, iron reinforcement reduces tensile strength and increases % elongation compared to PLA material.

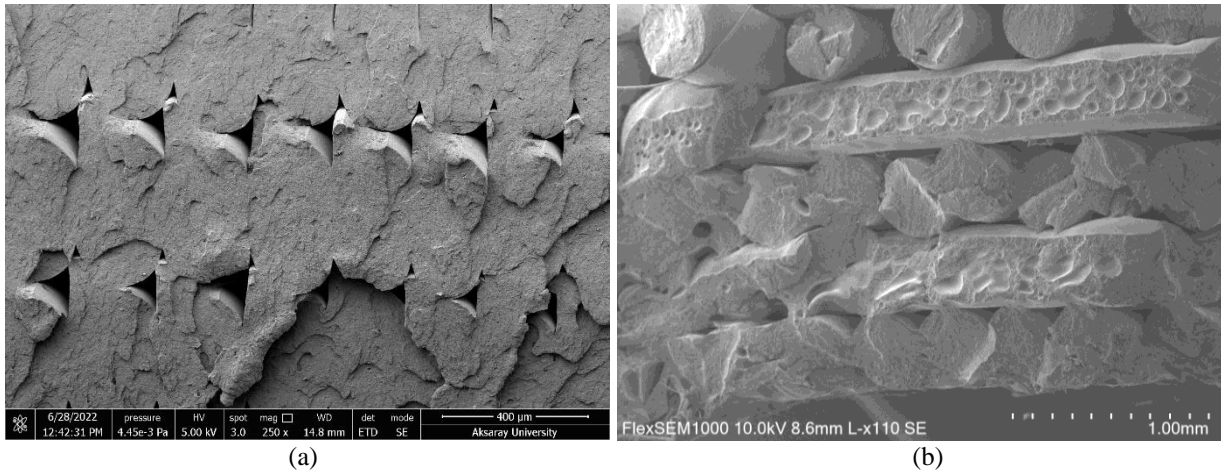


Figure 4. SEM fracture surface images of a) PLA and b) Iron-reinforced PLA samples (a) PLA ve b) Demir takviyeli PLA numunelerin SEM kırık yüzey görüntüleri)

3.3. Analysis of Variance Results (Varyans Analizi Sonuçları)

ANOVA is a statistical technique used to detect how each of the control elements in the test design interacts with output parameters [17]. In this study, ANOVA was used to analyze the individual interaction of each process parameter on tensile strength. This analysis was performed at 5% significance level and 95% confidence level [17, 21-23]. ANOVA results for tensile strength are given in Table 3. The importance levels of the process parameters were determined by considering the F values in Table 3. The last column of the table shows the percentage value of the level of influence of each process parameter. According to Table 3, the percentage effects of factors A, B, C, D and E on the surface roughness were found to be 81.35%, 18.10%, 0.27%, 0.03% and 0.01%, respectively. The error percentage was quite low at 0.24%. As a result, the most important process factor affecting the tensile strength with 81.35% additive ratios is the filament material.

Table 3. ANOVA results for tensile strength (Çekme dayanımı için ANOVA sonuçları)

Source	DF	SS	MS	F	P	Contribution (%)
A	1	782.629	782.629	2682.98	0.000	81.35
B	2	174.104	87.052	298.43	0.000	18.10
C	2	2.608	1.304	4.47	0.050	0.27
D	2	0.329	0.164	0.56	0.590	0.03
E	2	0.073	0.037	0.13	0.884	0.01
Error	8	2.334	0.292	-	-	0.24
Total	17	962.076	-	-	-	100

3.4. Regression Analysis of Tensile Strength (Çekme Mukavemetinin Regresyon Analizi)

Regression analysis was applied to numerically express the relationship between the tensile strength of PLA and iron-reinforced PLA samples produced by FDM method and process parameters. The equations developed with the linear regression model to predict the tensile strength of PLA and iron-reinforced PLA specimens are given below, respectively.

$$\sigma_{\tau} = 19.909 + 0.19025 B + 4.65 C + 0.00217 D + 0.00478 E \quad (2)$$

$$\sigma_{\tau} = 6.722 + 0.19025 B + 4.65 C + 0.00217 D + 0.00478 E \quad (3)$$

The R^2 value for the tensile strength prediction equations developed through linear regression analysis was 0.968. The prediction equations, which have a very high coefficient of determination (R^2), produce values close to the true values and this is also confirmed by the comparison plot for the test results and predicted values given in Figure 5. Validation experiments are very important to see the success of the developed prediction equations and the optimization process. In this context, the confidence interval (CI) value for tensile strength was calculated using Equations 4 and 5.

$$n_{eff} = \frac{N}{1+T_{dof}} \quad (4)$$

$$CI = \sqrt{F_{\alpha,1,fe} V_e \left[\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{R} \right]} \quad (5)$$

The symbols N, Tdof, $F_{\alpha,1,fe}$, α , fe, Ve, R and n_{eff} represents the total number of experiments, the total main factor degrees of freedom, the F ratio at a 95% confidence, the significance level, the degrees-of-freedom of error, error variance, the effective number of replications and the number of replications for confirmation experiments, respectively [24, 25]. The confidence interval was calculated as 1.554. According to the signal-to-noise (S/N) ratio analysis, the optimum factor group giving the highest tensile strength value was obtained as A2B3C3D2E3. the average value of the tensile strength was calculated to be 22.2 MPa.

$$\sigma_{\tau_{opt}} = (A_2 - T_{\sigma\tau}) + (B_3 - T_{\sigma\tau}) + (C_3 - T_{\sigma\tau}) + (D_2 - T_{\sigma\tau}) + (E_3 - T_{\sigma\tau}) + T_{\sigma\tau}$$

$$[\sigma_{\tau_{opt}} - CI] < \sigma_{\tau_{exp}} < [\sigma_{\tau_{opt}} + CI] = [33.43 - 1.554] < 33.55 < [33.43 + 1.554] = 31.876 < 33.55 < 34.984$$

As a result, the tensile strength values are within the confidence interval limits and accordingly, optimization of the process parameters has been performed at a significance level of 0.05. Furthermore, the accuracy of the optimization process have been tested at optimum levels and random levels for tensile strength. The validation results are given in Table 4. The error percentages calculated for the tensile strength are within acceptable limits and this indicates a successful optimization.

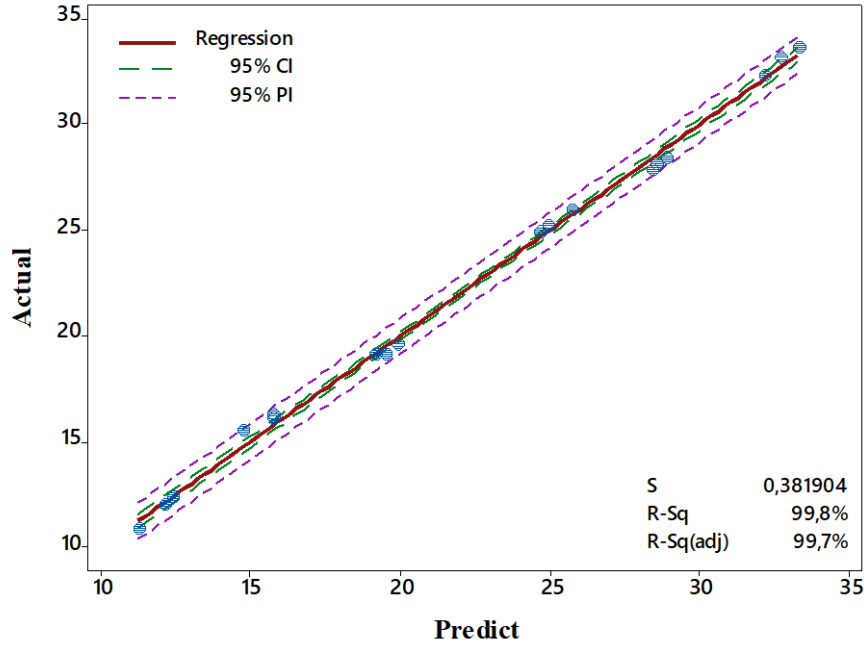


Figure 5. Comparison of the prediction results with experimental results (Tahmin sonuçlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması)

Table 4. Validation test results (Doğrulama testi sonuçları)

	Actual	Predict	Error (%)
A ₂ B ₃ C ₃ D ₂ E ₃ (optimum)	33.55	33.13	1.25
A ₂ B ₂ C ₂ D ₂ E ₁ (random)	28.12	28.72	2.13

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In this study, the effects of printing parameters such as infill rate, layer thickness, printing speed and raster angle on the tensile strength of PLA and iron-reinforced PLA specimens produced by fused deposition modeling technology were investigated experimentally and statistically. The results obtained from this study are summarized below:

- The optimal printing parameters for the tensile strength were determined as A₂B₃C₃D₂E₃ (i.e., filament material = PLA, infill rate = 60%, layer thickness = 0.3 mm, printing speed = 60 mm/s and raster angle = 60°).
- According to the results of statistical analyses, the filament material plays an important role in tensile strength with a percentage contribution of 81.35%.
- The equation developed to predict the tensile strength of the samples produced using the 3D printer gives results very close to the actual values with an R² value of 0.968.
- It was observed that iron reinforcement of PLA material decreased the tensile strength and increased the % elongation.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

1. P. Minetola, F. Calignano, M. Galati, Comparing geometric tolerance capabilities of additive manufacturing systems for polymers, *Additive Manufacturing*, 32: 101103, 2020.
2. H.B. Mamo, A.D. Tura, A.J. Santhosh, N. Ashok, D.K. Rao, Modeling and analysis of flexural strength with fuzzy logic technique for a fused deposition modeling ABS components, *Materials Today: Proceedings*, 57(2): 768-774, 2022.
3. J.Y. Lee, J. An, C.K. Chua, Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials, *Applied Materials Today*, 7: 120-133, 2017.

4. F.P.W. Melchels, J. Feijen, D.W. Grijpma, A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering, *Biomaterials*, 31(24): 6121-6130, 2010.
5. J.W. Stansbury, M.J. Idacavage, 3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities, *Dental Materials*, 32(1): 54-64, 2016.
6. S.J. Schuldt, J.A. Jagoda, A.J. Hoisington, J.D. Delorit, A systematic review and analysis of the viability of 3D-printed construction in remote environments, *Automation in Construction*, 125: 103642, 2021.
7. B. Turner, R.A. Strong, S. Gold, A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling, *Rapid Prototyping*, 20(3): 192-204, 2014.
8. Y. Kuruoğlu, M. Akgün, H. Demir, FDM yöntemiyle üretilen ABS, PLA ve PETG numunelerin yüzey pürüzlülüğü ve çekme dayanımının modellenmesi ve optimizasyonu, *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 6(3): 358-369, 2022.
9. M. Günay, S. Gündüz, H. Yılmaz, N. Yaşar, R. Kaçar, PLA esaslı numunelerde çekme dayanımı için 3D baskı işlem parametrelerinin optimizasyonu, *Politeknik Dergisi*, 23(1): 73-79, 2020.
10. V.D.P. Rao, P. Rajiv, V.N. Geethika, Effect of fused deposition modelling (FDM) process parameters on tensile strength of carbon fibre PLA, *Materials Today: Proceedings*, 18: 2012-2018, 2019.
11. M.S. Kamer, Ş. Temiz, D.H. Yaykaşlı, A. Kaya, O. Akay, 3B yazıcıda farklı yazdırma hızlarında ABS ve PLA malzeme ile üretilen çekme test numunelerinin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 37(3): 1197-1212, 2022.
12. M. Altan, M. Eryildiz, B. Gumus, Y. Kahraman, Effects of process parameters on the quality of PLA products fabricated by fused deposition modeling (FDM): surface roughness and tensile strength, *Materials Testing*, 60(5): 471-477, 2018.
13. C.G. Schirmeister, T. Hees, E.H. Licht, R. Mülhaupt, 3D printing of high density polyethylene by fused filament fabrication, *Additive Manufacturing*, 28: 152-159, 2019.
14. P. Sammaiah, K. Rushmamanisha, N. Praveenadevi, I.R. Reddy, The influence of process parameters on the surface roughness of the 3d printed part in FDM process, In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 981(4): 042021, 2020.
15. Z. Liu, Q. Lei, S. Xing, Mechanical characteristics of wood, ceramic, metal and carbon fiber-based PLA composites fabricated by FDM, *Journal of Materials Research and Technology*, 8(5): 3741-3751, 2019.
16. X. Zhang, L. Chen, T. Mulholland, T.A. Osswald, Characterization of mechanical properties and fracture mode of PLA and copper/PLA composite part manufactured by fused deposition modeling, *SN Applied Sciences*, 1(6): 1-12, 2019.
17. T. Kivak, Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts, *Measurement*, 50: 19-28, 2014.
18. B. Özlü, M. Akgün, H. Demir, AA 6061 Alaşımının tornalanmasında kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisinin analizi ve optimizasyonu, *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5(2): 151-158, 2019.
19. M. Uzun, Y.E. Erdoğan, Eriyik yığılma modellenmesi ile üretimde takviyesiz ve takviyeli pla kullanımının mekanik özelliklere etkisinin araştırılması, *Journal of the Institute of Science and Technology*, 10(4): 2800-2808, 2020.
20. K. Özsoy, A. Erçetin, Z.A. Çevik, Comparison of mechanical properties of PLA and ABS based structures produced by fused deposition modelling additive manufacturing, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 27: 802-809, 2021.
21. M. Akgün, H. Yurtkuran, H.B. Ulas, AA7075 alaşımının işlenebilirliğine suni yaşlandırmanın etkisinin analizi ve kesme parametrelerinin optimizasyonu, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(1): 75-81, 2020.
22. H. Ballıkaya, Slepner soğuk iş takım çeliğinin yüzey finish modellemesinde takım yolu stratejisinin ve kesme parametrelerinin MRR ve Ra üzerine etkisi, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 13(1): 35-42, 2022.
23. M. Akgün, Optimization of process parameters affecting cutting force, power consumption and surface roughness using taguchi-based gray relational analysis in turning AISI 1040 steel, *Surface Review and Letters*, 29(03): 2250029, 2022.
24. B. Özlü, Evaluation of energy consumption, cutting force, surface roughness and vibration in machining toolox 44 steel using taguchi-based gray relational analysis, *Surface Review and Letters*, 29(08): 2250103, 2022.
25. H. Yaka, Multiple Optimization of cutting parameters affecting kerf formation and surface roughness in laser cutting of Al 5052 alloy, *El-Cezeri*, 9(1): 220-231 2022.

Ultrasonik Atomizasyon: Toz Üretiminde Alternatif Bir Yol

Yağız Akyıldız^{1*}, Serdar Sarı², Onur Furkan Kaya³, Rıdvan Ymanoğlu¹

^{1*}Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kocaeli, Türkiye

²Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Ankara, Türkiye

³İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İstanbul, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 01.05.2023

Kabul: 22.08.2023

Anahtar Kelimeler:

Toz metalurjii
Atomizasyon teknikleri
Ultrasonik atomizasyon
Eklemeli imalat

ÖZET

Metal tozlarının eklemeli imalatta kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Metal tozu, tüm bu proseslerin hammaddesi olup nihai ürünün fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin yanı sıra boyut ve tolerans değerleri gibi özelliklerini belirlemektedir. Konvansiyonel atomizasyon prosesleri ile toz üretimi, seri üretime uygunluğu, yüksek kalitede metal tozu ve düşük maliyetli üretim imkanı ile dikkat çekmektedir. Ancak, partikül boyut dağılımı ve küreselliği, eklemeli imalat proseslerinde kullanılacak toz kalitesi ve son ürün maliyeti için belirleyici faktörlerdir. Atomizasyon sürecinde kullanılan başlangıç hammaddesi de üretilen tozun kalitesi ve fiyatını etkiler. Dolayısıyla, yüksek kalitede ve uygun maliyetli toz üretimi için atomizasyon proseslerinin parametreleri (ergimiş metalin sıcaklığı, atomizasyon atmosferi ve türü gibi) üretim öncesinde belirlenmelidir. Ultrasonik atomizasyon yöntemi, konvansiyonel yöntemlere göre daha düşük maliyetle yüksek kalitede toz üretilmekte ve özellikle eklemeli imalat alanında ihtiyaç duyulan partikül boyut dağılımı ve akışkanlığı karşılayabilmektedir. Bu çalışmada ultrasonik atomizasyon yönteminin çalışma mekanizmasının incelenmiş ve konvansiyonel atomizasyon teknikleri ile nihai ürün kalitesi açısından arada oluşan farklar karşılaştırılmıştır.

Ultrasonic Atomization: An Alternative Path to Powder Production

ARTICLE INFO

Received: 01.05.2023

Accepted: 22.08.2023

Keywords:

Powder metallurgy
Atomization techniques
Ultrasonic atomization
Additive manufacturing

ABSTRACT

The use of metal powders in additive manufacturing is increasing day by day. Metal powder is the raw material for all these processes and determines the properties of the final product, such as its physical, chemical, and mechanical characteristics, as well as its dimensions and tolerance values. Metal powder production using conventional atomization processes is noteworthy due to its suitability for mass production, high-quality metal powder, and low-cost production. However, particle size distribution and sphericity are crucial factors for the quality of the powder used in additive manufacturing processes and the cost of the final product. The raw material used in the atomization process also affects the quality and price of the produced powder. Therefore, the parameters of the atomization processes, such as the melting temperature of the metal, the atomization ambient, and the type should be determined before production to achieve high-quality and cost-effective powder production. The ultrasonic atomization method can produce high-quality powder at a lower cost compared to conventional methods and can meet the particle size distribution and fluidity required in the additive manufacturing field. This study examines the ultrasonic atomization method's operating mechanism and compares the final product quality differences between conventional atomization techniques.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda özellikle savunma, havacılık, uzay, medikal ve otomotiv sektörleri, son ürün olarak kullanılan parçaların üretiminde toz metalurjisi esaslı üretim yöntemlerini tercih etmektedir. Bu

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

To cite this article: Y. Akyıldız, S. Sarı, O.F. Kaya, R. Ymanoğlu, Ultrasonik Atomizasyon: Toz Üretiminde Alternatif Bir Yol, Manufacturing Technologies and Applications, 4(2), 81-91, 2023.

<https://doi.org/10.52795/mateca.1290558>, This paper is licensed under a CC BY-NC 4.0

yöntemler yüksek kaliteli parçaların net şekilli olarak üretilmesine olanak tanır [1, 2]. Döküm, dövme ve plastik şekil verme gibi üretim yöntemlerine göre üstün malzeme özellikleri, daha az ikincil işlemlere olan ihtiyaç gibi sağladığı avantajlarından dolayı birçok farklı toz metalurjik proses geliştirilmiş ve hala geliştirilmeye devam etmektedir. Toz metalurjik üretim yöntemi için başlangıç hammaddesi olan tozun farklı özelliklere sahip olması istenmektedir. Bu özelliklerin başında partikül şekli, boyutu, boyut dağılımı ve tozun saflığı gelmektedir [3].

Toz metalurjisi proseslerinde konvansiyonel olarak temelde presleme ve sinterleme alt yapısındaki sistemler kullanılsa da güncel teknolojiler ile geline son noktada eklemeli imalat prosesleri yaygınlaşmaktadır. Tüm bu toz metalurjik proseslerin hammaddesi olan metal tozu, nihai üründe istenilen fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerin yanı sıra boyut ve tolerans değerlerini ve en önemlisi maliyeti belirlediğinden, seçilecek hammaddenin özellikleri nihai ürün kalitesini doğrudan etkilemektedir [4-6].

Farklı toz özelliklerine yönelik değişen toz üretim teknikleri mevcuttur. Mekanik, kimyasal ve atomizasyon yöntemleri toz üretiminde kullanılan yöntemlere örnek olarak verilebilir. Üretim yöntemine bağlı olarak, tozun sahip olduğu fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler, nihai parçada elde edilecek özellikleri doğrudan etkilemektedir [4, 7]. Nihai parçada elde edilecek özelliklerin kontrol altına alınması için başlangıç hammaddesi olan tozun; homojenliği, kimyasal kompozisyonu, empürite varlığı, partikül morfolojisi, boyut dağılımı, akışkanlığı gibi parametrelerin kontrol edilmesi önem arz etmektedir [8-12]. Atomizasyon ile toz üretim yöntemi; seri üretime uygunluğu, yüksek kalitede metal tozu eldesi ve düşük maliyetli üretime olanak sağlaması ile dikkat çekmektedir. Bu yöntem ile demir-çelik, süper alaşım, titanyum, bakır, alüminyum alaşımları gibi farklı metal ve alaşımları üretilebilmektedir. Özellikle eklemeli imalat prosesleri için gerekli olan toz talebinin karşılanabilmesi ve istenilen özelliklerde üretilebilmesi için genellikle atomizasyon yöntemleri kullanılmaktadır [13-15].

Günümüz mühendislik bileşenlerinin üretiminde eklemeli imalat yöntemlerinin kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Farklı eklemeli imalat yöntemleri üretim prosesinin tarzına göre değişik özelliklerde hammadde gerektirir. Sıkça kullanılan eklemeli imalat yöntemlerine; SLE (Seçici Lazer Ergitme), EIE (Elektron Işın Ergitme), Seçici Lazer Sinterleme (SLS) ve Direkt Metal Lazer Sinterleme (DMLS) örnek verilebilir [16, 17]. Bu üretim yöntemlerinde kullanılan tozlar genel anlamda atomizasyon yöntemleriyle üretilmektedir. Gaz atomizasyonu yöntemi ise bu açıdan diğer yöntemler arasında (su atomizasyon, plazma atomizasyon, santrifüj atomizasyon) en sık tercih edilenidir [18-20].

Partikül boyutu ve küreselliği, eklemeli imalat proseslerinde kullanılacak toz için kısıtlayıcı ve maliyet belirleyici faktörlerdir. Bunların yanı sıra atomizasyon proseslerinde, başlangıç hammaddesinin ne kadarının istenilen özellikleri sağlayacak toza dönüştürülebileceği hem üretilen tozun hem de nihai ürün fiyatını doğrudan etkilemektedir. Tüm faktörler göz önüne alındığında, atomizasyon prosesleriyle üretilecek tozun, yüksek kalitede ve uygun maliyetli olarak temin edilmesi istenir. [21-25].

Atomizasyon prosesleri genel anlamda ergitilmiş metalin önceden belirlenmiş bir sıvı veya gaz yardımıyla değişen boyutlarda damlacıklara ayrılması ve bu ayrılan damlacıkların inert gaz veya normal atmosfer koşullarında katılaştırılması prensibine dayanmaktadır. Ergimiş metal partikülleri, ani soğuma ve inert gaz atmosferinin sağladığı ısı absorpsiyon etkisiyle yüksek soğuma hızlarında küreselleşerek katılırlar. Bu nedenle, ergimiş metalin sıcaklığı, atomizasyon atmosferi, yüzey gerilimini sağlayacak atomizasyon türü gibi parametreler, elde edilecek tozun fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerini belirlemektedir [26-28]. Atomizasyon prosesleri kendi içinde konvansiyonel olarak; gaz, su, santrifüj ve plazma metotlarına ayrılmaktadır. Bu yöntemlere bağlı olarak elde edilecek tozun partikül boyut dağılımı, morfolojisi, yoğunluğu, akışkanlığı, üretim miktarı vb. özellikler değişiklik göstermektedir [29-31]. Farklı üretim yöntemleriyle üretilen bu tozların özellikleri, son ürün teminiyle toplam verimi doğrudan etkileyerek nihai ürünün maliyetini belirlemektedir. Geliştirilmiş farklı atomizasyon prosesleriyle özellikle eklemeli imalat teknolojisinde kullanılmak üzere uygun metal tozları üretimi yaygınlaşmıştır. Ancak, maliyet ve istenilen toz kalitesi dikkate alındığında, konvansiyonel prosesler yüksek verimde nihai ürüne

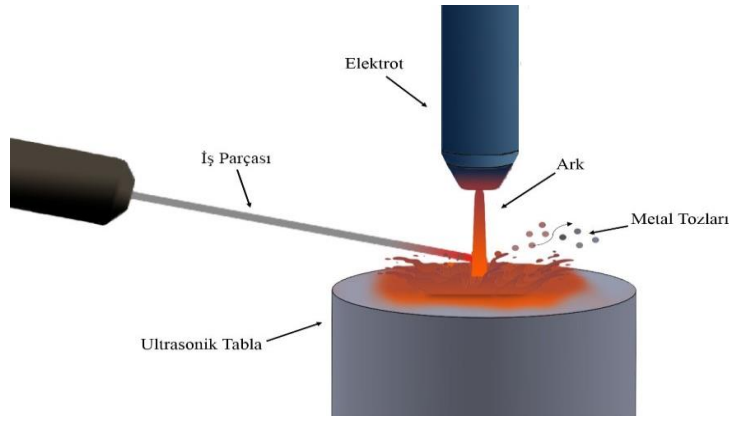
ulaşmak için gerekli yeterliliği sağlayamamaktadır. Özellikle eklemeli imalat alanında yüksek küresellik ve buna bağlı olarak akışkanlığa ihtiyaç duyulması durumunda, gaz atomizasyon yöntemlerinde de maliyetler artmaktadır. Buradan yola çıkarak, sektörel açıdan oluşan bu ihtiyacı ultrasonik atomizasyon yöntemiyle karşılama potansiyeli son yıllarda dikkat çeker hale gelmiştir [31-34].

Yüksek kalitede toz üretimini sağlayan ultrasonik atomizasyon, gaz atomizasyon toz üretim yöntemine göre partikül boyut dağılımı ve morfolojisinde istenilen kaliteye daha uygun ve düşük maliyetle toz eldesini sağlamaktadır. Gaz atomizasyon yöntemiyle 15-300 µm, ultrasonik atomizasyon yöntemiyle ise 15-150 µm partikül boyut dağılımına sahip toz üretimi mümkündür [35, 36]. Ultrasonik atomizasyon yöntemi, şarj edilen malzemenin alın yüzeyinin elektrik arkı ile ergitilmesi ve ergiyen metalin ultrasonik tabla üzerine düşmesiyle belirli frekans değerlerinde ultrasonik dalgalarının sağladığı titreşim hareketine maruz bırakılarak katılaşması prensibine dayanmaktadır. Daha önce yapılan çalışmalarda, ultrasonik atomizasyon için çalışma sıcaklığı bir kısıt olarak kaldığından, nispeten daha düşük ergime sıcaklıklarına sahip Al, Pb ve Au gibi metallerin alaşımlarında uygulamalar yapılmıştır [37, 38]. Gelişen teknoloji, ultrasonik atomizasyon ile çalışan proseslerin gelişmesine de katkı sağlayarak daha yüksek ergime sıcaklıklarına sahip metal ve alaşım tozlarının üretilebilmesine imkân sunmuştur [37-39]. Bu çalışmada toz metalurjisi alanında yapılan çalışmalar sonucunda, özellikle eklemeli imalat alanında ihtiyaç duyulan miktar ve kalitede toz üretiminin yapılabilmesine olanak sağlayan ultrasonik atomizasyon metodu ele alınmıştır. Ultrasonik atomizasyon yöntemi diğer atomizasyon yöntemleriyle karşılaştırmalı olarak incelenerek Türkçe literatüre katkı sağlanması amaçlanmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Ultrasonik Atomizasyon Prosesinin Tanımlanması (Description of The Ultrasonic Atomization Process)

Ultrasonik atomizasyon prosesi genel anlamıyla elektrik ark kullanılarak metal malzemenin ergitilmesi ve ergitilmiş metalin belirli frekans değerlerinde ultrasonik titreşime maruz bırakılarak katılaşmasıdır. Uygulanan frekans değerlerinde yapılabilen değişiklikler sayesinde diğer atomizasyon yöntemlerinden farklı özelliklere sahip metal tozları elde edilebilmektedir [40]. Şekil 1'de ultrasonik atomizasyon yönteminin şematik gösterimi verilmiştir. Atomizasyon prosesinde çubuk veya tel formunda olabilen tozu üretilecek malzeme, sistem içerisine beslenmektedir. İş parçası, ultrasonik tabla ve elektrot arasında konumlandırılarak elektrotta ark vasıtasıyla oluşan yüksek ısı sayesinde ergitme oluşturulur ve ultrasonik tabla üzerine düşürülür. Ultrasonik tablada oluşturulan frekans, ergimiş metale titreşim hareketleri olarak aktararak yüzey gerilimi ve viskozite etkisiyle ergimiş metalin damlacıklar halinde saçılmasını sağlar. Ultrasonik tablada üretilen dalgaların frekansı ile oluşacak tozun partikül boyutu arasında ters bir orantı bulunmaktadır. Ultrasonik tablanın titreşmesi ile mikron boyutunda damlacıklara dönüşen sıvı metal, inert gaz atmosferinde soğutulup morfolojik açıdan yüksek küreselliğe sahip partiküllere dönüşür [41].



Şekil 1. Ultrasonik atomizasyon şematik gösterimi (Schematic representation of ultrasonic atomization)

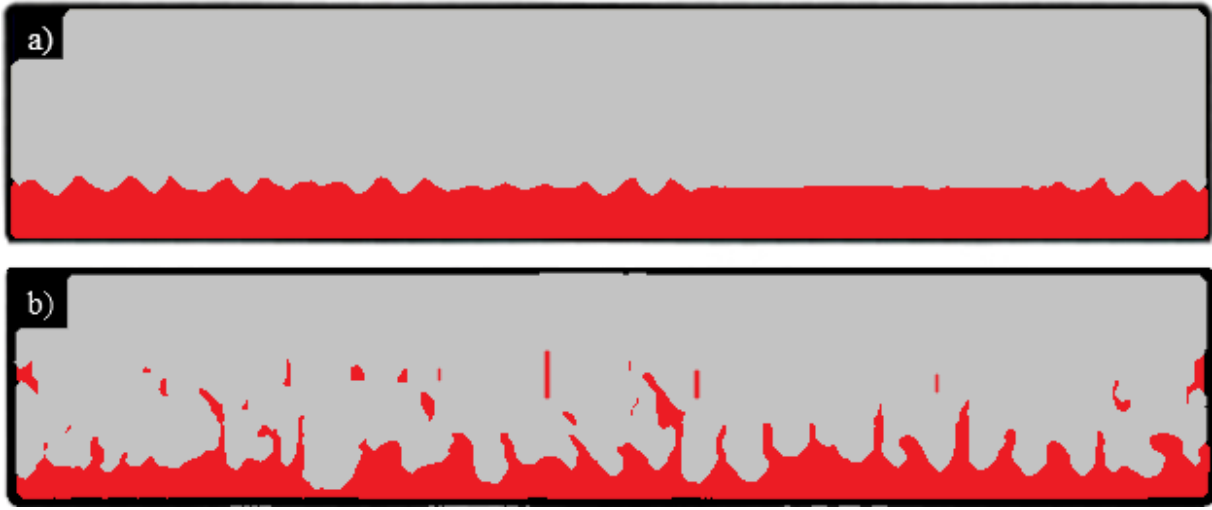
2.2. Ultrasonik Atomizasyon Prosesinde Toz Boyutunu Etkileyen Parametreler (Parameters Affecting Powder Size in Ultrasonic Atomization Process)

Ultrasonik atomizasyon yöntemi ile üretilen tozun boyutu, çeşitli proses parametrelerine bağlı olarak kontrol altına alınabilmektedir. Ortalama toz partikül boyutu; ultrason dalgasına ait frekans, ergiyik metalin yüzey gerilimi ve yoğunluk değerlerine göre belirlenmektedir. Tüm bu parametrelerin nihai toz boyutuna etkisinin incelenmesi için Lang eşitliği kullanılmaktadır [42]. Lang Eşitliği Formül 1’de verilmiştir.

$$d=a*\left(\frac{8\pi\sigma}{\rho f^2}\right) \quad (1)$$

Formül 1’de verilen Lang eşitliğindeki parametreler; d atomize edilmiş tozun ortalama partikül çapını, σ ergiyik metalin yüzey gerilimini, ρ ergiyik metalin yoğunluğunu, a prosese bağlı bir sabit katsayıyı ve f ergiyik metale aktarılan ultrasonik dalgaların frekansını göstermektedir. Yoğunluk ve yüzey gerilimi, ergiyik metalin sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. Buna bağlı olarak ergiyik metalin sıcaklığı da proses boyunca belirleyici bir parametre olduğu unutulmamalıdır. Ayrıca yüzey gerilimi ve yoğunluk özellikleri ile alaşımın kimyasal kompozisyon oranı, değişen parametreler ve malzemenin kendine has özellikleri ultrasonik atomizasyon yöntemi ile üretilen tozun boyutunu doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, ilgili parametrelerin optimizasyonunun doğru yapılmaması istenmeyen boyutta ve özelliklerde toz oluşumuna sebep olacaktır [43, 44]. Alaşımların kimyasal kompozisyonlarındaki değişime bağlı olarak ayrıca hesaplanması gereken bu malzeme özellikleri, Hesaplamalı Malzeme Mühendisliği (HMM) yardımıyla sayısal modelleme ortamında güvenilir termodinamik veriler ile hesaplanabilmektedir [45-48]. HMM ile alaşım ve kimyasal kompozisyon oranına göre güvenilir olarak hesaplanan yüzey gerilimi ve viskozite değeri, ultrasonik tablada oluşturulacak dalga frekansının doğrudan belirlenmesi ve buna bağlı tozların nihai özelliklerinin öngörülerek prosesin istenilen doğrultuda gerçekleştirilip sonuçlanmasına olanak sağlamaktadır [49].

Ergiyik metal ultrasonik dalgalar ile temasa geçtiğinde, metal yüzeyinde kapiler dalgalar oluşmaktadır. Şekil 2’de ultrasonik tabla üzerindeki ergiyik metalin maruz kaldığı kapiler dalgaların, farklı frekans değerlerinin etkisiyle nasıl değiştiği şematik olarak gösterilmiştir. Buradan yola çıkarak atomizasyon sırasında artan dalga frekansı, ergiyik metalden daha küçük boyutlu ergiyik metal partikülleri saçılmasına ve bu partiküllerin soğuyup katılaşmasıyla daha küçük partikül boyut dağılımına sahip toz üretimi olabileceği görülmektedir. Daha küçük toz boyutları daha yüksek yüzey alanına sahip olduğundan daha fazla reaktivite gösterme potansiyeline sahip olacaklardır. Öte yandan, daha küçük toz boyutları daha homojen dağılım ve daha yüksek kalite sağlama potansiyeline sahiptirler. Ancak, dalga frekansının artması, sıvının veya malzemenin atomizasyon enerjisinin artmasına, dolayısıyla daha yüksek maliyetlere neden olabilir. Bu nedenle, dalga frekansının doğru seçimi, toz boyutunun yanı sıra maliyet ve kalite gibi faktörlere göre yapılmalıdır [50, 51].



Şekil 2.Kapiler dalgaların şematik gösterimi a) düşük vibrasyon ve b) yüksek vibrasyon (Schematic representation of capillary waves a) low vibration and b) high vibration)

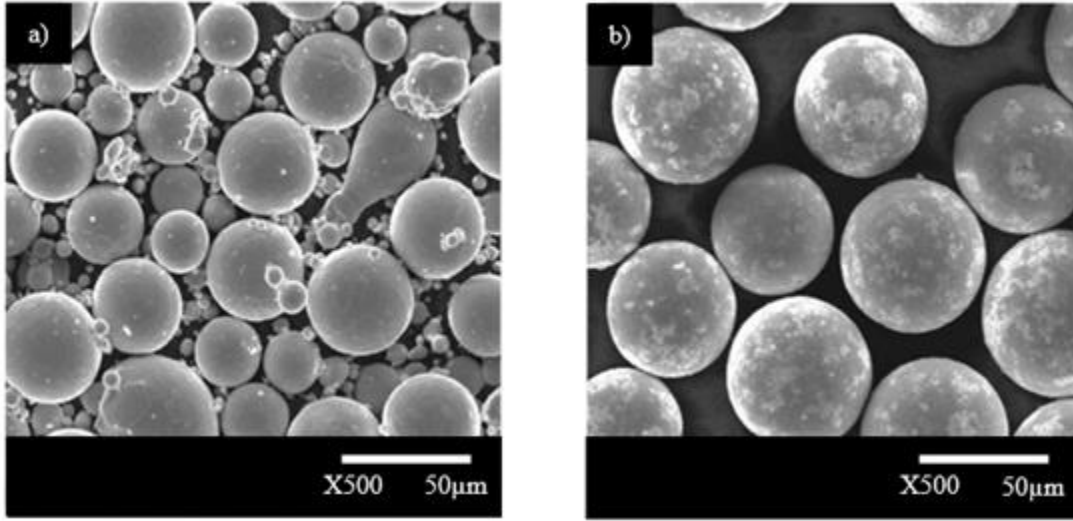
3. DENEY VE OPTİMİZASYON SONUÇLARI (TEST AND OPTIMIZATION RESULTS)

3.1 Ultrasonik ve Gaz Atomizasyon Yöntemlerinin Karşılaştırılması (Comparing The Ultrasonic Atomization and Gas Atomization Methods)

İki farklı atomizasyon prosesi sonucu elde edilecek olan toz özellikleri birbirinden farklı olmaktadır. Her iki atomizasyon yöntemi ile üretilen tozların öncelikli karşılaştırılabilecek özelliklerinden birisi partikül boyut dağılımıdır. Şekil 3'te hem ultrasonik hem de gaz atomizasyonu ile üretilen Ti6Al4V tozunun SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde ultrasonik atomizasyon sonucu elde edilmiş olan tozların daha dar partikül boyut dağılımına sahip oldukları gözlemlenirken gaz atomizasyonunda ise bu durum tam tersidir. Partikül boyut dağılımının geniş olması presleme ve sinterleme proseslerinde daha yüksek sıkı paketlenme yoğunluğu sunarken, eklemeli imalat proseslerinde içyapıda çeşitli bölgelerde topaklaşma, birleşmeme ve yapı içinde porozitelere neden olabilmektedir. Eklemeli imalat prosesleri için gerekli düşük miktarlı tozların üretilmesi, yüksek tonajlı kapasiteye sahip olan gaz atomizasyonu yöntemi kullanılarak tozların eldesinin yüksek maliyetlerine göre avantaj sunmaktadır [52-55]. Şekil 3a'da verilen gaz atomizasyonu ile üretilen Ti6Al4V tozuna ait SEM görüntüsünde uydu oluşumları görülmektedir. Bu uydulu yapı, eklemeli imalat prosesinde akışı ve buna bağlı olarak prosesi olumsuz yönde etkilemektedir. Ultrasonik atomizasyon yöntemi ile üretilen ve Şekil 3b'de verilen SEM görüntüsünde ise, oluşan partiküller tamamen küresel olup akışı etkileyecek herhangi bir uydu oluşumu da söz konusu değildir. Tüm bu sebeplerden dolayı, eklemeli imalat proseslerinde ve yeni alaşım geliştirme çalışmalarında ultrasonik atomizasyon yöntemiyle üretilen tozların kullanılmasının, proses uygunluğu, istenilen mikro yapı ve mekanik özellikleri elde etmekte avantaj sağlayabileceği görülmektedir [56-58].

Tablo 1'de ultrasonik ve gaz atomizasyonu teknikleri ile üretilen östenitik paslanmaz çelik 316L ve Ti6Al4V tozlarının fiziksel özelliklerinin karşılaştırması yapılmıştır. Tozların küresellik değeri, ideal küre yapısı ile orantılandığında 0 ile 1 arasında bir değer almaktadır. Bu değer 1'e yaklaştıkça ideal küreye daha yakın bir morfolojide toza sahip olduğu anlaşılmaktadır. Her iki yöntem ile üretilen tozların küresellik değeri incelendiğinde, ultrasonik atomizasyon yöntemi ile üretilen tozların morfolojisinin gaz atomizasyon ile üretilen tozlara göre daha iyi olduğu görülmektedir. Küresellik özelliğine bağlı olarak akışkanlık özelliği de doğru orantıyla gelişmektedir [59, 60]. Yüksek küreselliğe sahip olan ultrasonik atomizasyon ile üretilen tozların akışkanlık özelliği gaz atomizasyon yöntemi ile üretilen tozlara göre daha yüksektir. Akışkanlık özelliğini ayrıca katılaşmadaki uydu oluşumu da etkilemektedir. Şekil 3'te her iki atomizasyon yöntemi ile üretilen

Ti6Al4V tozundan anlaşılacağı gibi uydu oluşumu, tozun akışını engelleyerek proses uygunluğunu azaltmaktadır [61].



Şekil 3. Ti6Al4V alaşımına ait farklı yöntemler ile üretilen tozların SEM mikroyapı görselleri; Gaz atomizasyonu, b) Ultrasonik atomizasyonu (SEM microstructure images of powders produced by different methods of Ti6Al4V alloy; a) Gas atomization, b) Ultrasonic atomization) [59].

Tablo 1. Ultrasonik ve gaz atomizasyonu ile üretilen tozlarının özelliklerinin karşılaştırılması (Comparison of the properties of powders produced by ultrasonic and gas atomization) [51].

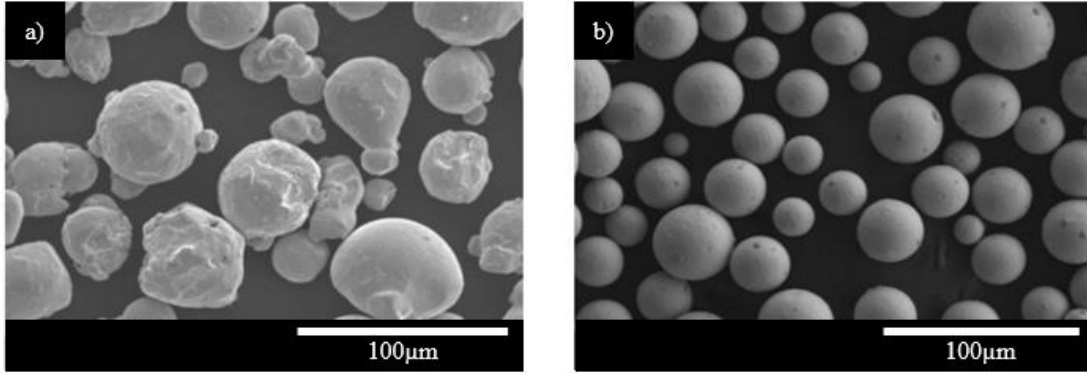
Atomizasyon Metodu	Gaz (EIGA)	Ultrasonik (35kHz)	Gaz (EIGA)	Ultrasonik (35kHz)
Alaşım	AISI 316L		Ti6Al4V	
D10 [μm]	27.3	40.9	29.0	45.4
D50 [μm]	45.8	49.7	47.3	55.0
D90 [μm]	73.1	58.2	77.8	62.4
Küresellik	0.75	0.89	0.76	0.90
Tap Yoğunluğu (g/cm^3)	4.67	4.72	2.6	2.86
Görünür Yoğunluk (g/cm^3)	4.29	4.40	2.4	2.62
Akışkanlık (s/50 g)	18.7	14.8	40.8	26.43

3.2 Ultrasonik Atomizasyon ile Üretilen Tozların Eklemeli İmalat Proseslerine Sağladığı Avantajlar (Advantages of Powders Produced by Ultrasonic Atomization to Additive Manufacturing Processes)

Ultrasonik atomizasyon ile elde edilecek ve geliştirilecek yeni alaşımların kullanılacağı en önemli alan şüphesiz ki eklemeli imalat yöntemleridir. Her geçen gün gelişmekte olan yeni mühendislik teknolojileri ile mühendislik bileşenlerinden beklenen servis özellikleri değişmekte ve kullanıcıların üründen beklentileri yükselmektedir. Buna bağlı olarak, Hesaplamalı Malzeme Mühendisliği'nin sağlamış olduğu güvenilir termodinamik ve termokinetik veriler ile yeni alaşımlar ve bu alaşımların proses parametreleri ile gereken veriler sayısal ortamda hesaplanabilmektedir [62, 63]. Birçok yeni alaşımın geliştirilmesi sürecinde prototip üretimlerin yapılması elzem olup, Ar-Ge, Ür-Ge çalışmaları ve seri üretim gibi farklı proses basamakları eklemeli imalat teknolojileri kullanılarak yapılabilmektedir. Nihai üründe istenilen kalite düzeyine ulaşılabilmesi adına, kullanılacak olan metal tozları belirli bir geometriye ve fiziksel özelliklere sahip olmalıdır. Bu özellikler, nihai ürüne ulaşmadan önce üretim yönteminin gerekliliklerine göre belirlenmelidir.

Bunun anlamı, eklemeli imalatta kullanılacak olan metal tozlarının eklemeli imalat proseslerindeki tüm proses parametrelerine uygunluğun göz önünde bulundurulması gerektiğidir [64-66].

Bu kapsamda sinterleme bazlı üretim yöntemleri olan toz yataklı sinterleme yöntemleri (Seçici Lazer Sinterleme, Direkt Metal Lazer Sinterleme) ele alındığında, toz morfolojisi ve tozun boyutu proses uygunluğu için en önemli parametrelerdir. Sinterlemede maksimum proses veriminin alınabilmesi için metal tozlarının yüksek küreselliğe ve ince boyutlara sahip olması gerekmektedir. Tozların sahip olduğu küreselliğin derecesi, proses uygunluğunu yani parça üretim hızı ve süresiyle oluşacak maliyeti belirlemektedir. Aynı zamanda sinterleme için gerekli olan itici güç daha düşük partikül boyutlarında maksimum olmaktadır [67, 68]. Bu kapsamda, ultrasonik atomizasyon yönteminde uygulanacak frekans değeri ile tozların boyutu belirlenirken katılma yaklaşımı ile uydu ve morfolojik özellikleriyle tozun akış karakteristiği iyileştirilebilmektedir. Şekil 4'te, ultrasonik ve gaz atomizasyonu ile üretilen AISI 304 paslanmaz çeliği tozunun SEM görüntüleri verilmiştir. Gaz atomizasyonu ile üretilen tozların küresellik oranının ultrasonik atomizasyon yöntemi ile üretilen tozlara göre daha düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca katılma yaklaşımları ile küreselliğe ek olarak uydu oluşumu da görülmekte olup, tozların akışını etkileyen diğer bir unsur olarak karşımıza çıkmaktadır. Her iki yöntem ile üretilen tozların boyutları sırasıyla gaz atomizasyonu için 40-55 µm, ultrasonik atomizasyonu için ise 15-30 µm arasındadır. Daha küçük boyutlu tozların kullanımı, eklemeli imalat yöntemleri için önem arz ederken, ultrasonik atomizasyon yöntemi ile üretilen tozların, gaz atomizasyonu ile elde edilenlere göre daha avantajlı olabileceği görülmektedir [69].



Şekil 4. AISI 304 paslanmaz çeliğine ait farklı yöntemler ile üretilen metal tozların SEM görüntüleri, a) Gaz atomizasyonu, b) Ultrasonik atomizasyon (SEM images of metal powders produced by different methods of AISI 304 stainless steel (Gas atomization, b) Ultrasonic atomization (SEM images of metal powders produced by different methods of AISI 304 stainless steel) a) Gas atomization, b) Ultrasonic atomization) [40].

Yüksek küreselliğe sahip tozların daha yüksek verim sağlamanın en önemli sebebi, tozun küreselliği ve porozite miktarı arasındaki ilişkidir. Tozun sahip olduğu ortalama küresellik değeri artarken, tozun ihtiva ettiği porozite miktarı azalmaktadır [70, 71]. Ayrıca, metal içinde bulunacak olan poroziteler ürün içinde çentik etkisi yaratacaktır. Bu sebeple eklemeli imalat süreci sonucu elde edilecek üründe yüksek mekanik özellikler istendiği şartlarda yüksek küreselliğe sahip tozların tercih edilmesi gerekmektedir. Sinterlemenin verimini arttıracak bir diğer faktör de partikül boyutudur. Partikül boyutunun azalması atomik mobilitiyi arttıracak aynı zamanda yüzey alanında da ters oranlı bir artışa sebebiyet vereceğinden sinterlemeyi tetikleyen itici güce de pozitif etkisi olacaktır [70, 72]. Ultrasonik atomizasyon süreci daha düşük sıcaklıklarda frekans değişimiyle daha küçük partikül boyutuna sahip tozlar elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Tüm bu sebeplerden dolayı, ultrasonik atomizasyon ile elde edilecek tozların sinterleme bazlı eklemeli imalat yöntemlerinde kullanılması, elde edilecek ürünün yüksek mekanik değerlere sahip olması açısından önem arz etmektedir. Ti6Al4V, Inconel süper alaşımları, yüksek entropi alaşımları ve daha birçok yeni nesil malzemeler ile üstün mekanik değerlere sahip mühendislik parçaları,

eklemeli imalat yöntemleriyle yüksek kalitede üretilmeye çalışılmaktadır. Bu ve diğer tüm mühendislik ürünlerinin eklemeli imalat ile üretimi için istenilen fiziksel ve geometrik özelliklere sahip toz üretimi, ultrasonik atomizasyon ile kolaylıkla üretilip kullanıma hazır hale getirilebilecektir.

4. SONUÇLAR (RESULTS)

Bu çalışmada toz metalurjisi alanında atomizasyon teknikleri için önemli bir alternatif yol olan ultrasonik atomizasyon yöntemi incelenmiştir. Literatür verileri ultrasonik atomizasyonun gaz atomizasyonu gibi yaygın tekniklere göre birçok avantajı olduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuçlar ultrasonik atomizasyonu ile elde edilen tozlarla üretilen malzemelerin daha yüksek mekanik özellik değerlerine sahip olabileceğini ortaya koymaktadır. Yapılan çalışma, Türkçe literatüre katkı sağlamaya yönelik olarak hazırlanmıştır. Elde edilen veriler kısaca aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Ultrasonik atomizasyon ergiyik metale gönderilen ultrasonik dalgaların frekans değerlerinin değiştirilmesiyle elde edilecek metal tozunun ortalama partikül boyunun belirlenebilmesine olanak sağlamaktadır.
- Lang eşitliği esas alındığında, sabit bir sıcaklık girdisi durumunda frekans değerinin artışı nihai tozun partikül boyutunun küçülmesi ile sonuçlanmaktadır.
- Ultrasonik atomizasyon tozları gaz atomizasyonu ile elde edilen tozlarla karşılaştırıldığında daha dar partikül boyut dağılımı aralığına sahip olmaktadır.
- Ultrasonik atomizasyon tekniği ile üretilen tozlar gaz atomizasyon tozlarına göre daha yüksek küresellik özelliğine sahiptir. Bu özellik tozların akışkanlık değerlerinde artışa sebep olmaktadır. Ayrıca tozların yüksek küresellikteki geometrileri ulaşabilecekleri en yüksek yüzey alanı değerlerine sahip olmalarına yol açmaktadır. Bu sayede tozların eklemeli imalat uygulamalarında daha iyi ısı absorpsiyonu sağlamasının yolunu açıp enerji kullanımındaki verimin yükselmesine olanak sağlayacaktır.
- Tap ve görünür yoğunluk karşılaştırmasında da ultrasonik atomizasyon tozlarının daha yüksek değerlere ulaşabildikleri bu sayede morfolojilerinde daha az miktarda poroziteye sahip oldukları görülmüş ve yapıdaki porozite miktarının azalması nihai ürünün mukavemet değerlerinde artışa yol açacağı sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. J. M. Torralba, Powder Metallurgy: A New Open Section in Metals, Metals, 11(10):1519, 2021.
2. P.C. Angelo, R. Subramanian, B. Ravisankar, Powder metallurgy: science, technology and applications, 2022
3. M. Powders, H. Flowmeter, F. Spectrometry, Standard guide for characterizing properties of metal powders used for additive manufacturing processes, ASTM Int: F-14. ASTM International, 2014.
4. A. Lawley, Preparation of metal powders, Annual Review of Materials Science, 8(1):49-71, 1978.
5. F.V. Lenel, G.S. Ansell, The State of the Science and Art of Powder Metallurgy, Journal of Metals, 34(2):17-29, 1982.
6. G.S. Upadhyaya, Powder metallurgy technology, Cambridge Int Science Publishing, 2002.
7. A.B. Spierings, N. Herres, G. Levy, Influence of the particle size distribution on surface quality and mechanical properties in AM steel parts, Rapid Prototyping Journal, 17(3):195-202, 2011.
8. P. Samal, J. Newkirk, Powder metallurgy methods and applications, ASM handbook of powder metallurgy, 2015.
9. I. Chang, Y. Zhao, Advances in powder metallurgy: properties, processing and applications, Elsevier, 2013.
10. M. Krantz, H. Zhang, J. Zhu, Characterization of powder flow: Static and dynamic testing, Powder Technology, 194(3): 239-245, 2009.

11. Ş. Karagöz, R. Yamaoğlu, Ş.H. Atapek, Metalik toz işleme teknolojisi ve proselme kademeleri açısından parametrik ilişkiler, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 22(3): 77-87, 2009.
12. G. S Upadhyaya, Powder Metallurgy Methods and Design, Vol.7. ASM Metals Handbook, 1997.
13. S.H. Saheb, V.K. Durgam, A. Chandrashekhar, A review on metal powders in additive manufacturing, AIP Publishing LLC. in AIP Conference Proceedings, 2020.
14. K.K., A. Perveen, Atomization processes of metal powders for 3D printing, Materials today: proceedings, 26:1727-1733, 2020.
15. F. Lemoisson, L. Froyen, Understanding and improving powder metallurgical processes, 2005.
16. A. Popovich, V. Sufiiarov, Metal powder additive manufacturing, in New trends in 3D printing, IntechOpen, 2016,
17. K.V. Wong, A. Hernandez, A review of additive manufacturing, International scholarly research notices, 2012.
18. J. Clayton, Optimising metal powders for additive manufacturing, Metal Powder Report, 69(5): 14-17, 2014.
19. Z. Snow, R. Martukanitz, S. Joshi, On the development of powder spreadability metrics and feedstock requirements for powder bed fusion additive manufacturing, Additive Manufacturing, 28:78-86, 2019.
20. A.B. Spierings, M. Voegtlin, T.U. Bauer, K. Wegener, Powder flowability characterisation methodology for powder-bed-based metal additive manufacturing, Progress in Additive Manufacturing, 1:9-20, 2016.
21. A.T. Sutton, C.S. Kriewall, M.C. Leu, J. William Newkirk, Powders for additive manufacturing processes: Characterization techniques and effects on part properties, in Proceedings of the 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, 2016.
22. J.A. Slotwinski, E.J. Garboczi, P.E. Stutzman, C.F. Ferraris, S.S. Watson, Max.A. Peltz, Characterization of metal powders used for additive manufacturing, Journal of research of the National Institute of Standards Technology, 119: 460, 2014.
23. S. Hoeges, A. Zwiren, C. Schade, Additive manufacturing using water atomized steel powders, Metal Powder Report, 72(2):111-117, 2017.
24. M.Z. Gao, B. Ludwig, T.A. Palmer, Impact of atomization gas on characteristics of austenitic stainless steel powder feedstocks for additive manufacturing, Powder Technology, 383:30-42, 2021.
25. A. Martín, C.M. Cepeda-Jiménez, M.T. Pérez-Prado, Gas atomization of γ -TiAl alloy powder for additive manufacturing, Advanced Engineering Materials, 22(1): 1900594, 2020.
26. A.J. Yule, J.J. Dunkley, Atomization of melts: for powder production and spray deposition, Oxford University Press, USA, 1994.
27. R.Boom, F.R. De Boer, Energy effects in bulk metals, in Encyclopedia of Materials: Science and Technology, Elsevier, 1-7, 2006.
28. J.J. Dunkley, Advances in atomisation techniques for the formation of metal powders, in Advances in Powder Metallurgy, Elsevier, 3-18 ,2013.
29. M. Entezarian, F. Allaire, P. Tsantrizos, R.A.L. Drew, Plasma atomization: A new process for the production of fine, spherical powders, Journal of Metals, 48:53-55, 1996.
30. A. Lawley, Atomization of specialty alloy powders, Journal of Metals, 33:13-18, 1981.
31. P. S., Z.Z. Fang, Y. Zhang ve Y. Xia, Review of the methods for production of spherical Ti and Ti alloy powder, Journal Of Metals, 69: 1853-1860, 2017.
32. L.V.M. Antony, R.G. Reddy, Processes for production of high-purity metal powders, Journal of Metals, 55: 14-18, 2003.
33. L.A. Dobrzański, L.B. Dobrzański, A.D. Dobrzańska-Danikiewicz, M. Kraszewska, Manufacturing powders of metals, their alloys and ceramics and the importance of conventional and additive technologies for products manufacturing in Industry 4.0 stage, Archives of Materials Science Engineering, 102(1), 2020.
34. I. Anderson, J. Rieken, J. Meyer, D. Byrd, A. Heidloff, visualization of atomization gas flow and melt break-up effects in response to nozzle design, Ames Lab., Ames, IA (United States), 2011.
35. D. Singh, S. Dangwal, Effects of process parameters on surface morphology of metal powders produced by free fall gas atomization, Journal of materials science, 41: 3853-3860, 2006.
36. K. Grzelak, M. Bielecki, J. Kluczyński, I. Szachogłuchowicz, L. Śnieżek, J. Torzewski, J. Łuszczek, Ł. Słoboda, M. Wachowski, Z. Komorek, A comparative study on laser powder bed fusion of differently atomized 316L stainless steel, Materials, 15(14): 4938, 2022.

37. R. Pohlman, K. Heisler, M. Cichos, Powdering aluminium and aluminium alloys by ultrasound, *Ultrasonics*, 12(1): 11-15, 1974.
38. A.J. Yule, Y. Al-Suleimani, On droplet formation from capillary waves on a vibrating surface, *Proceedings of the Royal Society of London, Series A: Mathematical, Physical Engineering Sciences*, 456(1997):1069-1085, 2000.
39. S.H. Alavi, S.P. Harimkar, Effect of vibration frequency and displacement on melt expulsion characteristics and geometric parameters for ultrasonic vibration-assisted laser drilling of steel, *Ultrasonics*, 94:305-313, 2019.
40. Ł. Źrodowski, R. Wróblewski, T. Choma, B. Morończyk, Ma. Ostrysz, M. Leonowicz, W. Łacisz, P. Błyskun, J.S. Wróbel, G. Cieślak, Novel cold crucible ultrasonic atomization powder production method for 3D printing, *Materials*, 14(10): 2541, 2021.
41. M. Bielecki, R. Ralowicz, L. Sloboda, Method and device for producing heavy metal powders by ultrasonic atomization, *Google Patents*, 2022.
42. R.J. Lang, Ultrasonic atomization of liquids, *The journal of the acoustical society of America*, 34(1): 6-8, 1962.
43. S. Wisutmethangoon, T. Plookphol, P. Sungkhaphaitoon, Production of SAC305 powder by ultrasonic atomization, *Powder Technology*, 209(1-3):105-111, 2011.
44. A. Endo, T. Asami, T. Ono, H. Miura, Particle size of non-contact atomization of low surface tension liquid by powerful aerial ultrasonic, in *2015 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, IEEE, 2015.
45. Y. Akyıldız, O. Öztürk, B. Simsar, Al-10Si-xMg Alaşımının CALPHAD Metodolojisi ile Termodinamik Karakterizasyonu, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 25(3): 699-704, 2021.
46. Y. Akyıldız, A. Akman, B. Horasan, R. Yamanoğlu, H. Aydın, Investigating the effect of quenching media and agitation conditions on the microstructure, hardness, and stress distribution of AISI 4140 steel by using FEM, *16. Mas International European Conference On Mathematics, Engineering, Natural and Medical Sciences*, 156-163, 2022.
47. Y. Akyıldız, Y. Arslan, H. Aydın, R. Yamanoğlu, Fe-Mn-C Çeliğinin Calphad Metodolojisi ile Hesaplanan Sinterleme Sıcaklığının Mekanik Özellikler Üzerine Etkisi, *16. Mas International European Conference On Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences*, 164-174, 2022.
48. R. Yamanoğlu, Y. Akyıldız, O. Öztürk, AlSi10Mg alaşımının toz metalurjisi ile üretimi: basınç destekli sinterleme ve calphad metodolojisi, *International Symposium of Scientific Research and Innovative Studies*, Bandırma Onyediy Eylül Üniversitesi, 2021.
49. K. Yasuda, H. Honma, Z. Xu, Y. Asakura, S. Koda, Ultrasonic atomization amount for different frequencies. *Japanese Journal of Applied Physics*, 50(7S):07HE23, 2011.
50. S.H. Alavi, S.P. Harimkar, Ultrasonic vibration-assisted laser atomization of stainless steel, *Powder Technology*, 321:89-93, 2017.
51. M. Bielecki, J. Kluczyński, Ł. Sloboda, Manufacturing of metallic powders for AM market by ultrasonic atomization method, *Proceedings of the Metal Additive Manufacturing Conference (MAMC 2021)*, Vienna, Austria, 2021.
52. X.G. Li, Q. Zhu, S. Shu, J.Z Fan, S.M. Zhang, Fine spherical powder production during gas atomization of pressurized melts through melt nozzles with a small inner diameter, *Powder Technology*, 356:759-768, 2019.
53. A.S. Jabur, Effect of powder metallurgy conditions on the properties of porous bronze, *Powder Technology*, 237:477-483, 2013.
54. B. Verlee, T. Dormal, J. Lecomte-Beckers, Density and porosity control of sintered 316L stainless steel parts produced by additive manufacturing, *Powder Metallurgy*, 55(4): 260-267, 2012.
55. A. Simchi, The role of particle size on the laser sintering of iron powder, *Metallurgical Materials Transactions B*, 35:937-948, 2004.
56. G. Rai, E. Lavernia, N.J., Grant, Powder size and distribution in ultrasonic gas atomization, *Journal of Metals*, 37(8): 22-26, 1985.
57. D. Božić, J.M. Stašić, V.M. Rajković, Microstructures and mechanical properties of ZA27-Al₂O₃ composites obtained by powder metallurgy process, *Science of Sintering*, 43(1):63-70, 2011
58. A. Strondl, O. Lyckfeldt, H. Brodin, U. Ackelid, Characterization and control of powder properties for additive manufacturing, *Journal of Metals*, 67:549-554, 2015.

59. B. Błażej, M. Bielecki, W. Gulbiński, Ł. Słoboda, R. Rałowicz, J. Rozpendowski, Ultrasonic and other atomization methods comparison in metal powder production, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineer*, 116:11-24, 2023.
60. N. Bekoz, E. Oktay, Effects of carbamide shape and content on processing and properties of steel foams, *Journal of Materials Processing Technology*, 212(10):2109-2116, 2012.
61. N. Bekoz, E. Oktay, High temperature mechanical properties of low alloy steel foams produced by powder metallurgy, *Materials Design*, 53:482-489, 2014.
62. T. Yağcı, Ü. Cöcen, O. Çulha, A. Korkmaz, Bütünleşik Hesaplamalı Malzeme Mühendisliğinin Alüminyum Jant Üretiminde Kullanılabilirliği, 4.Ulusal Üniversite-Sanayi İş birliği Ar-Ge ve İnovasyon Kongresi, 269-277, 2021.
63. K.G.F. Janssens, D. Raabe, E. Kozeschnik, M.A. Miodownik, B. Nestler, *Computational materials engineering: an introduction to microstructure evolution*, Academic Press, 2010.
64. T.J. Horn, O.L.A. Harrysson, Overview of current additive manufacturing technologies and selected applications, *Science progress*, 95(3):255-282, 2012.
65. S. Negi, S. Dhiman, R.K. Sharma, Basics, applications and future of additive manufacturing technologies: A review, *Journal of Manufacturing Technology Research*, 5(1/2):75, 2013.
66. B. Schoinochoritis, D. Chantzis, K. Salonitis, Simulation of metallic powder bed additive manufacturing processes with the finite element method: A critical review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 231(1):96-117, 2017.
67. J. Ma, L.C. Lim, Effect of particle size distribution on sintering of agglomerate-free submicron alumina powder compacts, *Journal of the European Ceramic Society*, 22(13): 2197-2208, 2002.
68. W.H. Rhodes, Agglomerate and particle size effects on sintering yttria-stabilized zirconia, *Journal of the American Ceramic Society*, 64(1):19-22, 1981.
69. Y. Zhao, Y. Cui, Y. Hasebe, H. Bian, K. Yamanaka, K. Aoyagi, T. Hagsawa, A. Chiba, Controlling factors determining flowability of powders for additive manufacturing: A combined experimental and simulation study, *Powder Technology*, 393:482-493, 2021.
70. N.B. Üllen, G. Karabulut, Gözenekli metalik malzeme üretiminde gözenek oranı ve küresellik arası ilişkinin incelenmesi,, 2nd International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology, 467-472, 2020.
71. Z. Zhang, X.X. Yao, P. Ge, Phase-field-model-based analysis of the effects of powder particle on porosities and densities in selective laser sintering additive manufacturing, *International Journal of Mechanical Sciences*, 166:105230, 2020.
72. G.E. Dieter, D. Bacon, *Mechanical metallurgy*, Vol. 3. McGraw-hill New York, 1976.

Eİ İçin Tasarlanan Kafes Yapıların Yapısal Davranışlarının İncelenmesi

Aysu Akbulut¹ , Neslihan Top¹ , Harun Gökçe^{1,*} 

¹Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Endüstriyel Tasarım Mühendisliği, Ankara, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 26.07.2023

Kabul: 22.08.2023

Anahtar Kelimeler:

Ekleme imalat

Kafes yapılar

3B baskı

3B Modelleme

ÖZET

Endüstriyel gelişmelerin ışığında, üretilen parçaların hafif, dayanıklı, fonksiyonel ve ergonomik gibi özelliklerindeki artan istekler, üretim teknolojilerinde ve tasarım yaklaşımlarında farklılaşma zorunluluğu oluşturmuştur. Ekleme imalat teknolojisi ve ekleme imalata uygun tasarım yaklaşımları, bu farklılığın önemli çıktıları olarak görülmektedir. Ekleme imalat teknolojileri bu gereklilikleri karşılamak için ideal bir seçenek olarak karşımızdadır. Bu çalışmada, ekleme imalata uygun tasarım yaklaşımlarından biri olan kafes hücre tasarım yaklaşımı ele alınmıştır. Cuboctahedron, octahedron ve rhombic dodecahedron kafes yapıları yapısal dayanım ve gözeneklilik özellikleri için sonlu elemanlar analiz metodu kullanılarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, cuboctahedron kafes yapısının diğer kafes yapılarına göre daha yüksek dayanım sağladığını göstermiştir.

Investigation of The Structural Behaviors of Lattices Designed for AM

ARTICLE INFORMATION

Received: 26.07.2023

Accepted: 22.08.2023

Keywords:

Additive manufacturing

Lattice structure

3D printing

3D modelling

ABSTRACT

In the light of industrial developments, the increasing demands for the light, durable, functional and ergonomic features of the produced parts have created a necessity for differentiation in manufacturing technologies and design methods. Additive manufacturing technology and design approaches suitable for additive manufacturing are seen as important outputs of this difference. Additive manufacturing technologies are an ideal option to meet these requirements. In this study, the cage cell design approach, which is one of the design approaches suitable for additive manufacturing, is discussed. Cuboctahedron, octahedron and rhombic dodecahedron lattice structures were investigated for structural strength and porosity properties using finite element analysis method. The results obtained showed that the cuboctahedron lattice structure provided higher strength than the others.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ekleme imalat (Eİ) yöntemi, son yıllarda ürün geliştirme süreçlerinde büyük bir ilgi görmüş ve önemli gelişmeler kaydetmiştir. Bu yöntem, birçok endüstride yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Otomotiv, havacılık, sağlık, mimarlık, moda ve oyuncak gibi birçok sektörde Eİ yönteminden faydalanılmaktadır. Özellikle, mevcut üretim süreçleri ile yüksek maliyet oluşturan müşteri talepleri, bu yöntem ile daha kolay ve düşük maliyetler ile üretilebilmektedir. Ürünlerin hafif, yüksek dayanımlı, hızlı üretilebilir, fonksiyonel, ergonomik olması gibi artan gereksinimleri Eİ için ideal bir koşul olarak ortaya çıkmıştır. Bununla beraber, Eİ; hızlı prototipleme, seri üretim, özelleştirilmiş üretim ve sürdürülebilir üretim gibi alanlarda da büyük bir potansiyele sunmaktadır ve gelecekte üretim teknolojileri alanında daha da önemli bir rol oynayacağı tahmin edilmektedir. Bu kabiliyetleri ile geleneksel imalat yöntemlerine göre avantajlıdır. Bugün özellikle, bilgisayar ortamında yapılan tasarımların hızlı bir şekilde fiziksel ürünlere dönüşmesini sağlaması ve karmaşık tasarımların üretimini kolaylaştırması ile öne çıkmaktadır [1-2].

*Sorumlu yazar, e-posta: harungokce@yahoo.ca

To cite this article: A. Akbulut, N. Top, H. Gökçe, Eİ İçin Tasarlanan Kafes Yapıların Yapısal Davranışlarının İncelenmesi, Manufacturing Technologies and Applications, 4(2), 92-100, 2023. <https://doi.org/10.52795/mateca.1332895>, This paper is licensed under a CC BY-NC 4.0

Geleneksel imalat yöntemlerinde parçaların üretimi genellikle karmaşık bir süreçtir. Bir parçanın üretimi genellikle malzemenin kesilmesi, delinmesi, şekillendirilmesi ve bir araya getirilmesi gibi bir dizi işlemi içerir. Bu yöntemlerle üretim süreci genellikle zaman alıcıdır ve tasarımın uygulanması için daha fazla işçilik gerekir. Ayrıca, tasarımda yapılan değişikliklerin uygulanması da zaman alıcı olabilir. Eİ yöntemi, bu süreci büyük ölçüde basitleştirir. Tasarım, dijital bir model olarak bilgisayar ortamında oluşturulur ve ardından 3B yazıcı gibi bir cihaza gönderilerek fiziksel bir nesneye dönüştürülür. Bu sayede tasarımın prototip üretimine veya seri üretime dönüştürülmesi çok daha hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilir [3]. Üretim yöntemlerinden kaynaklı sınırlandırılmış ve yüksek maliyetli olabilecek karmaşık geometriler, organik şekiller ve iç içe geçmiş yapılar, Eİ süreçleriyle daha düşük maliyetler ile üretilebilir olacaktır.

Ürün geliştirme sürecinde tasarım iterasyon sayılarının artması, bu süreçlerde yaşanan iyileştirme faaliyetleri, nihai tasarımın elde edilmesine kadar devam eder. Tekrarlanan tasarım yaklaşımı, tasarımda daha iyi sonuçlar elde etmeyi ve ürünün performansını optimize etmeyi mümkün kılar. Savunma ve havacılık endüstrisinde eklemeli imalat yöntemi kullanılması bu avantajları ispatlar niteliktedir. Bu yöntemle üretilen gözenekli iç yapılar ve optimize edilmiş geometriler, yüksek faydalı yük hedefleyen platformların ağırlığını azaltmakta, yakıt verimliliği artırmaktadır. Son yıllarda, avantajlarından dolayı en yaygın çalışılan konuların başında Eİ İçin Tasarım (DFAM) gelmektedir. Neslihan ve ark. DFAM kabiliyetlerini yapay kemik iskelesi inşasında kullanmışlardır. Çalışmada scutoid, düzgün yirmi yüzlü ve biyomimetik olmak üzere üç farklı hücresel birim tasarlanmıştır. Bu birimler, CT verileri ile elde edilen L4 kemiğinin tekrar tasarlanmasında kullanılmış ve kemik üzerine gelen yüklere göre dayanımları incelenmiştir [4]. Yavuz, kafes tasarımları üzerine yaptığı çalışmada, kemik gelişimine en uygun geometrinin yüzey tabanlı geometrilerden olan gyroid olduğunu ifade etmiştir. Humerus kemiğine uygulanacak sabitleme implantının gyroid kafes yapılı olarak tasarımını gerçekleştirmiş, Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) ile yük altında implantın ve kemiğin üzerine gelen gerilmeler elde edilmiştir. Bu sayede kafes yapının güvenilirliği analiz edilmiştir [5].

Kafes yapıların farklı disiplinlerde kullanımı konusunda geniş bir literatür mevcuttur. Araçların ön tekerlerinde kullanılan salıncak kollarının ağırlığını hafifletilmesi için yapılan çalışmada üç farklı kafes yapısı kullanılmıştır. Aslan'ın yaptığı çalışma, kafes yapıların statik yük koşulları referans alınarak gerçekleştirilmiştir. SEA yöntemleri ile kafes yapıların birbirlerine göre farkları ortaya konmuştur [6]. Wang ve ark., derecelendirilmiş kafes yapıların optimize edilmesi için yeni bir yapısal tasarım metodu önermiştir. Çalışma kapsamında hedeflenen stratejinin, homojen denklemlerin çözüm için hesaplama süresini önemli ölçüde azalttığı ve tasarım verimliliğini arttırdığı ifade edilmiştir [7]. Şükrü hazırladığı tez çalışmasında, Eİ ile üretilen katı ve gözenekli polimer köpük yapıların yapısal davranışlarını mekanik test yoluyla karşılaştırmıştır. Mikro gözenekli polimerik yapıların basılmasını sağlayan termoplastik poliüretan filamentlerin, darbe emici davranış elde etmede başarılı olduğunu göstermiştir [8]. Egan ve ark. sekiz farklı topolojiye sahip kafes yapının, kemik doku mühendisliği uygulamalarıyla ilgili özelliklerini değerlendirmek için bir hesaplama yaklaşımı geliştirmiştir. Özellikler arasında gözeneklilik, gözenek boyutu, yüzey-hacim oranı, elastik modül, kayma modülü ve geçirgenlik bulunmaktadır. Kafes topolojileri, kiriş tabanlı birim hücrelerin desenlenmesiyle oluşturulmuş ve kiriş çapı ve birim hücre uzunluğu için tasarım parametreleri belirlenmiştir. Her bir topoloji için SEA yapılmış ve elastik modül ve kayma modülünün gözeneklilikle nasıl değiştiğini, geçirgenliğin gözeneklilik üssü yüzey-hacim oranının karesiyle nasıl değiştiğini nicel olarak belirlemişlerdir [9]. Yeşiloğlu yaptığı çalışmada, PLA malzemedan üretilen farklı dolgu geometrisi ve yoğunluğa sahip parçaların mekanik özelliklerinin karşılaştırılması amaçlamıştır. Octet, gyroid ve cross kafes yapısına sahip birim geometriler 5x5x5 mm boyutlarında modellenmiştir. % 50, % 30 ve % 20 izafi yoğunluk değerinde deney numunelerini üretilmiştir. Bu parçaların mekanik davranışlarını araştırmak amacıyla çekme, basma ve darbe deneyleri yapılmış ve karşılaştırılan mekanik özellikler açısından en uygun birim hücre yapısı belirlenmiştir [10].

Bu çalışmada, octahedron ocret, rhombic dodecahedron ve cuboc tahedron kafes yapılarının dayanımlarının nümerik olarak belirlenmesi ve 3B yazıcı ile yazdırılması amaçlanmıştır. Yapılan

literatür taramasında, seçilen kafes modellerinin yapısal davranışlarının belirlenmesine dair yeterli düzeyde bilgi bulunamamıştır. Bu nedenle bu tasarımlar seçilmiş ve belirli bir yük altındaki yapısal dayanımları SEA yöntemi ile belirlenmiştir. Çalışmada ilk olarak, cuboctahedron, octahedron ve rhombic dodecahedron kafes yapıları birim hücre olarak modellenmiş ve hedeflenen boyutlarda doğrusal çoğaltılarak kübik yapısı elde edilmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında, SEA metodu ile yapısal dayanımları belirlenmiştir. Son aşamada ise, FDM metodu ile bu üç geometriden 3B baskı alınmış ve üretim uygunluğu belirlenmiştir.

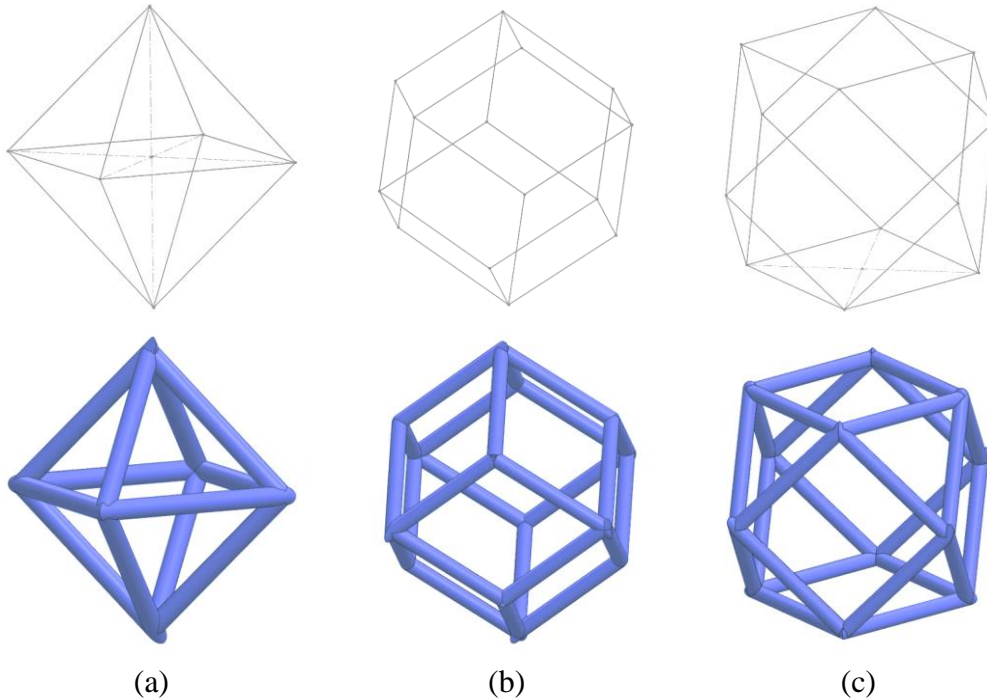
2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Çalışmanın ilk aşamasında, kafes yapı olarak belirlenen cuboctahedron, octahedron ve rhombic dodecahedron modellerinin 3B kübik tasarımları CAD ortamında hazırlanmıştır. Ardından, kafes tasarımlarına statik yük altında yapısal dayanımları SEA metotları ile elde edilmiştir. Son olarak Eİ ile üretim süreçleri gerçekleştirilmiştir. İşlem süreçleri aşağıda sırasıyla tanıtılmıştır.

2.1. Kafes Geometri Tasarımı (Lattice Geometry Design)

Kafes geometri çalışması için tel kafes ve katı modelleme metotları kullanılmıştır. Özellikle strut tipli kafes yapıların tel kafes olarak modellenmesi süreci hızlandırmaktadır. Yüzey tipli kafes yapılar yüzey modelleri ile modellenirken, eş kesitli yapılar (strut) tel kafes geometriler ile inşa edilir ve ardından birim hücrenin katı modeli elde edilir. Aşağıda üç kafes yapının tasarım süreci verilmiştir.

Octahedron, sekiz yüzlü olan çokyüzlüdür. En yaygın olarak dördü her tepe noktasında buluşan sekiz eşkenar üçgenden oluşan bir katıdır. Rhombic dodecahedron, 12 adet uyumlu eşkenar dörtgen yüzü olan dışbükey çok yüzlüdür. 24 kenarı ve 2 tip 14 köşesi vardır. Cuboctahedron, 8 üçgen ve 6 kare yüzü olan birçok yüzlüdür. Her bir bileşen 2 üçgen ve 2 kare ile 12 özdeş köşeye ve her biri bir üçgeni bir kareden ayıran 24 özdeş kenara sahiptir.

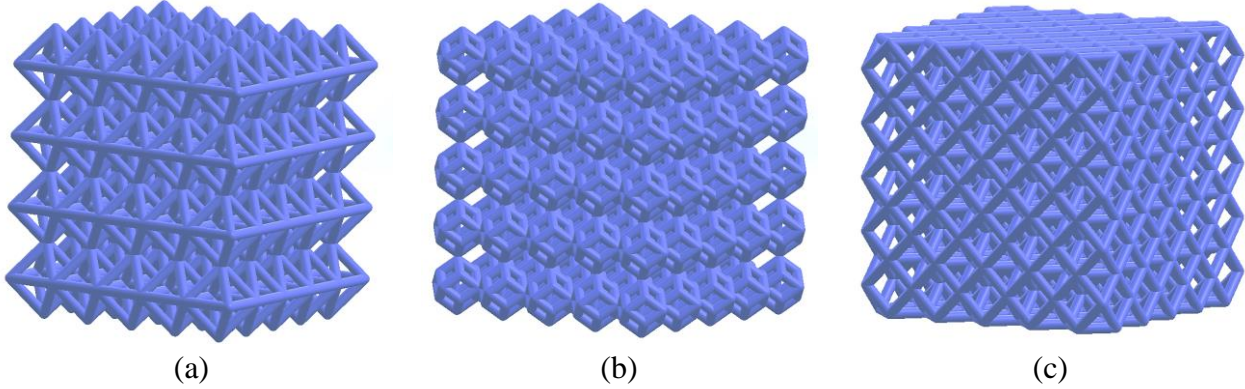


Şekil 1. a) Octahedron, b) rhombic dodecahedron ve c) cuboctahedron modellerinin 3B birim tasarımları (octahedron, rhombic dodecahedron and cuboctahedron 3D cell model)

Birim hücrelerin inşasında, elemanlar Şekil 1’de gösterildiği gibi tel kafes olarak modellenmiştir. Strut çapı olarak 3B yazıcıda kullanılan nozul çapı referans alınarak 0.4 mm dairesel kesit tel kafes yapı üzerinde süpürülmüştür. Bu sayede 3B birim katı geometriler elde edilmiştir. Birim

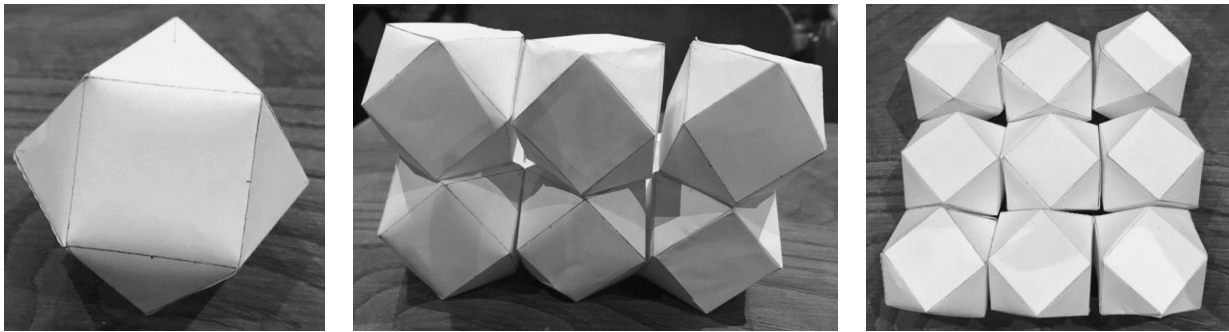
elemanların 10x10x10 mm küp oluşturması için aynı oranda çoğaltılması gerekmektedir. Şekil 2’de küp yapısı içerisinde çoğaltılmış geometriler verilmiştir. Kafes yapıların farklı geometrilerde olması küp olarak çoğaltılma yöntemlerinde farklılık olmasına neden olmaktadır.

Octahedron hücre modeli için düz kenarlarından birbirlerine temas edecek şekilde X ve Z eksenleri doğrultusunda 5 adet hücre birimi olacak şekilde, Y eksenine doğrultusunda ise 4 hücre birim yüksekliğinde olacak şekilde çoğaltılmıştır. Rhombic dodecahedron hücre modeli 4 adet eşkenar dörtgenin birleştiği köşe noktasından birbirlerine temas edecek şekilde X, Y ve Z eksenleri doğrultularında 5’er birim olacak şekilde çoğaltılmıştır. Son hücre modeli olan Cuboctahedron kare yüzeyleri birbirlerine temas edecek şekilde X, Y ve Z doğrultuları boyunca 5’er birim çoğaltılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda gösterilmiştir (Şekil 3).



Şekil 2. a) Octahedron, b) Rhombic dodecahedron ve c) Cuboctahedron modellerinin 3B kafes tasarımları (Octahedron, Rhombic dodecahedron and Cuboctahedron 3D lattice model)

Hücre modellerinin en ideal çoğaltım metodunun belirlenmesi için maket modellerden yararlanılmıştır. Karmaşık ve simetrik olmayan çokyüzlü kafes yapıların çoğaltılmasında zorluklar yaşanabilmektedir. Bu nedenle ideal çoğaltma yaklaşımlarının değerlendirilmesi uygun olacaktır. Bu çalışma kapsamında hücreler kâğıt maketlerden hazırlanmış ve çoğaltma tipleri belirlenmiştir. Aşağıda üç farklı kafes model için hazırlanan maketler verilmiştir (Şekil 3).

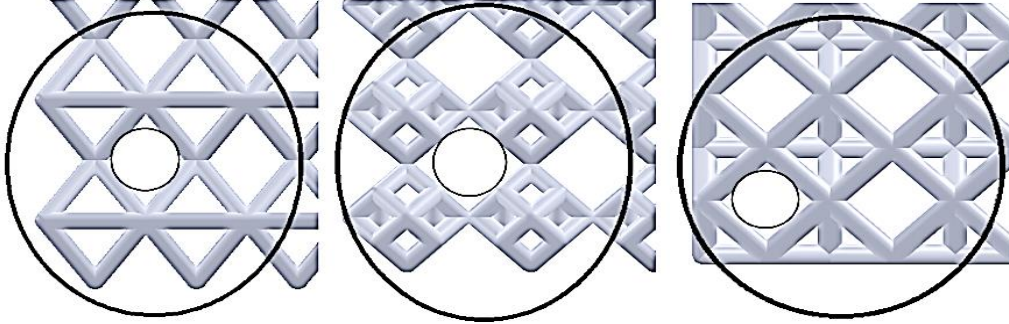


Şekil 3. Octahedron, rhombic dodecahedron ve cuboctahedron modellerin 3B maket modelleri (Octahedron, rhombic dodecahedron and cuboctahedron 3D mock-up)

2.2. Kafes Geometrilerin Gözenek Boyutları (Lattice Geometry Porosity Size)

Seçilmiş kafes yapılar bir araya getirilirken iç yapılarında bulunan boşlukların, yani gözeneklerin boyutları farklılıklar göstermektedir. Şekil 4’te octahedron, rhombic dodecahedron ve cuboctahedron hücre modellerinin gözenek boyutları verilmiştir. Octahedron kafes modelinin gözenek boyutu katı model üzerinden 6.14 mm olarak ölçülmüştür. Rhombic dodecahedron hücre modelinin gözenek boyutu 5.07 mm olarak ölçülmüştür. Cuboctahedron hücre modelinin gözenek boyutu ise 5.08 mm olarak elde edilmiştir.

Yapılan gözenek boyutu ölçümlerinde, katı modeller CATIA programında açılarak gözeneklere dik bakılacak şekilde düzlemler elde edilmiştir. Açılmış olan düzlemlerde en büyük gözeneklerin köşegenleri referans çizgileri ile birleştirilmiş ve orta noktasına daire çizilerek ölçüsü alınmıştır. Bu şekilde kullanılan üç farklı model için bu işlem tekrar edilerek bütün hücre modellerinin gözenek ölçümü yapılmıştır.



Şekil 4. Octahedron, rhombic dodecahedron ve cuboctahedron modellerin gözenek boyutları (octahedron, rhombic dodecahedron and cuboctahedron 3D model porosity size)

3. KAFES MODEL YAPISAL ANALİZLERİ (LATTICE MODEL STRUCTURE ANALYSIS)

Tasarımı yapılan octahedron, rhombic dodecahedron ve cuboctahedron modellerinin analizleri için Fusion 360 yazılımı kullanılmıştır. İlk olarak çoğaltılan hücre modellerinin taban ve tavanına 2 mm kalınlığında rijit plakalar yerleştirilmiştir. SEA, geometriyi sonlu sayıda elemanlara bölerek, sonsuz sayıdaki denklemler yerine sonlu sayıda denklemler çözerek geometri hakkında bilgi edinmemizi sağlayan bir yaklaşımdır. Tablo 1’de kullanılan analizde kullanılan 3B modelin çözüm ağına ait eleman ve düğüm sayısı hakkında bilgiler verilmiştir.

Tablo 1. Kafes geometri eleman sayısı ve düğüm sayısı (Lattice geometry number of mesh and number of nodes)

Geometri (10x10x10)	Düğüm Sayısı	Çözüm Ağı Sayısı
Octahedron ocret	600	1041
Rhombic dodecahedron	1625	3250
Cuboctahedron	1500	1800

Geometrilerin FEA için seçilen malzeme Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) plastik olarak belirlenmiştir. ABS plastiği asit ve bazlara karşı dayanıklı olduğu gibi elektriksel yalıtımı da iyidir. ABS plastik malzemesi, polibütadien içerisinde stiren akrilonitrilin polimerizasyonu ile elde edilen bir polimerdir. İçerdiği madde oranları % 20 akrilonitril, % 20 bütadien, % 60 stiren şeklinde oluşarak malzemenin karakteristiklerini meydana getirmektedir. Stiren maddesi plastiğe parlaklık sağlar ve yüzey kalitesini iyileştirir. -20° ve 60° derece sıcaklık aralığında kullanılabilir. Çevreye zararlı olmaması ve dayanıklı gövdeler kullanılan ürünlerde yer alması en önemli özelliklerindedir. Tablo 2’de yapısal analizde kullanılan ABS’nin elastisite modülü ve poisson oranı verilmiştir.

Tablo 2. FEA’da kullanılan ABS’nin mekanik özellikleri (ABS mechanical properties for FEA studies) [11]

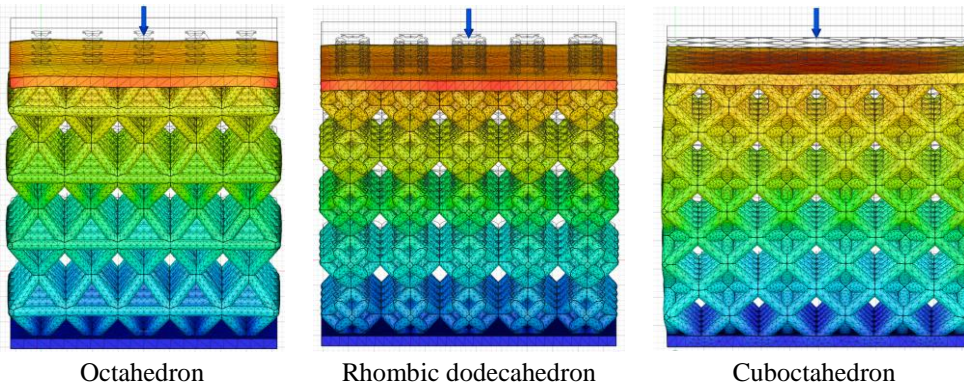
Malzeme	Young Modules (MPa)	Poisson Ratio (ν)
ABS Plastik	2240	0.38

Elastisite modülü, malzemenin lineer elastik davranışını ifade eder, yani gerilme miktarı doğru orantılı olarak arttıkça gerçekleşen deformasyon miktarı da artar. Farklı malzemeler farklı elastisite modüllerine sahiptir. Örneğin, çelik gibi sert malzemeler yüksek elastisite modülüne sahipken, kauçuk gibi esnek malzemelerin elastisitesi düşüktür. Poisson oranı ise, malzemenin elastik

davranışını tanımlayan bir malzeme özelliğidir. Poisson oranı, bir malzemenin uzunlamasına gerilirken enine yönde ne kadar sıkıştığını veya uzandığını gösterir. Poisson oranı negatif değerler arasında değişebilir. Negatif değerler, malzemenin uzunlamasına gerildiğinde enine yönde sıkışma eğilimi gösterdiğini ifade ederken, pozitif değerler ise malzemenin uzandığında enine yönde genişleme eğilimi gösterdiğini ifade eder. Örneğin, çoğu metal malzeme için Poisson oranı pozitif bir değere sahiptir, yani uzunlamasına gerilirken enine yönde genişler. Poisson oranı, malzeme mühendisliği ve yapısal analiz gibi alanlarda önemlidir. Malzemelerin elastik davranışının anlaşılması, tasarımların ve yapıların doğru şekilde analiz edilmesi için önemlidir. Poisson oranı, malzeme testleri veya malzeme özellik tabloları gibi kaynaklardan elde edilebilir. Çalışma kapsamında üç farklı geometri seçilerek hücresel birim tasarımları için tek bir malzeme ile yapısal analiz sonuçları değerlendirilmiştir.

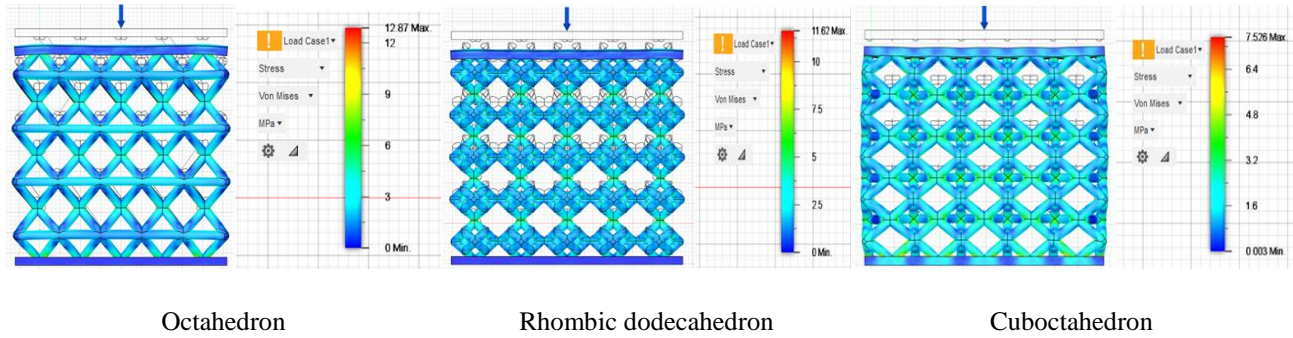
4. SONLU ELEMENLAR ANALİZ SONUÇLARI (FEA RESULTS)

Tasarımı yapılan octahedron, rhombic dodecahedron ve cuboctahedron modellerin SEA ile yapısal davranışları sonuçlarını elde etmek için Fusion 360 yazılımı kullanılmıştır. Çalışmada her üç model 2 mm rijit olarak tanımlanmış plaka arasında tutulmuş ve alt plaka her bölgeden serbestlik derecesi 0 olacak şekilde sabitlenmiştir. Plaka ve kafes arasındaki bağlantı tipi "bonded" olarak tanımlanmıştır. Üst plaka ve kafes geometri temas yüzeyleri için benzer bir tanımlama yapılmış ve 100N dağılımlı yük, üst plaka üzerine uygulanmıştır. Şekil 5'te SEA çalışmasında uygulanan sınır koşulları gösterilmiştir.



Şekil 5. SEA sınır koşulları genel görüntüsü (Overview of FEA boundary conditions)

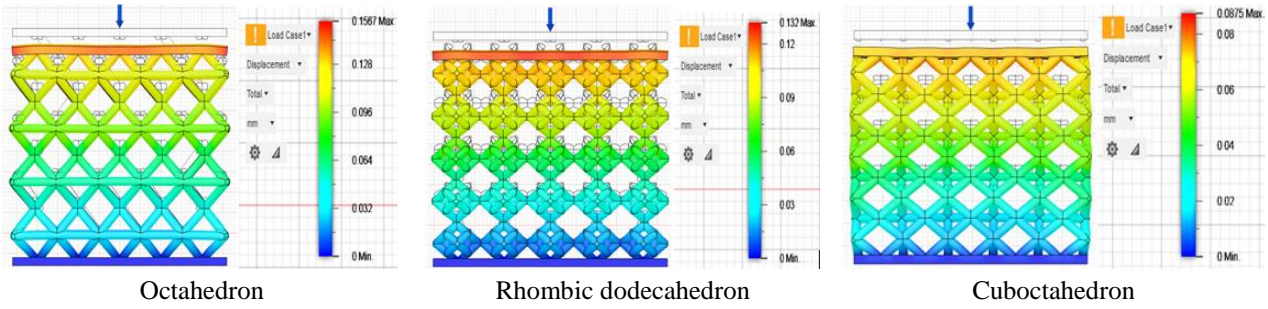
Oluşturulan çözüm ağında, eleman boyutu 0.2 mm ve geometrisi düzgün dörtyüzlü (tetrahedral) olarak belirlenmiştir. Tüm kafes modellerinde en küçük eleman boyutu % 50 oranında ayarlanmıştır. Bu oran analiz yapılan bilgisayarda daha kolay analiz alabilmek için yüksek tutulmamıştır. Yazılımın izin verdiği en kaba çözüm ağı ise % 10 olarak sınırlandırılmıştır.



Şekil 6. von Misses gerilme sonuçları (von Misses stress results)

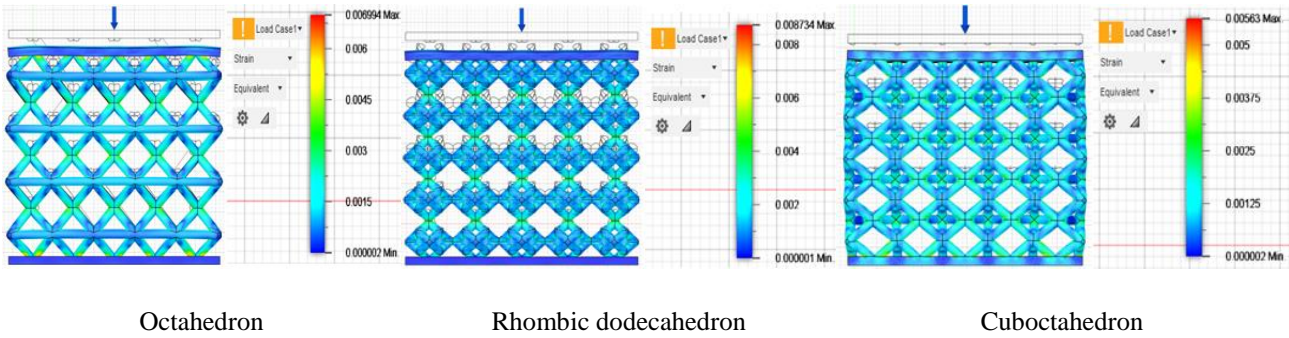
Von Misses gerilimi, gerilim limitine eşit olduğunda esnek malzemenin şekil değişikliğine uğrayıp uğramadığını belirlemek amacıyla yapılan bir yapısal analiz türüdür. Kullanılan octahedron,

rhombic dodecahedron ve cuboctahedron geometrilerinin von Mises gerilim analizi Şekil 6'da görülmektedir. Yer değiştirme değerleri ise, nesnenin bir referans sistemine göre hareket ettiğinde o nesnenin konumunda meydana gelen değişikliklerdir. Belirli bir kuvvet altında üç farklı geometrinin yer değiştirme dağılımları Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. Yer değiştirme sonuçları (Displacement results)

Kalıntı gerilmeler, yük altında bulunan bir malzemenin, yük uygulamadan önceki durumu ile kıyaslandığında ne oranda değişim gösterdiğini ifade eden bir yapısal analiz çeşididir. Gerilmeler, malzemenin yüzeyine uygulanan mekanik kuvvetlerin veya sıcaklık değişimlerinin etkisiyle oluşur ancak bu etkiler kaldırıldıktan sonra dahi malzeme üzerinde bir miktar gerilme kalır. Özellikle malzemenin plastik deformasyona uğraması, kaynak işlemleri, yüzey işlemleri, soğuma işlemleri gibi faktörlerden kaynaklanabilir. Kalıntı gerilmeler; yorulma dayanımı, çatlak oluşumu, malzeme bozulması gibi mekanik performansları etkileyebilir. Bu nedenle, kalıntı gerilmelerin kontrolü ve ölçümü, parçanın üretiminde önemli rol oynar. Şekil 8'de üç farklı geometri için kalıntı gerilme sonuçları sunulmuştur.



Şekil 8. Kalıntı gerilme sonuçları (Residual stress results)

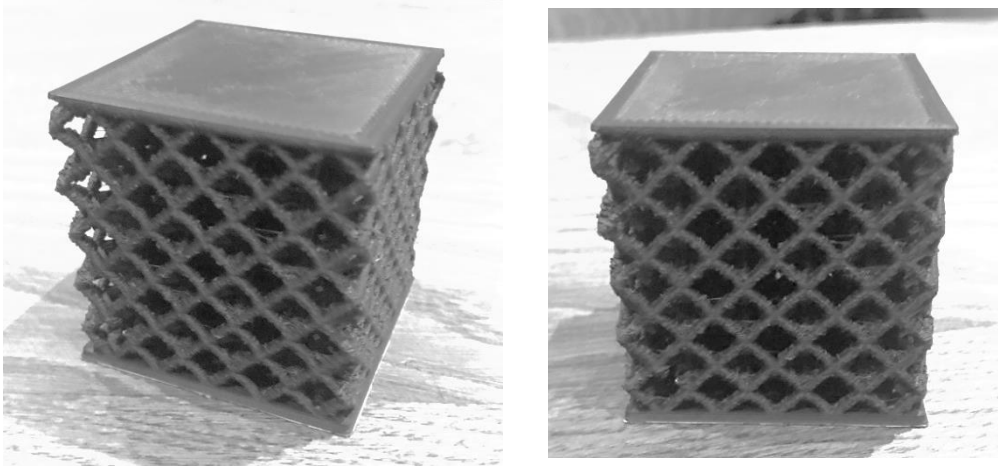
4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Eİ yöntemleri ile tasarımı karmaşık olan ürünlerin üretimi daha kolay olmakla birlikte tasarımlarda yapılan yeniliklerle zaman kaybı olmadan imal edilebilmektedir. Bu çalışmada Eİ yöntemlerinden biri olan FDM kullanılarak eriyik maddenin katmanlı bir şekilde daha az malzeme kullanarak üretimi sağlanmıştır. Bu yöntemin sağladığı ayrıcalıklardan bazıları ucuz maliyet ve daha az malzeme kullanımı olduğundan dolayı parçaların ağırlıkları azalmış ve dolayısıyla daha hafif parçalar üretilmiştir. Çalışma kapsamında seçilen kafes modellerinin kübik tasarımları gerçekleştirilmiş ve bu kafes tasarımlarına sonlu elemanlar tabanlı yapısal analizler uygulanmıştır. Analiz sonuçları aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- ✓ Octahedron kafes modelinin tasarımı yapıldıktan sonra gerçekleştirilen analizlerde von Mises gerilim analizi sonucu kafes modeli için en yüksek 12.87 MPa, yer değiştirme analizinde kafes modelinin en yüksek yer değiştirmesi 0.16 mm, kalıntı gerilme analizinde ise 0.0067 $\mu\text{m}/\text{m}$ olarak hesaplanmıştır.
- ✓ Octahedron kafes modeli için yapılan gerilim analizi sonucunda gerilmelerin yoğun olduğu yerlerin düğüm noktalarında ve düğüm noktalarına yakın olan eğik kenarlarda fazla olduğu

görülmüştür. Ayrıca yapılan gerinim analizi sonucu streslerin biriktiği noktaların gerilim analizinde olduğu gibi düğüm noktalarında ve bu düğüm noktalarına yakın kenarlarda olduğu görülmüştür.

- ✓ Rhombic dodecahedron hücre modeli kafes tasarımına yapılan analizlerde von Misses gerilim analizi en yüksek 11.62 MPa, yer değiştirme analizinde kafes modeli için en yüksek yer değiştirme 0.132 mm ve gerinim analizi 0.0087 $\mu\text{m}/\text{m}$ olarak hesaplanmıştır.
- ✓ Rhombic dodecahedron hücre modeli için yapılan gerilim analizi sonucunda streslerin biriktiği yerlerin düğüm noktaları olduğu sonucuna varılmış ve bu noktalarda gerinmelerinde fazla olduğu görülmüştür.
- ✓ Cuboctahedron kafes modeli tasarımı için yapılan analizlerde sonuçlar von Misses gerilim analizi için en yüksek 7.53 MPa, yer değiştirme analizinde kafes modelinin en yüksek yer değiştirmesi 0.0857 mm ve gerinim analizinde 0.0056 $\mu\text{m}/\text{m}$ olarak hesaplanmıştır.
- ✓ Cuboctahedron kafes modeli için yapılan analizlerde streslerin yoğun olduğu yerlerin eğik kenarlar ve düğüm noktaları olduğu belirlenmiştir. Aynı zamanda gerinmelerin fazla olduğu yerlerde, streslerin yoğun olduğu yerlerdeki ile aynı olduğu görülmüştür. Fakat diğer modellerden farklı olarak yapılan analizlerdeki dağılımlar bu model için daha fazladır.



Şekil 9. 3B baskısı alınan parça görüntüsü (3D printed model view)

Elde edilen analiz sonuçlarına bakıldığında kafes tasarımı gerçekleştirilen hücre modelleri içerisinde cuboctahedronun diğer hücre modellerine göre daha dayanıklı olduğu görülmüştür. Şekil 9'da baskı alınan cuboctahedronun modeli verilmiştir. Çalışması kapsamında tasarım ve analiz sonuçları göz önüne alınarak uzay ve havacılık sektöründe uçakların iniş takımında kullanılan ve farklı bir alaşım maddeden yapılmış parça üzerine montaj edilen destek parçası olan braketler kullanılmaktadır. Bu parçaların üretimi yapılırken, iç gözenek yapısında cuboctahedron hücre modeli kafes yapısı kullanılırsa hem üretimi yapılan parçanın ağırlığı hafifletilecek hem de dayanımı arttırılacaktır.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

Bu çalışma, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Endüstriyel Tasarım Mühendisliği 2023 yılı Lisans Tamamlama Projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

1. N. Top, İ. Şahin, H. Gökçe, Computer aided design and additive manufacturing of bone scaffolds for tissue engineering: state of the art, Journal of Materials Research, 26(19): 3725-3745, 2021.
2. M. Günay, İ. Yeşildağ, GMAW esaslı eklemeli imalat ile üretilen düşük karbonlu çeliğin mekanik özellikleri, Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 7(3): 175-182, 2021.
3. M.İ. Sarı, İ. Şahin, H. Gökçe, Ç. Öksüz, Ring orthosis design and production by rapid prototyping approach, Journal of Hand Therapy, 33(2):170-173, 2020.

4. N. Top, H. Gökçe, İ. Şahin, Doku mühendisliğinde bilgisayar destekli yapay kemik iskelesi tasarımı, İKSAD Yayınevi, Kitap, 2020.
5. O. Yavuz, Eklemeli üretim ile üretilmiş gyroid humerus sabitleme plağının güvenilirlik analizi, Erzurum Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2022.
6. B. Aslan, Yenilikçi tasarım yöntemleri kullanarak eklemeli imalata yönelik optimum ürün geliştirilmesi, Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2019.
7. Y. Wang, L. Zhang, S. Daynes, H. Zhang, S. Feih, M. Wang, Design of graded lattice structure with optimized mesostructures for additive manufacturing, *Materials & Design*, 142: 114-123, 2018.
8. Ş. Kalaycıoğlu, Eklemeli imalat ile üretilen polimerik kafes yapıların mekanik davranışı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2022.
9. P.F. Egan, V.C. Gonella, M. Engensperger, S.J. Ferguson, K. Shea, Computationally designed lattices with tuned properties for tissue engineering using 3D printing, *PloS one*, 12(8): 1-20, 2017.
10. R. Yeşiloğlu, Eklemeli imalat ile üretilen farklı dolgu geometrisi ve yoğunluğa sahip pla esaslı yapıların mekanik davranışlarının deneysel olarak araştırılması, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tez, 2022.
11. M.S. Kamer, Ş. Temiz, H. Yaykaşlı, A. Kaya, O. Akay, 3B yazıcıda farklı yazdırma hızlarında ABS ve PLA malzeme ile üretilen çekme test numunelerinin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 37(3): 1197-1211, 2022.

Ergonomic Analysis of Operator Consoles on Air Support Aircraft

İbrahim Mert KILIÇ¹ , Cengiz ELDEM¹ , Neslihan TOP^{1,*} , Oğulcan EREN¹ ,
İsmail ŞAHİN¹ 

Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği ABD, 06500-Teknikokullar, Ankara

ARTICLE INFORMATION

Received: 24.07.2023
Accepted: 29.08.2023

Keywords:

Ergonomic analysis
REBA
RULA
Digital human modeling
Aviation industry

ABSTRACT

The Digital Human Modelling (DHM) method, in which the anthropometric characteristics of humans are represented using a computer-aided three-dimensional model, is used in many different ergonomic optimisation applications, especially in areas such as manufacturing, machine utilization, assembly simulation, cabin design, human-robot communication. This method aims to identify and reduce potential ergonomic risks in posture and work positions during the design phase by simulating human-machine interactions in digital environments. Thus, possible injuries and injuries can be prevented. Especially in critical aviation applications where operator safety is vital, functionality and ergometry analyzes are important in cockpit and console designs. In this study, ergonomic analyzes of the operator consoles in an air support aircraft were carried out according to the Rapid Entire Body Assessment (REBA) and Rapid Upper Limb Assessment (RULA) methods, according to two different postures, using the Human Builder and Human Activity Analysis modules in the CATIA V5 software. In Position-1, the operator's situation of directly looking at the screen and reaching for the screen buttons is considered, while in Position-2, the operator's situation of reaching for the tablet located on the side and looking at the screen below has been evaluated from an ergonomic perspective. Additionally, angle of view analyses have been performed for these two postural positions.

Hava Destek Uçağındaki Operatör Konsollarının Ergonomik Analizi

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 24.07.2023
Kabul: 29.08.2023

Anahtar Kelimeler:

Ergonomik analiz
REBA
RULA
Dijital insan modelleme
Havacılık sektörü

ÖZET

İnsanlara ait antropometrik özelliklerinin bilgisayar destekli üç boyutlu model kullanılarak temsil edildiği Dijital İnsan Modelleme (DHM) yöntemi, başta üretim, makine kullanımı, montaj simülasyonu, kabin tasarımı, insan-robot iletişimi gibi alanlar olmak üzere bir çok farklı ergonomik optimizasyon uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu yöntem, dijital ortamlarda insan-makine etkileşimlerini simüle ederek, tasarım aşamasında duruş ve çalışma pozisyonlarındaki potansiyel ergonomik riskleri belirlemeyi ve azaltmayı amaçlamaktadır. Böylece, olası yaralanma ve sakatlanmaların önüne geçilebilmektedir. Özellikle operatör güvenliğinin önemli olduğu kritik havacılık uygulamalarında, kokpit ve konsol tasarımlarında işlevsellik ve ergometri analizleri önem taşımaktadır. Bu çalışmada, CATIA V5 uygulaması içerisindeki Human Builder ve Human Activity Analysis modülleri kullanılarak bir hava destek uçağının içerisindeki operatör konsollarının iki farklı duruşa göre Rapid Entire Body Assessment (REBA) ve Rapid Upper Limb Assessment (RULA) yöntemlerine göre ergonomik analizleri gerçekleştirilmiştir. Pozisyon-1'de operatörün ekrana düz bakma ve ekran düğmelerine ulaşma durumu ele alınırken, Pozisyon-2'de operatörün yanda bulunan tablete uzanma ve aşağıda bulunan ekrana bakma durumu ergonomik açıdan değerlendirilmiştir. Ayrıca, bu iki duruş pozisyonuna yönelik görüş açısı analizleri de gerçekleştirilmiştir.

*Corresponding author, e-mail: neslihanntop@gmail.com

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

The evolution of technology and increased industrialization have paved the way for the creation of cutting-edge machines. In recent times, there's been a noticeable shift towards autonomous machines that demand less human interaction, which aids in reducing errors caused by human factors. However, in instances where human-machine interactions persist, the ergonomic aspect of design takes on a significant role. Ergonomic analysis is utilized during the design process to ensure that machines are compatible and comfortable for human use. The focus of these ergonomic assessments is to tailor the design of workplaces, products, and systems to fit the physical dimensions and capabilities of the users. For an ergonomic workplace, it is essential to develop designs that are compatible with the physical characteristics and capacities of users [1, 2].

Ergonomics is the scientific field that investigates the anatomical, physiological, and psychological interactions between the user and the environment [3, 4]. It considers physical, cognitive, social, organizational, and environmental factors in workplace design with a human-centered approach [5, 6]. In the early years of the 20th century, there was a significant leap in technological innovations, particularly in the realm of military equipment and machinery. Concomitant with the complexity of these tools, ensuring humans could utilize these technological assets efficiently, safely, and effectively became increasingly paramount. The era marked by the world wars catalyzed the acceleration of these technological advancements. In the post-Second World War period and the subsequent years characterized by the proliferation of assembly lines, it was observed that continuous repetitive motions could lead to persistent injuries in individuals. Furthermore, it became evident that the design of military aircraft and other equipment was directly correlated with user comfort and functionality. These discoveries paved the way for the evolution of ergonomics into the comprehensive discipline we recognize today. A pivotal moment in this evolutionary trajectory was marked by the establishment of the Human Factors and Ergonomics Society in the United States in 1957.

The aim of ergonomics is to minimize risk factors and the likelihood of injury in workspaces. With ergonomic studies, human access to and compatibility with machines, as well as productivity in working together, are enhanced. Ergonomics is based on research in more established scientific fields such as engineering, physiology and psychology. In the process of conducting ergonomic studies, disciplines and techniques such as anthropometry, biomechanical action analyses, environmental physics, applied psychology, and social psychology are utilized. Potential physical and psychological problems in users can be prevented at early stages with ergonomic analyses applied prior to production [7-10].

The Digital Human Modeling (DHM) approach allows for the early identification of potential problems by considering ergonomic risk factors in the design process [11]. Therefore, by previewing the interaction between the machine and the human in the digital environment with simulations, potential injuries and disabilities can be prevented. DHM not only ensures compliance with health and safety standards but also accelerates the product's time to market. As a result, work efficiency is increased and production costs are reduced [12]. Due to these advantages, the use of the DHM approach has become widespread in various sectors such as aviation and space, military, energy/power, industrial facilities, automotive, and shipbuilding industry.

Several different DHM tools such as Jack®, Ramsis®, Santos, and Delmia® have been developed. These tools allow for the simulation of digital human models in virtual environments and the analysis of ergonomic performances [11]. Ramsis® and Jack® tools are used more for aviation and automotive applications due to their success in ergonomic analyses related to force, accessibility, and comfort [13, 14]. Delmia®, on the other hand, constructs multiple human modeling systems for research related to human-centered design problems [12]. In addition to these tools, there are DHM applications that work integrated with CAD software such as CATIA.

In the aviation sector, where ergonomic analyses are frequently used, anthropometric data plays a significant role in the design of cockpits and operator consoles. These data vary according to the race of the relevant user. Designers strive to achieve an optimum design by using the anthropometric data of the country where the designs will be used. The MIL-STD-1472 Human

Engineering American military standard [15] has been published to ensure that everything involving the human factor in military designs can be designed to a certain standard. This standard includes various design criteria such as equipment design dimensions, control unit dimensions, viewing angles, etc. Standard measurements are established for devices and control units that need human interaction. This facilitates the commencement of the design process with the most appropriate dimensions prior to conducting ergonomic assessments.

In this study, ergonomic analyzes were carried out on the operator consoles of the air support aircraft by using the Human Builder and Human Activity Analysis modules in the CATIA V5 software. Analyzes were performed according to two different posture positions using Rapid Entire Body Assessment (REBA) and Rapid Upper Limb Assessment (RULA) methods. Additionally, the results obtained from viewpoint analyses for these two posture positions were discussed.

2. MATERIAL AND METHOD (MATERYAL VE YÖNTEM)

Ergonomics is a field of science focused on analyzing ergonomic risk factors resulting from human-machine interactions, aided by anthropometric data. With the continuous advancement of technology, ergonomic considerations in workplace design and product development are now carried out using computer-aided applications, employing digital human models for simulation in a virtual environment [11]. These digital human models should be based on anthropometric data specific to different countries, allowing for evaluations based on the average body measurements of end-users to achieve the most suitable and user-friendly designs.

One of the sectors where ergonomic analyses are most prevalent is the aviation industry, particularly within air support aircraft, which often feature numerous operator consoles. Due to the spatial constraints of the aircraft's interior, these consoles are designed with minimum dimensions. However, this approach may pose ergonomic challenges, potentially impacting operator efficiency and comfort. In this study, the consoles were meticulously crafted using standard basic console dimensions as outlined in Figure 1, aiming to minimize the need for trial and error in the design process.

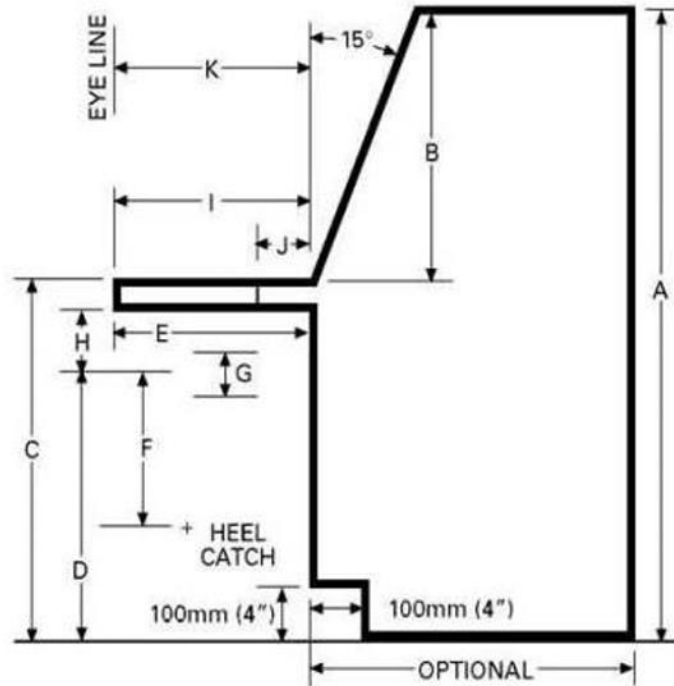


Figure 1. Basic console dimensions in MIL-STD-1472 standards (MIL-STD-1472 standartlarındaki temel konsol boyutları) [15]

Various analysis methods such as Rapid Upper Limb Assessment (RULA), Rapid Entire Body Assessment (REBA), Ovako Working Analysis System (OWAS), National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) Lifting Equation, and Lumbar Motion Monitor (LMM)

are utilized for ergonomic risk assessments [16-18]. These analyses involve examining the interaction between a digital human model, based on anthropometric data, and the machinery. In the scope of this study, REBA and RULA analyses were employed to identify ergonomic risks associated with two different posture positions of operator consoles within an air support aircraft.

The REBA (Rapid Entire Body Assessment) ergonomic analysis method is a tool that allows the identification of potential risks that may arise from postural behaviors during work. The REBA method focuses on discomforts that may occur in the human musculoskeletal system, developing a scoring system for muscle activity caused by various postures - static, dynamic, rapidly changing, or unbalanced, based on the aircrafts of movement [19]. The REBA ergonomic analysis method can be conducted easily without the need for expensive equipment or advanced ergonomic knowledge. Using standard charts (Figure 2) utilized in the REBA analysis, posture measurements are identified and scored accordingly. To determine the REBA score, the body is considered in two groups: Group A (neck, trunk, and legs) and Group B (upper arm, lower arm, and wrists) (Figure 2).

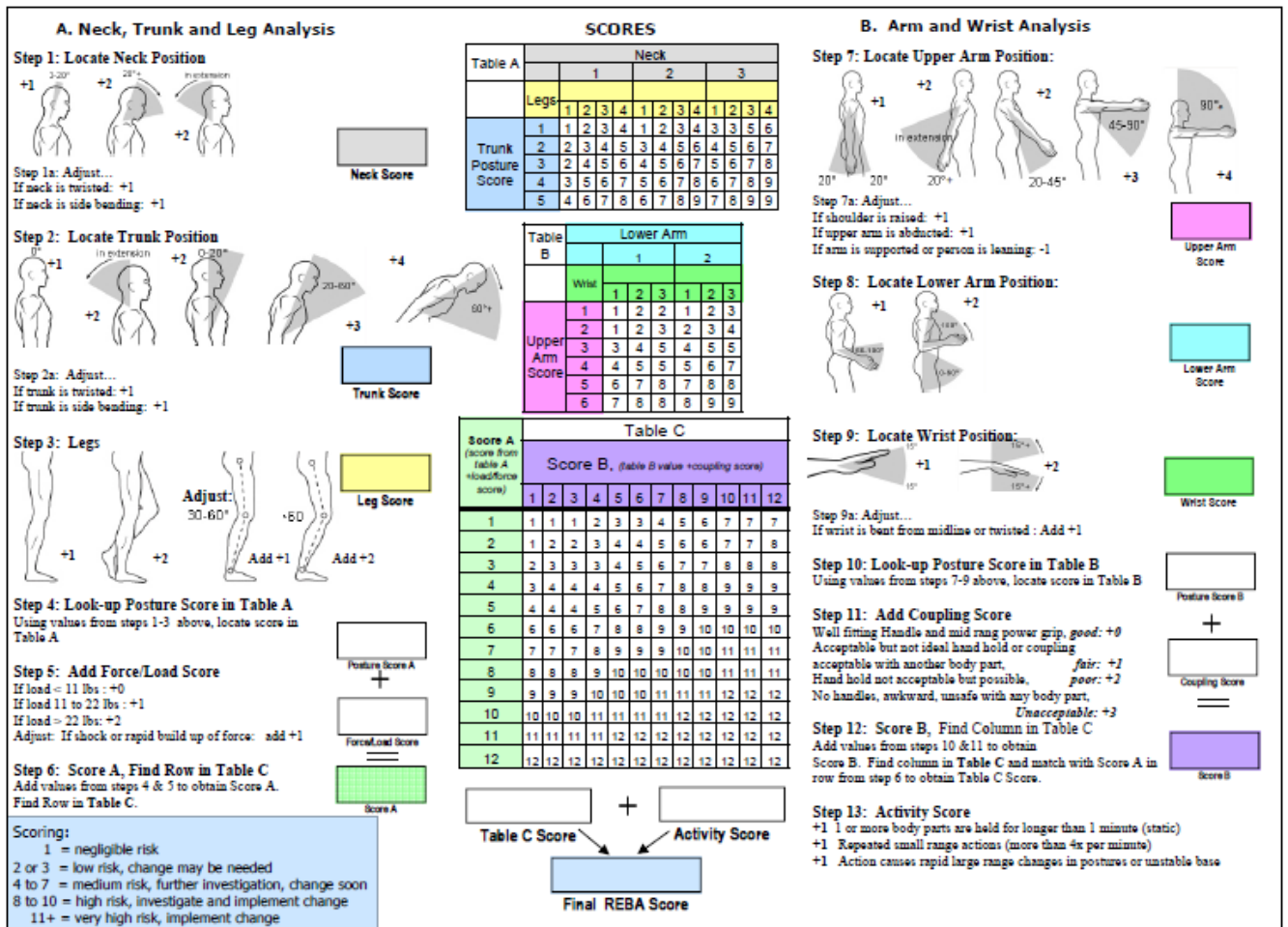


Figure 2. REBA scoreboard (REBA puan tablosu) [19]

The Rapid Upper Limb Assessment (RULA) method is utilized to detect potential problems that may arise in the region of the upper extremities during static and repetitive tasks. Similar to the REBA method, in RULA, the body is also divided into two groups: Group A (arms and wrists) and Group B (trunk, neck, and legs) [20]. The final RULA score is determined using data from the RULA standard chart (Figure 3) for the ergonomic analysis. The RULA analysis method examines the impact of a machine or platform on the user's musculoskeletal system. Health problems resulting from the usage of the designed environment or machine are evaluated through the RULA scoring system.

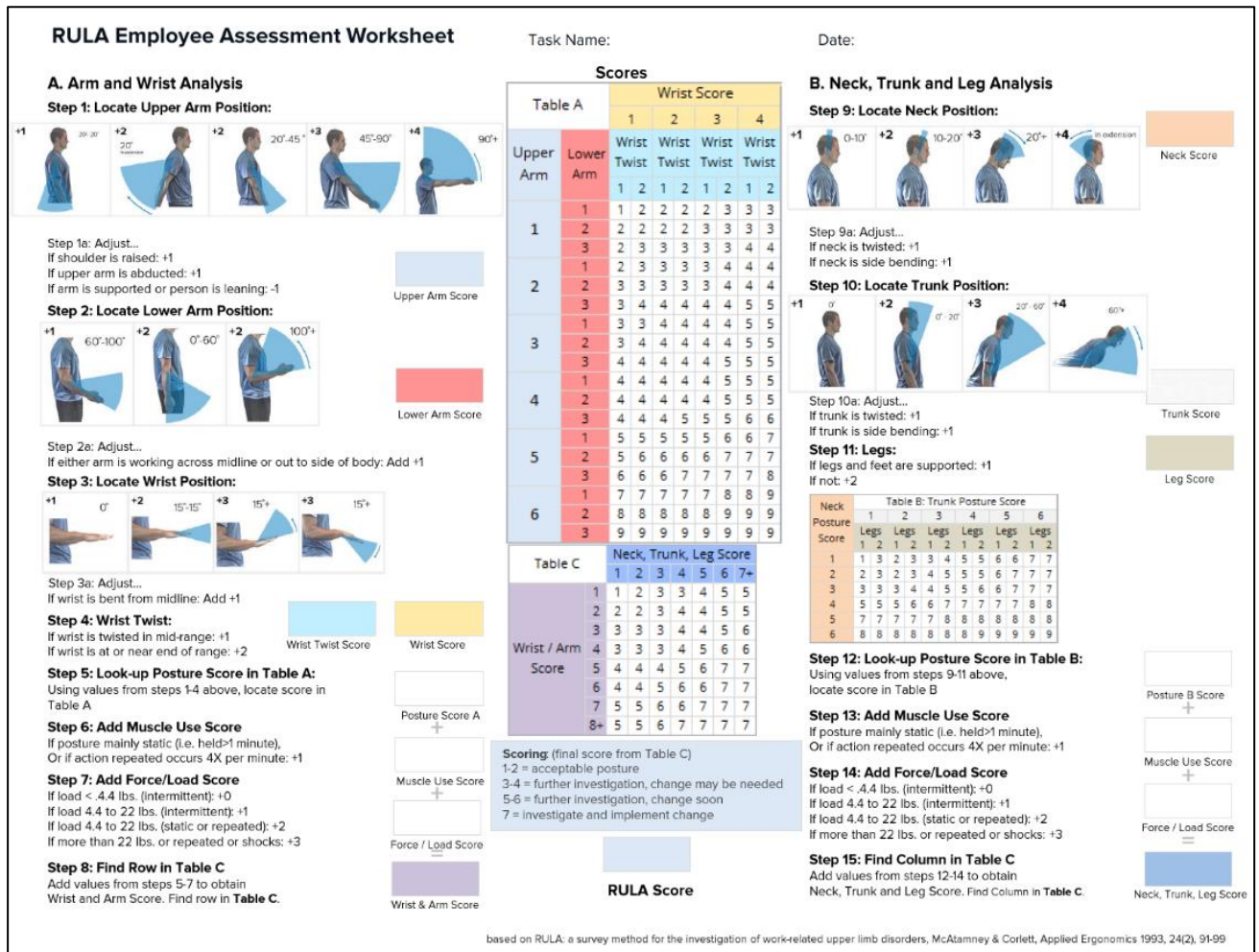


Figure 3. RULA scoreboard (RULA puan tablosu) [21]

3. FINDINGS (BULGULAR)

This research assessed the operator's posture while working on a console, considering two distinctive positions through the application of both REBA and RULA methodologies. The operator was evaluated under two separate scenarios, with observed differences noted between them. The work postures were labeled as Position-1 and Position-2. REBA and RULA analyses were conducted on both situations using CATIA. In Position-1, the situation of the operator looking straight at the screen and reaching the screen buttons was considered, while in Position-2, the situation of the operator reaching for a tablet on the side and looking at a screen below was evaluated from an ergonomic perspective.

3.1. Ergonomic Analysis with REBA (REBA ile Ergonomik Analiz)

The REBA scoring for Position-1 was calculated in accordance with the tables present in Figure 2, yielding an A score of 2 and a B score of 1. Consequently, the overall REBA score was determined to be 2 (Figure 4).

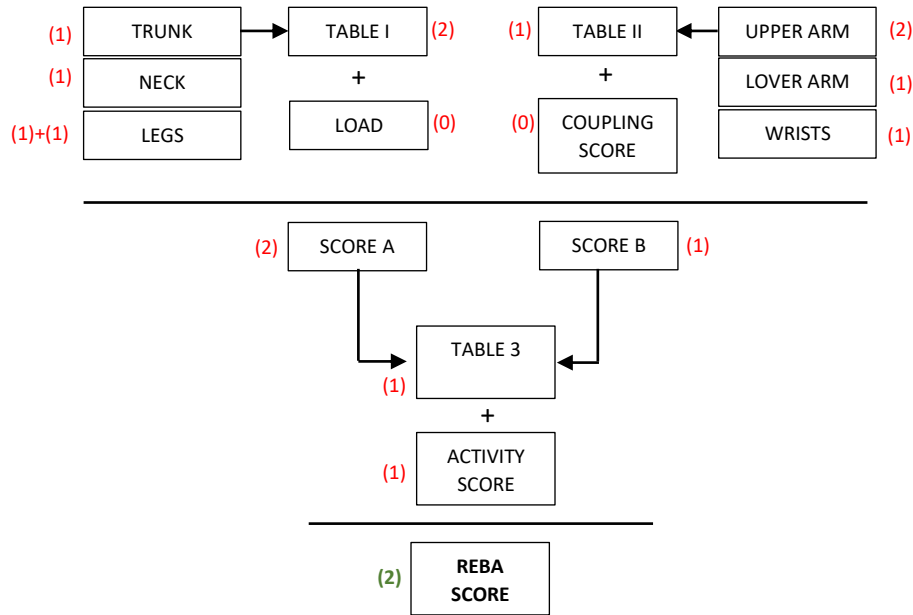


Figure 4. Determination of REBA score for Position-1 (Pozisyon-1 için REBA puanının belirlenmesi)

The risk assessment based on the REBA score for Position-1 is given in Table 1. According to the analysis results, even though the risk level was identified as low, it was determined that potential design changes might be required over an extended period.

Table 1. Classification of risks according to REBA and RULA tools scores (REBA ve RULA araçları puanlarına göre risklerin sınıflandırılması) [22]

RULA		REBA		
RULA Score	Action Required	Action level (Risk level)	REBA Score	Corrective Measure
1-2	Acceptable	0 (Negligible)	1	None necessary
3-4	Change may be necessary	1 (Low)	2-3	May be necessary
5-6	Change necessary soon	2 (Medium)	4-7	Necessary
7	Change immediately	3 (High)	8-10	Necessary soon
		4 (Very High)	11-15	Necessary NOW

The REBA scoring for Position-2 was derived in accordance with the tables in Figure 2, generating an A score of 2 and a B score of 4. As a result, the final REBA score was determined to be 4 (Figure 5).

The risk assessment based on the REBA score for Position-2 is given in Table 9. Based on the outcomes of the analysis, the ergonomic risk level was assessed as medium with a score of 4, indicating a necessity for alterations in the operator's posture.

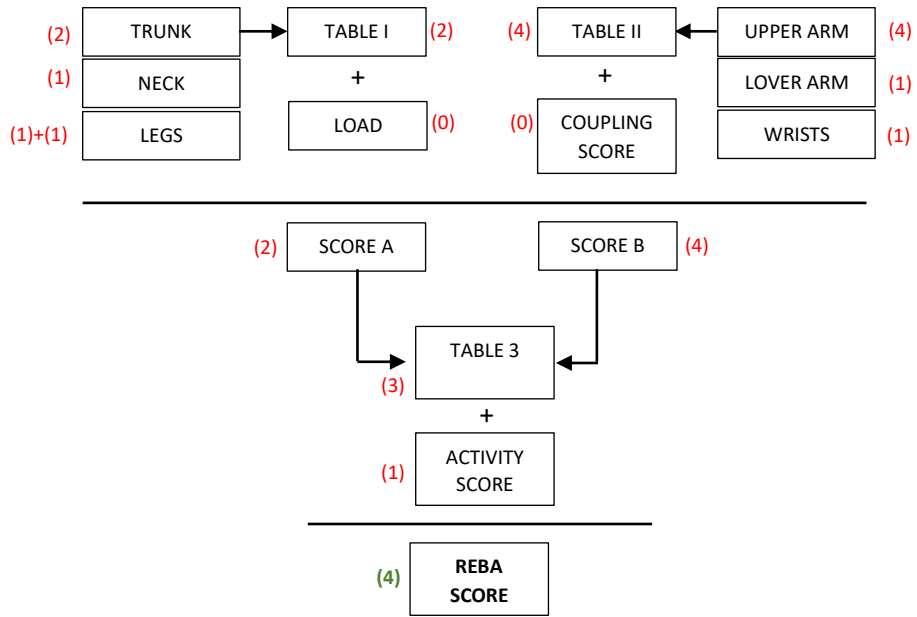


Figure 5. Determination of REBA score for Position-2 (Pozisyon-2 için REBA puanının belirlenmesi)

3.2. Ergonomic Analysis with RULA (RULA ile Ergonomik Analiz)

The human model, created using CATIA V5 Human Builder, was positioned on the three-dimensional console model in accordance with Position-1, and then RULA analysis was applied (Figures 6 and 7). As a result of the RULA analysis conducted using the CATIA V5 software, the final score was established as 3, thereby classifying it within the low-risk group (Table 9).

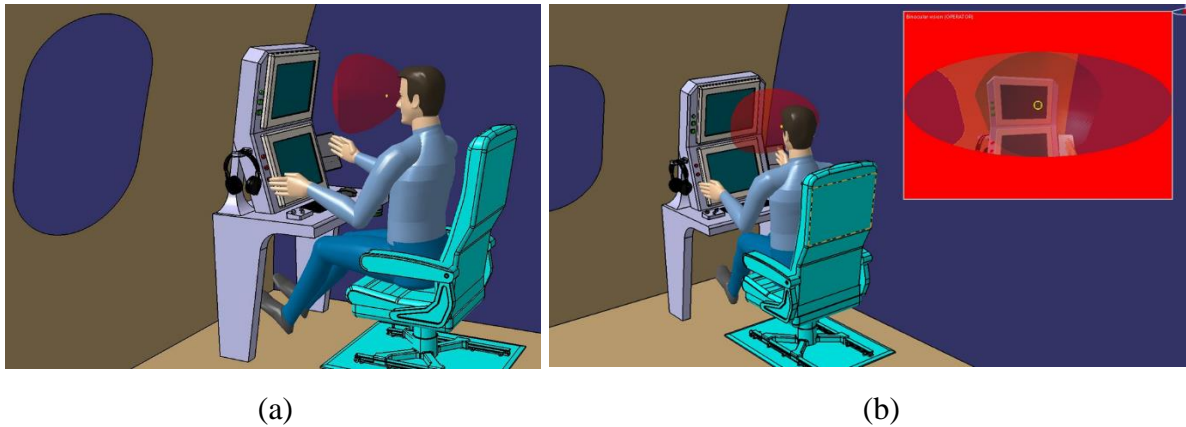


Figure 6. RULA analysis for Position-1 (a) CATIA V5 model, (b) viewpoint analysis (Pozisyon-1 için RULA analizi (a) CATIA V5 modeli, (b) bakış açısı analizi)

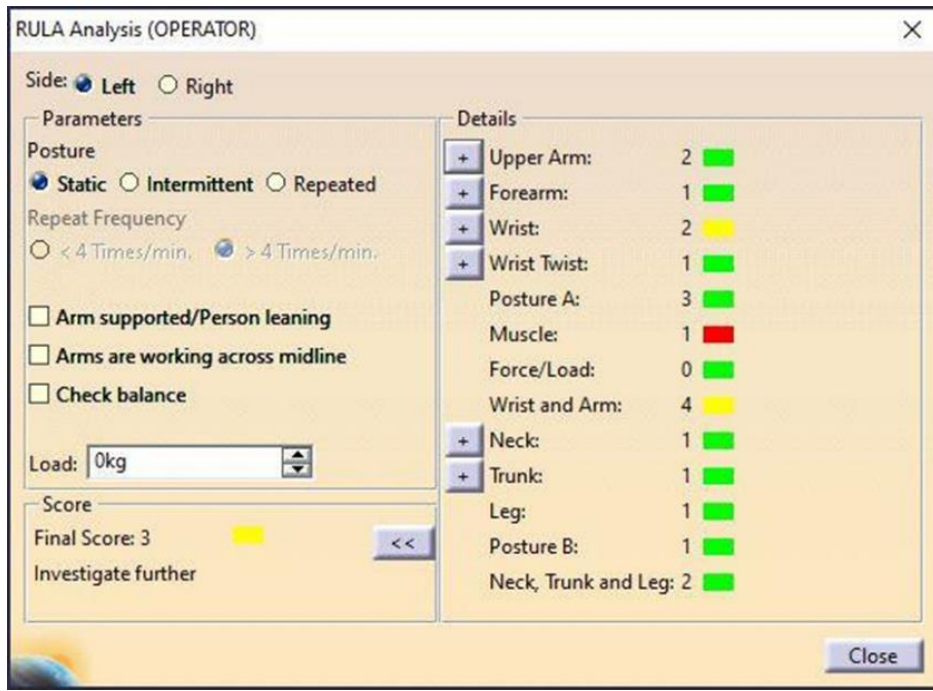


Figure 7. Results for RULA Analysis for Position-1 (Pozisyon-1 için RULA Analizi Sonuçları)

The human model, created using CATIA V5 Human Builder, was positioned on the three-dimensional console model in accordance with Position-2, which was then followed by a RULA analysis (Figures 8 and 9). The results from the RULA analysis carried out in the CATIA V5 program led to a final score of 3, which, as per Table 8, is classified within the low-risk group.

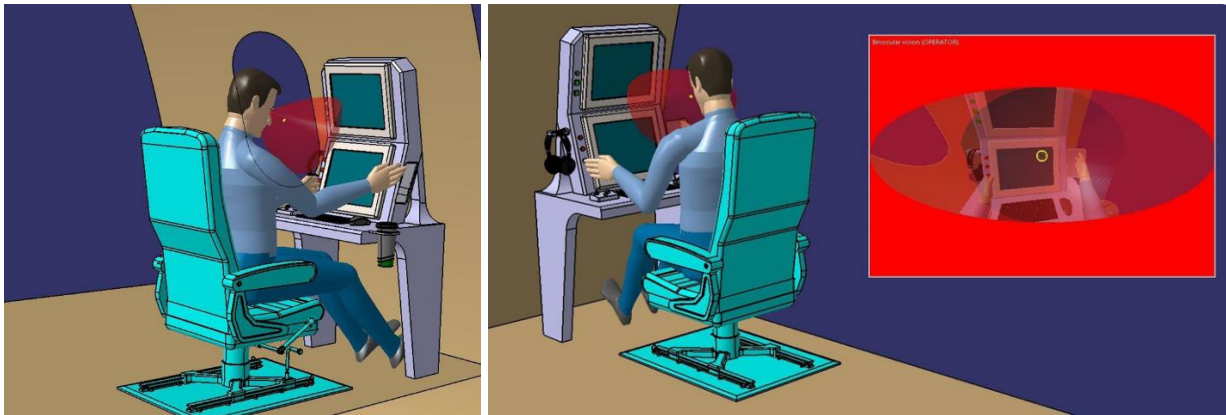


Figure 8. RULA analysis for Position-2 (a) CATIA V5 model, (b) viewpoint analysis (Pozisyon-2 için RULA analizi (a) CATIA V5 modeli, (b) bakış açısı analizi)

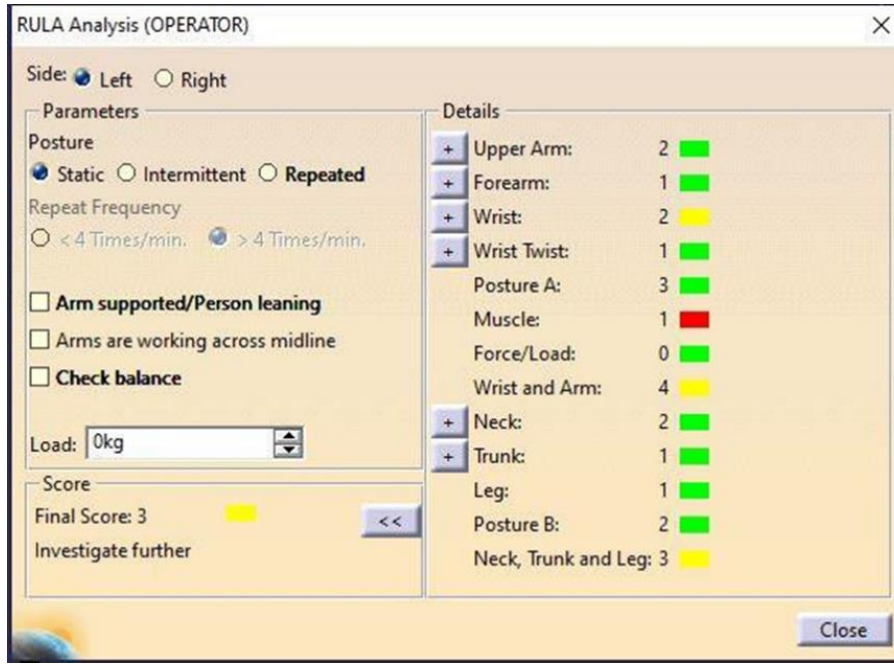


Figure 9. Results for RULA Analysis for Position-2 (Pozisyon-2 için RULA Analizi Sonuçları)

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In this study, the ergonomic analyses of operator consoles within the aircraft fuselage were evaluated from the perspective of two different postural positions using the REBA and RULA methods. Position-1 considered the operator's situation of looking directly at the screen and reaching the screen buttons, whereas Position-2 assessed the operator's situation of reaching for the tablet on the side and looking at the screen below from an ergonomic point of view. Additionally, viewing angle analyses were conducted for these two postural positions.

Similarly, there are studies in the literature that evaluate different working and posture positions from an ergonomic point of view. In the study where the ergonomic evaluation of the driver in different postures was made, REBA and RULA tools of the CATIA V5 program and digital human models were used [4]. According to the results, when calculating the REBA score for both positions, the RULA scores were determined as 3. According to these values, it was stated that in the long term, it may be necessary to make changes by maintaining the existing standing positions. In another study, ergonomic evaluation of different working positions was made using the RULA method [1]. In this study, in which 5 different working and posture positions were evaluated, the RULA final scores ranged from 2 to 7. The designs for the respective working position have been updated for higher values. In a similar study, an ergonomic risk assessment of a functional product was performed using the REBA and RULA tools [18]. According to the analysis results, an ergonomic risk value that would require a change in the design was not determined. As a result, in this study, the ergonomic analyses of operator consoles within the aircraft fuselage were evaluated from the perspective of two different postural positions using the REBA and RULA methods. For Position-1, the final REBA score was determined as 2, indicating a low level of ergonomic risk. Upon examining the results of the RULA analysis for Position-1, the final score was determined as 3, also indicating a low level of ergonomic risk. Conversely, the final REBA score for Position-2 was determined as 4. This was due to the neck angles being different from the normal postural position, and the level of ergonomic risk was identified as medium. Lastly, upon analyzing the RULA results for Position-2, the final score was found to be 3, suggesting a low level of ergonomic risk.



This study has evaluated the importance of the harmony and connection between humans and machines. Optimal working environments can be provided through fundamental ergonomic analyses like REBA and RULA. Presently, numerous products necessitate ergonomic evaluation. Each product involving human interaction, from the most intricate to the most straightforward,

should be subjected to this analysis to diminish potential risks to the minimum. Future research could propose alternate working postures aimed at minimizing the ergonomic risk factor associated with the two different posture positions studied. For Position-2, making the tablet located on the right adjustable could help in reducing the neck angle. By implementing revisions in both seating positions, it would be possible to bring risk scores down to the lowest feasible level.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

1. N. Top, Operasyonel ofis mobilyası tasarımının rula yöntemi ile ergonomik analizi ve yeniden tasarımı, Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 5(3): 290-299, 2019.
2. Ö. Kaya, A.F. Özok, Tasarımda antropometrinin önemi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 5: 309-316, 2017.
3. R. Bridger, Introduction to Ergonomics, 2nd ed., New York, 2003.
4. C. Eldem, N. Top, H. Şahin, Dijital insan modelleri kullanarak otomobil sürücüsü duruş pozisyonlarının ergonomik değerlendirilmesi üzerine bir çalışma, Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 5(1): 22-31, 2019.
5. N. Stanton, A. Hedge, K. Brookhuis, E. Salas, H.W. Hendrick, Handbook of human factors and ergonomics methods, CRC Press, Boca Raton, FL, 2004.
6. K.J. Vicente, The Human Factor, Routledge, New York, 2004.
7. J.R. Wilson, N. Corlett, Evaluation of human work, CRC press, 2005.
8. S.J. Ulijoszek, C.G.N. Mascie-Taylor, Antropometry, the individual and the population, Cambridge University Press Great Britain, 1994.
9. C.R. Rodriguez-Añez, Anthropometry and its application in ergonomics, Brazilian Journal of Kinanthropometry and Human Performance, 3(1): 102-108, 2001.
10. E. Helvacılar, C. Eldem, İnsan faktörleri mühendisliği bakış açısı ile askeri mesaj işletim sistemleri, Gazi Journal of Engineering Sciences, 3(3): 41-46, 2017.
11. İ. Şahin, N. Top, Ergonomik risk değerlendirmesi için dijital insan modellerin kullanımı, İksad Yayınevi, Ankara, 2021.
12. K. Abdel-Malek, J. Arora, L.F. Law, C. Swam, S. Beck, T. Xia, R. Bhatt, J. Kim, Y. Xiang, M.K. Rasmussen, Santos: A digital human in the making. In IASTED International Conference on Applied Simulation and Modeling, ADA542025, June 2008, Greece.
13. K.A. Malek, J. Yang, T. Marler, S. Beck, A. Mathai, X. Zhou, A. Patrick, J. Arora, Towards a new generation of virtual humans. International Journal of Human Factors Modelling and Simulation, 1(1): 2-38, 2006.
14. Gruposparco. (t.y.). Classic Jack. https://www.gruposparco.com/gestor/menus/secciones/articulos/archivos/C_LASSIC_JACK.pdf, 09.22.2021.
15. http://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-1400-1499/MIL-STD-1472F_208/
16. F. Caputo, A. Greco, M. Fera, R. Macchiaroli, Digital twins to enhance the integration of ergonomics in the workplace design, International Journal of Industrial Ergonomics, 71: 20-31, 2019.
17. E.P. Takala, I. Pehkonen, M. Forsman, G.Å. Hansson, S.E. Mathiassen, W.P. Neumann, G. Sjøgaard, K. B. Veiersted, R.H. Westgaard, J. Winkel, Systematic evaluation of observational methods assessing biomechanical exposures at work, Scand J Work Environ Health, 36(1): 3-24, 2010.
18. N. Top, H. Başak, İ. Şahin, Biyomimetik tabanlı fonksiyonel yürüteç tasarımı ve dijital insan modelleme ile ergonomik analizi, El-Cezeri, 8(2): 618-634, 2021.
19. S. Hignett, L. McAtamney, Rapid entire body assessment (REBA), Applied ergonomics, 31(2): 201-205, 2000.
20. C. Eldem, İ. Şahin, M. T. Demir, N. Top, T. Şahin, Araç bakım kanallarının dijital insan modelleri ile ergonomik analizi ve yeniden tasarımı, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 7(2): 386-392, 2019.
21. L. McAtamney, E.N. Corlett, RULA: A survey method for the investigation of work-related upper limb disorders, Applied ergonomics, 24(2): 91-99, 1993.
22. S.M. Qutubuddin, S.S. Hebbal, A.C.S. Kumar, Ergonomic risk assessment using postural analysis tools in a bus body building unit, Industrial Engineering Letters, 3(8): 10-20, 2013.

Numerical Analysis of Metals Under The Influence of Electromagnetic Field at Different Current Values

Kadir Gündoğan^{1,*} , Veli Çelik² 

¹Uşak University, Faculty of Engineering, Uşak, Türkiye

²Ankara Yıldırım Beyazıt University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Ankara, Türkiye

ARTICLE INFORMATION

Received: 13.08.2023

Accepted: 30.08.2023

Keywords:

Induction

Heat

ANSYS

Current

Electromagnetic field

ABSTRACT

The primary factors of the widespread use of induction melting furnaces are uniform metal and heat distribution due to its mixing features, low alloy losses, excellent temperature and composition control, versatility in processing different materials, the ability to quickly start the process from a cold state when needed, and the absence of air pollution problems. In induction heating, not all sides of the part to be heated receive an equal amount of heat. Only if the part to be heated is of the type that conducts heat very well can all sides of the part be heated close to each other. Induction heating produces high heat on the surface, less on the inner parts, and least on the center of the material. This heating varies depending on the frequency of the current source and the penetration depth. In this study, a model was created in ANSYS numerical analysis program by taking the current, which is one of the electromagnetic and thermal parameters affecting the temperature distribution in the metallic material in induction heating, at different values. In the simulation model created, three-dimensional numerical analysis results of a cylindrical metallic material were obtained. In the simulation program, the power and frequency required for the design of the induction coil and the magnetic permeability, resistivity, heat transfer coefficient of the material and the position of the material in the inductor are determined as boundary conditions. Depending on these variables, the temperature and magnetic field distributions on the material were obtained. In addition to the numerical analysis, a cylindrical metallic material with known properties was placed in a specially manufactured induction coil and the temperature values on the material were measured to verify the numerical analysis. ANSYS modeling results with the same material dimensions, properties, and other parameters used in the experiment, were given and examined in comparison with the experimental results.

Farklı Akım Değerlerinde Elektromanyetik Alan Etkisi Altındaki Metallerin Sayısal Analizi

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 13.08.2023

Kabul: 30.08.2023

Anahtar Kelimeler:

İndüksiyon

Isı

ANSYS

Akım

Elektromanyetik alan

ÖZET

Ergitme ocaklarında karıştırma özelliği dolayısıyla düzgün bir metal ve ısı dağılımı, alarım kayıplarının azlığı, sıcaklık ve bileşim kontrolünün çok iyi olması, işlem görece malzeme özelliklerinin sınırlı olmaması, istenildiği zaman kısa süre içerisinde soğuktan işleme alınabilmesi hava kirliliği probleminin olmayışı indüksiyon ergitme ocakları kullanımının yaygınlaşmasında temel faktörlerdir. İndüksiyonla ısıtmada, ısıtılacak parçanın her tarafı eşit miktarda ısı almamaktadır. Yalnız ısıtılacak parça ısıyı çok iyi ileten cinsten ise, parçanın her tarafı birbirine yakın miktarda ısıtılabilir. İndüksiyon ısıtma parçanın yüzeyinde çok yüksek, iç kısımlarında az, merkezinde ise daha az bir ısı meydana getirmektedir. Bu ısınma akım kaynağının frekansına ve nüfuz derinliğine bağlı olarak değişmektedir. Bu çalışmada, indüksiyonla ısıtmada metal malzemedeki sıcaklık dağılımını etkileyen elektromanyetik ve termal parametrelerden biri olan akım değeri farklı akım değerlerde alınarak ANSYS sayısal çözümleme programında bir model oluşturulmuştur. Oluşturulan simülasyon modelinde silindirik bir metalik malzemede

*Corresponding author, e-mail: kadir.gundogan@usak.edu.tr

To cite this article: K. Gündoğan, V. Çelik, Numerical Analysis of Metals Under The Influence of Electromagnetic Field at Different Current Values, Manufacturing Technologies and Applications, 4(2), 111-119, 2023.

<https://doi.org/10.52795/mateca.1342135>, This paper is licensed under a CC BY-NC 4.0

üç boyutlu olarak sayısal çözümlene sonuçları elde edilmiştir. Simülasyon programında indüksiyon bobini tasarımı için ihtiyaç duyulan güç ve frekans ile malzemenin manyetik geçirgenlik, öz direnç, ısı iletim katsayısı ve malzemenin indüktör içerisindeki konumu sınır şartları olarak belirlenmiştir. Bu değişkenlere bağlı olarak malzeme üzerindeki sıcaklık ve manyetik alan dağılımları elde edilmiştir. Sayısal çözümlene yanında sayısal çözümlenenin doğrulanabilmesi için, özel olarak imal edilmiş bir indüksiyon bobini içerisine özellikleri bilinen silindirik metal malzeme yerleştirilerek ısıtılmış ve deneysel olarak malzeme üzerindeki sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Deneyde kullanılan malzeme boyutları ve özellikleri ile diğer parametreleri aynı seçilen ANSYS modelleme sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırmalı olarak verilmiş ve irdelenmiştir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

The basic principle of induction heating is based on the conversion of electromagnetic energy into heat energy. As seen in Figure 1, when alternating current is applied to a coil, a variable magnetic field is formed around the coil according to Ampere's Law. This magnetic field induces a voltage on the part to be heated according to Faraday's Law. This induced voltage causes eddy currents to flow in the workpiece placed in the induction coil which is in the magnetic field according to Lenz's Law.

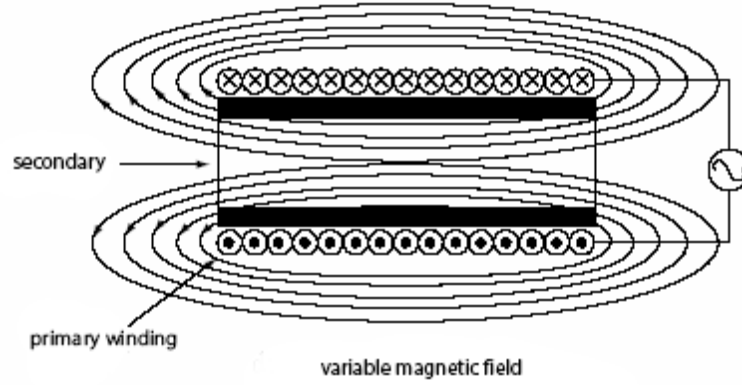


Figure 1. Basic principle of induction heating (İndüksiyonla ısıtmanın temel prensibi) [1].

Drobrenko et al. [2], in their study, made a mathematical simulation of the induction heating of metals with high electrical conductivity to high temperatures. Thermal modeling of solid cylinder stainless steel was carried out and in light of the numerical results, it was determined that the temperature increase depends on the electrical conductivity and magnetic characteristics of the material. Values for stainless steel were examined comparatively with both electrical conductivity and magnetic characteristics. Non-static mathematical model; They combined it with polarized and magnetizable opposing symmetrical solids, in which electromagnetic fields are proposed to be produced by external currents, as well as electromagnetic and thermal processes. The parameters of the process are correlated with the temperature dependence of the heat source and material characteristics. In their study, they investigated the change of magnetic permeability of materials with temperature increase by considering the induction heating process of a finite steel cylinder. Jang and Chiu investigated the heating of hollow cylinder steel with electromagnetic induction step by step and compared them with their numerical analysis. They conducted their studies by taking the forms of the same material in three different lengths, diameters, and wall thicknesses [3]. Shen et al. [4], made mathematical modeling of electromagnetic and temperature distributions in high-frequency induction heating using Maxwell's equations. To develop the temperature field according to Maxwell's equation, a mathematical model was created for the high-frequency induction heating case and an equation was obtained by combining the electromagnetic and temperature fields to be solved. They simulated this modeling in the FEMLAB program and compared the program data with the experimental results. The effects of high-frequency heating parameters and plate-coil distance were investigated through this model. In another study, Magnabosco et al. [5], compared

the thermal analysis of an induction-heated ISO C45 steel bar numerically and experimentally. By considering two sample materials that were normalized and annealed, they analyzed the metallurgical and thermal analysis of the materials with the Sysweld-2000 numerical modeling program and formed the thermo-metallurgical model of the material in the induction heating process with experimental results [6]. Zhao and his group [7] investigated the temperature distribution and structural deformation of steel during continuous casting under a high-frequency electromagnetic field. They also carried out numerical modeling of the thermal behavior of the material in this electromagnetic field. Several numerical modeling strategies with different limitations have been developed to model the induction heating process. Various magnetic vector potential formulations for the eddy current problem are reviewed by Biro and Preis [8], where special attention is paid to the uniqueness of the vector potential formulation. The solution strategies are implemented using the finite element method and hysteresis and anisotropic effects are neglected. In the work by Bay et al. [9], ferromagnetic nonlinear effects are taken into account, but only temperatures below the Curie temperature are considered and the effect of magnetic hysteresis is neglected. Areitioaurtena et al. proposed an approximate solution based on a semi-analytical modeling strategy [10, 11]. In their work, an analytical electromagnetic approach is followed to solve the coupled electromagnetic-thermal problem by determining the initial model based on the harmonic approximation and performing the finite element solution. In another study in this model, Jankowski et al. presented an approximate solution for the induction heating of a solid cylinder in a cylindrical induction coil [12]. Comparisons between their work, finite element analysis and experimental data show that the analytical solution is able to capture the frequency and temperature evolution during heating quite well for paramagnetic materials. In addition to these studies, finite element method is frequently used in various studies in the field of engineering [13, 14].

2. MATERIAL AND METHOD (MATERYAL VE YÖNTEM)

2.1. Induction Heating Theory (İndüksiyonla Isıtma Teorisi)

Induction heating is a method that generates heat by inducing eddy currents and hysteresis losses in the part by the alternating magnetic field formed on the surface of the part. The alternating magnetic field is created by an alternating current flowing induction coil that surrounds the workpiece or is held parallel to the workpiece. Applying alternating voltage to the induction coil causes alternating current to flow in the coil. In this case, a time-varying magnetic field is formed in the environment and the frequency of this field is the same as the frequency of the applied current. When the electromagnetic field is changed, a magnetic force is created in any conductive material. If the current flow is allowed on a whole path through the material, the induced force creates a current along that path. Due to the resistance of the material, the Joule effect is observed and heat generation occurs in proportion to $I R^2$. Here, I is the magnetic current and R is the resistance of the material [15]. In the case of continuous current, the resistance of a homogeneous material with a uniform cross-sectional area is defined as (Ohm, Ω).

Induction heating is based on the development of the joule effect on the material in the adjacent areas of the material close to the coil. In Figure 2, the heat generation in the material placed in the magnetic field is presented schematically.

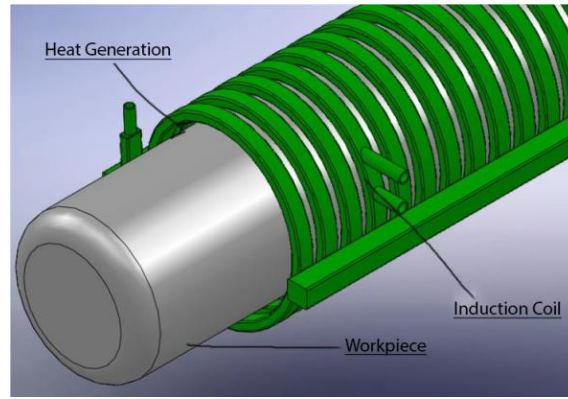


Figure 2. Heating inductor and workpiece (Isıtma indüktörü ve iş parçası)

By how many degrees the temperature of the metallic material is desired to be increased, the temperature changes of the material values between those temperatures should be transferred to ANSYS for both electromagnetic and thermal analysis. Solving the problem should be done sequentially. First, the electromagnetic analysis should be resolved harmonically, and then the thermal analysis based on time. Finally, the electromagnetic analysis should be repeated at various time intervals so that the time-related properties of the temperature that will affect the solution are confirmed and the heat is transferred to the metallic material. (Figure 3)

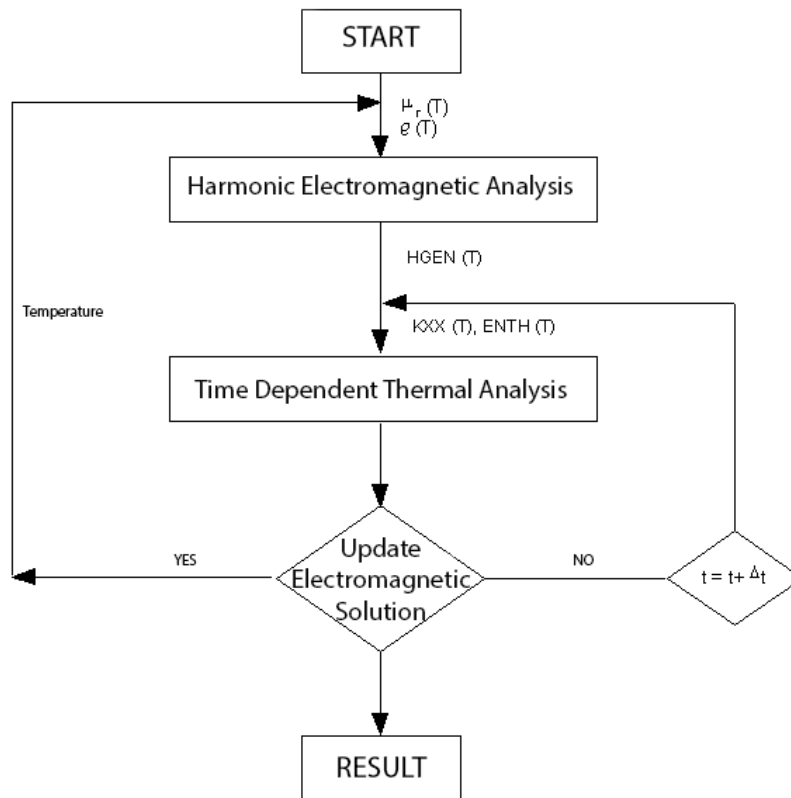


Figure 3. Electromagnetic-thermal analysis flow chart (Elektromanyetik-termal analiz akış şeması)

2.2. Three Dimensional Electromagnetic Thermal Analysis (Üç Boyutlu Elektromanyetik Termal Analiz)

By modeling a real induction furnace's dimensions and material dimensions, electromagnetic and thermal changes are solved in three dimensions on the xyz space.

2.2.1. Element selection (Eleman seçimi)

In three-dimensional analysis, firstly, analysis types will be introduced. By specifying the degrees of freedom of the selected element types, the suitability for their analysis will be explained.

Solid 236 geometry

This element type was used for electromagnetic analysis. The geometry of the object, the applicable boundary condition values, and the degrees of freedom made this element type suitable for electromagnetic analysis. Solid 236 is a 3-dimensional, 20-node element type containing electromagnetic fields. This element type has magnetic and electrical degrees of freedom (Figure 4).

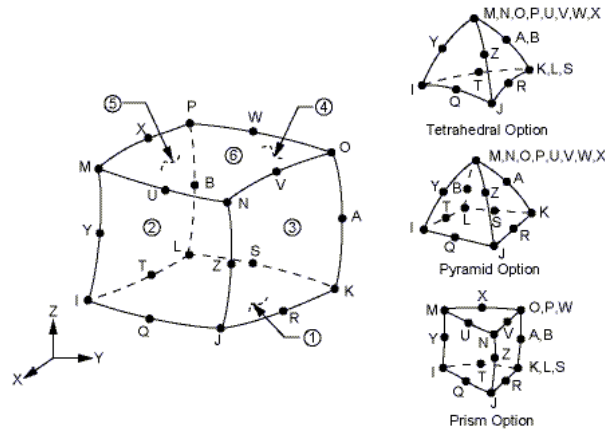


Figure 4. Solid 236 element type geometry (Solid 236 eleman tipi geometri) [16]

Solid 90 geometry

This element type was chosen for thermal analysis. The suitability to the geometry of the object, the applicable boundary conditions, and degrees of freedom make this element type suitable for thermal analysis. Solid 90 is a 3-dimensional, 20-node element type with thermal degrees of freedom (Figure 5).

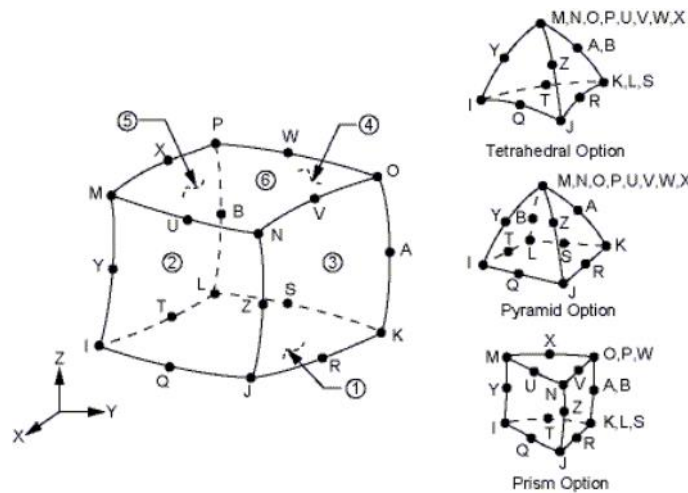


Figure 5. Solid 90 element type geometry (Solid 90 eleman tipi geometri) [16]

2.2.2. Entering material properties (Malzeme özelliklerini girme)

Due to the structure of the induction furnace, the properties of the inductor, air and the material to be heated will be defined and calculations will be made on these properties. Magnetic permeability, resistivity, enthalpy values, and thermal conductivity values depending on the temperature of the material to be heated are included in the analysis. The numerical values of these properties are given in the table below.

Table 1. Some temperature-dependent material properties for ferrous material

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
Temperature	0	27	127	327	527	727	765	927		
Enthalpy	7.89×10^{-27}	9.16×10^{11}	4.53×10^{12}	1.27×10^{13}	2.25×10^{13}	3.34×10^{13}	3.55×10^{13}	4.35×10^{12}		
Temperature	0	730	930	1000						
Thermal Conductivity	60.64	29.5	28	28						
Temperature	25.5	160	291.5	477.5	635	698	709	720.3	742	761
Magnetic Permeability	200	190	182	161	135	104	84	35	17	1
Temperature	0	125	250	375	500	625	750	875	1000	
Resistivity	1.84×10^{-7}	2.72×10^{-7}	3.84×10^{-7}	5.12×10^{-7}	6.56×10^{-7}	8.24×10^{-7}	1.03×10^{-3}	1.15×10^{-3}	1.2×10^{-6}	
Temperature	0									
Emissivity	0.68									

In addition to what is shown in the chart, the magnetic permeability value of the air and the inductor is entered as 1.

2.2.3. Separation into elements (Elemanlara ayırma)

Figure 6 shows the inductor and the iron rod separated into its elements. There is an iron bar inside and an inductor on the outside. The outermost material seen in red is air. As seen in the picture, the geometries prepared for analysis were taken in a quarter volumes. The reason for this is to prevent the analysis from taking too long due to the excess that will occur in the number of meshes, and therefore in the number of nodes, if the system is taken at full volume. Because the system is symmetrical, any change that will occur in the one-quarter volume will occur in the same shape and ratio in the entire volume.

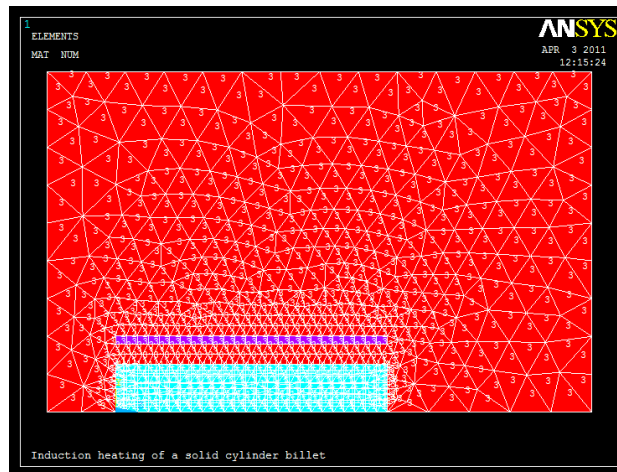


Figure 6. Meshed view of the 3D system (3B sistemin mesh görünümü)

2.2.4. Process (İşlem)

By how many degrees the metallic material temperature is desired to be increased, the changes in material values between those temperatures should be transferred to the ANSYS program for both electromagnetic and thermal analysis. Solving the problem should be done sequentially. First, the electromagnetic analysis should be resolved harmonically, and then the thermal analysis based on time. Finally, the electromagnetic analysis should be repeated at various time intervals and the time-

related properties of the temperature that will affect the solution should be verified and the heat must be transferred to the iron rod.

2.2.5. Boundary conditions (Sınır şartları)

Figure 7 shows the boundary conditions applied to the inductor and the iron rod. These are the current value applied to the inductor, the irradiance value applied to the iron bar, and the insulation applied to both.

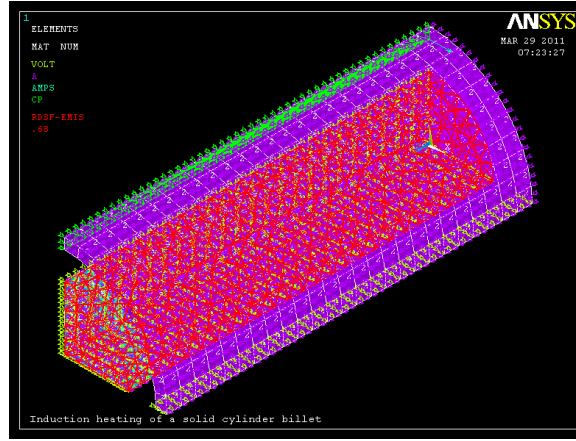


Figure 7. Boundary conditions and loadings of the 3D model (3B modelin sınır koşulları ve yüklemeleri)

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

It is known that the most important and decisive factors in the design of the induction coil are time, frequency, power, and reaching the specific temperature value for a certain point of the material to be heated. Considering these factors, the numerical analysis was solved at different current values, different frequency values, different time intervals, and by changing the position of the metal to be heated in the induction coil, and numerical analysis results were obtained.

3.1. Numerical Analysis Results at Different Current Values (Farklı Akım Değerlerinde Sayısal Analiz Sonuçları)

The length of the metallic material with a diameter of 70 mm in a 1 m long induction coil is taken as 200 mm. It is known that the current applied to the coil directly affects the system parameters. For this reason, the current value applied to the induction coil is taken as 1000 A, 2000 A, 3000 A, and 4000 A, respectively, a model is prepared and the numerical analysis results are obtained by entering the system parameters. The metallic material is positioned at the front of the coil. Temperature change in material along the z and x axis due to current change is given in Figure 8.

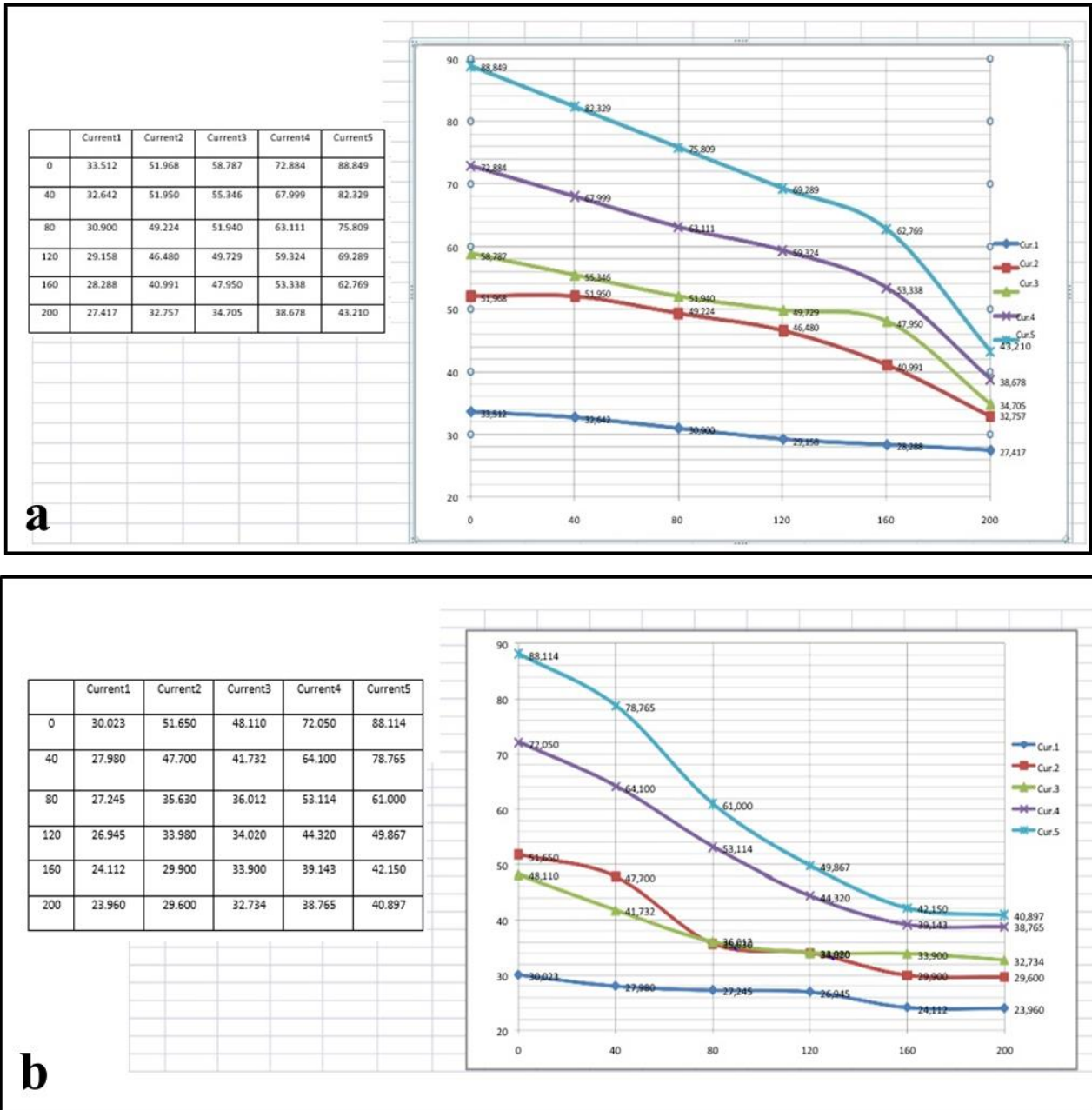


Figure 8. Temperature change in material along the z (a) and x (b) axis due to current change (Akım değişiminden dolayı z(a) ve x(b) eksenı boyunca malzemede ki sıcaklık değışimi)

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

The magnetic field strength depends on the current flowing through the induction coil, coil geometry, and coil distance. The alternating magnetic field creates eddy currents in the workpiece and other materials placed near the coil. The heat generation by eddy currents increases the temperature of the workpiece. As a result, as the current value applied to the workpiece is increased, the heat generation value will also increase, and the maximum temperature value of the workpiece will also increase.

In the studies conducted, it was seen that the simulation results and the experimental results showed a significant similarity. This situation has led to a positive opinion that induction heating modeling and simulation can be performed on the ANSYS program. This study will make a very important contribution to the design of the power unit and heating coil of the induction furnace.

As it is known, induction heating is used in a wide variety of areas, from hardening the teeth of gear wheels to welding works. In general, the heating inductor is developed based on experience and there is no data on its efficiency. With this study, efficient heating coil design will be possible

for any situation where induction heating simulations can be performed by using the electromagnetic module of the ANSYS program, provided that it is modeled correctly.

The model was created based on a specially manufactured induction coil and an Ø70mmx200 mm iron material in cylindrical geometry, whose material properties are known and which is frequently used. This model, which was created in the ANSYS package program, was solved with one, two, and three-dimensional models as a couple analysis and the results were obtained as both animation, graphic, and list values. One, two, and three-dimensional analysis results were obtained parallel to each other. This shows that the established model and analysis are reliable, there is no mismatch in the boundary and initial conditions, and it gives correct results. Three-dimensional analyzes are associated with an ideal inductor length and material dimensions that will meet the needs of the industry and numerical analyzes have been reproduced by changing the parameters of induction furnaces and materials, and it has become possible to make the necessary approaches to improve the inductor design. In the analysis, the current value was changed by keeping the material properties, frequency value, and other boundary conditions constant, and it was determined that the magnetic field intensity and heat generation amount in the material increased with the increase in the current value. The general result of the equations consisting of Ampere's law, Gauss's law, and Faraday's law specified in Maxwell's equations will be like this.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

1. V. Rudnev, Handbook of induction heating, Manufacturing Engineering and Materials Processing, Marcel Dekker, New York, 2003.
2. B. Drobrenko, O. Hachkevyc, T. Kornyskyi, A mathematical simulation of high temperature induction heating of electroconductive solids, International Journal of Heat and Mass Transfer, 50: 616-624, 2007.
3. J.Y. Jang, Y.W. Chiu, Numerical and experimental thermal analysis for a metallic hollow cylinder subjected to step-wise electro- magnetic induction heating, Applied Thermal Engineering, 27(11-12): 1883-1894, 2007.
4. H. Shen, Z. Q. Yao, Y. J. Shi, J. Hu, Study on temperature field in high frequency induction heating, Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 19(3): 190-196, 2006.
5. I. Magnabosco, P. Ferro, A. Tiziani, F. Bonollo, Induction Heat Treatment of a ISO C45 steel bar: experimental and numerical analysis, Computational Materials Science, 35: 98-106, 2006.
6. N. Xu, B. Y. Zong, Stress in particular reinforcements and overall stress response on aluminum alloy matrix composites during straining by analytical and numerical modeling, Computational Material Science, 43: 1094-1100, 2008.
7. N. Xion-Zhao, X. Min, Z. Xing-zhong, G. Yong, Numerical simulation of heat transfer and deformation of initial shell in soft contact continuous casting mold under high frequency electromagnetic field, Journal of Iron and Steel Research International, 14(6): 14-21, 2007.
8. O. Biro, K. Preis, On the Use of the magnetic vector potential in the finite-element analysis of three-dimensional eddy currents, IEEE Transactions on Magnetics 25(4): 3145–3159, 1989.
9. F. Bay, V. Labbe, Y. Favennec, J.L. Chenot, A numerical model for induction heating processes coupling electromagnetism and thermomechanics, Int. J. Numer. Methods Eng., 58(6): 839–867, 2003.
10. M. Areitioaurtena, U. Segurajauregi, I. Urresti, M. Fisk, E. Ukar, Predicting the induction hardened case in 42CrMo4 cylinders, Procedia CIRP, 87: 545–550, 2020.
11. M. Areitioaurtena, U. Segurajauregi, V. Akujärvi, M. Fisk, I. Urresti, E. Ukar, A semi-analytical coupled simulation approach for induction heating, Adv. Model. Simul. Eng. Sci., 8(14): 1-19, 2021.
12. T.A. Jankowski, N.H. Pawley, L.M. Gonzales, C.A. Ross, J.D. Journey, Approximate analytical solution for induction heating of solid cylinders, Appl. Math. Model., 40(4): 2770–2782, 2016.
13. M. Eroğlu , İ. Esen and M. A. Koç, Sonlu elemanlar yöntemi kullanarak demiryolu bojilerinin titreşim analizi, İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi, 7(1): 60-67, 2018.
14. M Eroğlu, MA Koç, İ Esen, R Kozan, Train-structure interaction for high-speed trains using a full 3D train model, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 44(1): 48, 2022.
15. H.M. Ünver, İndüksiyonlu çelik tav fırınlarında güç ünitelerinin PLC ile denetimi, Doktora Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, Türkiye, 2004.
16. Ansys, Ansys Emag, <https://www.ansys.com>, 2010.