

EDİTÖR

Prof. Dr. Selahattin BARDAK

**MAKİNE
MÜHENDİSLİĞİ**

Alanında Araştırmalar ve Değerlendirmeler

**MART
2025**

İmtiyaz Sahibi • Yaşar Hız
Genel Yayın Yönetmeni • Eda Altunel
Yayına Hazırlayan • Gece Kitaplığı
Editör • Prof. Dr. Selahattin BARDAK

Birinci Basım • Mart 2025 / ANKARA

ISBN • 978-625-388-238-9

© copyright

Bu kitabın yayın hakkı Gece Kitaplığı'na aittir.
Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan
hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Gece Kitaplığı

Adres: Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak Ümit Apt
No: 22/A Çankaya/ANKARA Tel: 0312 384 80 40

www.gecekitapligi.com
gecekitapligi@gmail.com

Baskı & Cilt
Bizim Buro
Sertifika No: 42488

Makine Mühendisliği Alanında Araştırmalar ve Değerlendirmeler

Mart 2025

Editör:
Prof. Dr. Selahattin BARDAK

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1

SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN METALİK BİYOMALZEMELERİN KOROZYON ÖZELLİKLERİ

Mevra ASLAN ÇAKIR, Hasan GÜNER1

BÖLÜM 2

MOTOSİKLET JANTI CAD MODELLERİNİN OLUŞTURULMASININ OTOMASYONU

Hakan MUMCU.....23

BÖLÜM 3

KÖPRÜLÜ KREN SİSTEMLERİNİN DESTEK AYAKLARINDAKİ BURKULMA DEFORMASYONUN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Engin ERBAYRAK43

BÖLÜM 4

AL 1050-H14 SAC LEVHALARININ SPIF YÖNTEMİ İLE ŞEKİLLENDİRİLMESİNDE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN İNCELENMESİ

Hakan MUMCU.....55

BÖLÜM 1

SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN METALİK BİYOMALZEMELERİN KOROZYON ÖZELLİKLERİ

Mevra ASLAN ÇAKIR¹

Hasan GÜRER²

1 Dr. Öğr. Üyesi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, maslan@erzincan.edu.tr, Orcid:0000-0002-3826-8390.

2 Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, Orcid: 0009-0003-8954-2155.

Giriş

Biyomedikal alanda kullanılan metalik biyomalzemelerin özelliklerinin geliştirilmesi hem uzun ömürlü ve dayanıklı hem de doğal dokuların karmaşık yapılarını taklit edebilen malzemelere olan ihtiyaç sebebiyle son yıllarda önem kazanmıştır (Davoodi vd., 2022). İleri imalat yöntemleri arasında sıkça kullanılan Seçici Lazer Ergitme (SLM) yöntemi, yüksek hassasiyet ve mükemmel mekanik özelliklere sahip karmaşık metalik bileşenler üretmek için yeni bir yöntem olarak ortaya çıkmıştır. Bu yöntemde metalik tozları katman katman eritmek ve birleştirmek için yüksek güçlü bir lazer kullanır ve geleneksel üretim yöntemleriyle elde edilmesi zor veya imkânsız olan karmaşık geometrilerin oluşturulması mümkündür (Jafari vd., 2028; Zhou vd., 2019; Soni vd., 2024). SLM yoluyla üretilen metalik biyomalzemeler, implant ile çevreleyen doku arasındaki osseointegrasyonu iyileştirme ve belirli hasta ihtiyaçlarını karşılamak üzere tasarlanmış kişiselleştirilmiş implantlar elde etme yeteneği dahil olmak üzere birçok avantajı vardır (Hassanin vd., 2018). SLM ile üretilen biyomalzemeler genellikle ortopedik, diş ve kardiyovasküler implantlarda kullanılır. Biyomalzemelerin mukavemet, sertlik ve yorulma direnci gibi mekanik özellikleri doğal kemik veya doku ile yakından uyumlu olmalıdır (Aufa vd., 2024; Jalalivd., 2023). SLM ile üretilen biyomalzemeler hastalar için gelişmiş işlevsellik, daha hızlı iyileşme süreleri ve daha uzun süreli sonuçlar vaat eden yeni nesil metalik implantların geliştirilmesine olanak sağlar. Son teknoloji ile tıp alanının benzersiz taleplerinin birleşimi, SLM tarafından üretilen metalik biyomalzemeleri modern tıp alanının birçok uygulama alanında kullanılmasını sağlamıştır (Singh vd., 2020; Yap vd., 2015; Chalicheemalapalli vd., 2024). Şu anda, SLM yöntemi biyometalik implantlar için çoğunlukla doku onarımı, diş hekimliği, cerrahi aletler ve ortopediyi değiştirmeye odaklanmıştır. Gelecekte SLM yöntemiyle üretilen metallerin uygulama alanlarında, biyomedikal alanda implantların geliştirilmesi ve biyoelektronik uygulamalarda kullanımı artacaktır. SLM yönteminde kullanılan metal tozları arasındaki etkileşim, artık gerilimin kontrolü, dış ve iç kusurlar ve diğer teknik sorunların, insan vücudunun mikro ortamına ve anatomik yapısına uyacak şekilde optimize edilmesi gerekmektedir. SLM yönteminin doğruluğu şu anda eksik olmasının sebebi, SLM üretiminde her katman arasındaki bağın kompakt olduğu, oluşacak kusurların ürün yoğunluğunu ve mukavemetini etkilediği ve üretilen ürünlerin özelliklerinin düşük performansla sebep olduğu katman katman işlemi benimsemiştir (Aufa vd., 2024; Hu vd., 2023).

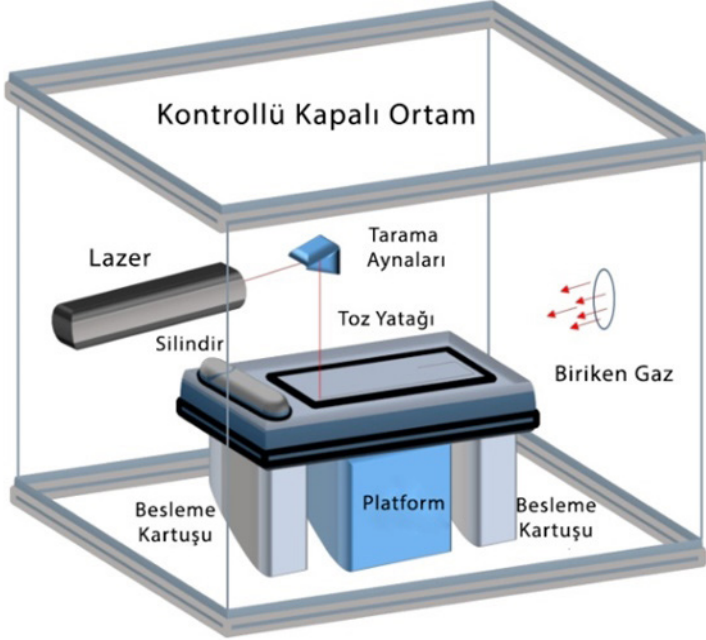
Literatürde SLM ile üretilmiş metalik biyomalzemelerin özelliklerini incelemek için yapılan bir çalışmada, yük taşıyan uygulamalardaki SLM ile üretilen Ti6Al4V'deki stres kalkanı sınırlamalarının sorunu üzerine çalışılmıştır. Bu sorunu gidermek amacıyla malzemelere yüzey kaplama

işlemi ile hidroksiapatit kaplanmış, yüzey kaplaması kemik rejenerasyonunu artırmıştır. HA (hidroksiapatit) kaplanmış SLM ile üretilen Ti6Al4V malzemesinde implantın biyouyumluluğunu, HA nanokristallerindeki artış implantların yüzeyinde osteointegrasyonunu artırarak etkilemiştir (Aufa vd., 2024). SLM ile üretilmiş CoCrMo alaşımının korozyon özelliklerinin incelendiği bir başka çalışmada, H_2O_2 'nin konsantrasyonuna bağlı olarak biyomedikal malzemenin bozunma davranışı üzerinde ikili etkiye sahip olduğunu göstermiştir. H_2O_2 genellikle insan vücuduna biyomedikal malzeme implantı yerleştirildikten sonra gelişir. SLM ile üretilmiş CoCrMo alaşımı için, kritik bir H_2O_2 konsantrasyonu vardır, bunun altında korozyon potansiyeli konsantrasyon arttıkça pozitif olarak kayar, pasif film oluşumunu kolaylaştırır ve bunun üstünde, film, filmin bileşimindeki değişiklik nedeniyle daha az koruyucu hale gelir (Hu vd., 2022). SLM yöntemiyle üretilen paslanmaz çelikler ilgili bir çalışmada, paslanmaz çeliklerin korozyonuna, özellikle MnS inklüzyonları neden olmasından dolayı, seçici lazerle ergitme yöntemiyle üretilen östenitik paslanmaz çelik 316L'nin MnS içermediği ve bu nedenle daha üstün korozyon direncine sahip olduğu belirlenmiştir (Chao vd., 2017). Bir başka çalışmada, SLM ile üretilen AISI 316L paslanmaz çeliğin elektrokimyasal davranışını ve bu davranışı benzer kimyasal bileşime sahip haddelene paslanmaz çelikleriyle karşılaştırmışlardır. Elektrokimyasal testler, nötr pH'lı %3,5 NaCl çözeltisi ve pH 1.8 olan çözeltilerde gerçekleştirilmiştir. Makro ölçekte, SLM numunelerinin mikro yapısı lazer tarama desenine bağlı olarak erime havuzlarının üst üste binen bir ağı şeklinde gözlemlenmiştir. Mikro ölçekte ise, SLM numunelerinde hücrese/olonlu dendritik bir yapı bulunmuştur. Elektrokimyasal ölçümler, SLM paslanmaz çeliğinin her iki çözeltide de daha geniş bir pasif aralık gösterdiğini ve oksit filminin koruyucu özelliklerinin daha yüksek olduğunu ortaya koymuştu (Andreata vd., 2019). SLM ile hazırlanan Ti6Al4V alaşımının ve karşılaştırma amacıyla ticari Grade 5 numunenin korozyon davranışını incelemek için elektrokimyasal testlerin gerçekleştirildiği bir çalışmada, SLM ile üretilen numunenin Grade 5 numuneye göre daha zayıf korozyon direncine sahip olduğunu göstermiştir. Mikroyapı çalışmaları, SLM ile üretilen numunenin, Grade 5 numunesindeki tipik $\alpha+\beta$ mikroyapısının aksine, baskın iğnemsiz α' martenzit ve bazı önceki β tanelerinden oluştuğunu göstermiştir. SLM ile üretilen numunenin olumsuz korozyon direnci, mikroyapıdaki iğnemsiz α' miktarının önemli ölçüde fazla olması ve Grade 5 numuneye kıyasla daha az β -Ti fazı ile ilgili olduğu sonucuna varılmıştır (Dai vd., 2016). Farklı düzlemlere sahip Ti6Al4V alaşımının korozyon direncini belirlemek için, bu malzemeye yüzey özelliklerini belirlemek amacıyla çeşitli analizler yapılmıştır. Elektrokimyasal korozyon analizi sonuçlarında, XY düzleminin 1 M HCl çözeltisinde XZ düzleminin daha iyi bir korozyon direncine sahip olduğunu göstermiştir. %3,5 NaCl çözeltisinde ise küçük bir fark gözlem-

lenmiştir. Bu durum, farklı düzlemlerin daha sert çözeltisinde korozyon direncinde belirgin farklar gösterdiğini ortaya koymuştur. XZ düzleminde malzemenin daha düşük korozyon direncine sahip olduğu, bu düzlemde daha fazla α' martensiti ve daha az β -Ti fazının bulunmasından korozyon direncinin etkilendiği belirlenmiştir (Dai vd., 2016).

2. SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİ

Eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan seçici lazer ergitme (SLM), 3 boyutlu üretim yöntemleri arasında kullanılan ileri imalat yöntemlerinden biridir. SLM, karmaşık geometrilere ve içyapılara sahip neredeyse tam yoğunluklu nesnelerin veya ince parçaların üretimini sağlayan yenilikçi teknoloji modern bir imalat süreci sunmaktadır (Yadroitsava vd., 2015). SLM yöntemi, toz haldeki metal malzemenin yüksek yoğunluklu bir lazer güç kaynağı yardımıyla katman katman ergitilip net şekle yakın üç boyutlu bir parça üretilmesi prensibine dayanmaktadır (Popovich vd., 2015). Seçici Lazer Ergitme (SLM), 2 boyutlu katmanları belirli bir yapı yönünde istifleyip birleştirerek neredeyse hiçbir geometrik kısıtlama olmaksızın 3 boyutlu fiziksel modeller, parçalar ve araçlar üretebilen bir katkı üretim teknolojisidir. İşlem, geleneksel metal tozları kullanılarak tasarım verilerinden doğrudan neredeyse %100 yoğun parçalar üretebilir (Kruth vd., 2004). Ergitme yatağına eşit bir metalik toz tabakası dağıtılır ve bu tabakaya oksidasyonu önlemek için koruyucu bir inert gaz (tipik olarak argon, helyum ve/veya nitrojen) ortamı oluşturulur (Wirth vd., 2021; Amano vd., 2021; Pauzon vd., 2020; Braun vd., 2019). Oksidasyon süreci sırasında, çatlama veya gözeneklilik gibi istenmeyen mikro yapısal kusurlar meydana gelebilir (Yap vd., 2015). Kapalı bir ortamda koruyucu gaz ile doldurulan yatak, daha sonra bir CAM yazılımı tarafından oluşturulan bireysel katman izlerinin takip edilmesi amacıyla bir lazer ışınına maruz bırakılır. Lazer ışını, toz parçacıklarını hızla eriterek, üç boyutlu yapının her bir katmanını katılaştırır. Toz soğudukça, ergitme yatağının destekleyici pistonu aşağıya indirilir ve yatak, bir silindir ile yeniden toz ile doldurulmak üzere hazırlanır; bu işlem, parça tamamlanana kadar sürekli olarak tekrarlanır. Parça üretildikten sonra, yapı platformunu taşıyan piston, makinenin masa seviyesine kadar yükseltilir. Kullanıcı, kalan metal tozunun geri kazanılması amacıyla fazla tozu bir fırça veya vakum yöntemiyle temizleyebilir. Bu işlem, kullanıcının tamamlanan parçayı serbest bırakmasına imkan tanır. Yapı plakasından parça çıkarma işlemi, bir şerit testere veya bir telli elektrik de şarj makinesi (EDM) ile manuel olarak gerçekleştirilir (Ralls vd., 2022). Şekil 1'de SLM üretim sürecinin şematik resmi verilmiştir.



Şekil 1. Lazer Toz Yatak Füzyonunun Şeması (Ralls vd., 2020)

SLM üretim süreci, Tablo 1’de görüldüğü gibi, çeşitli üretim süreci parametreleri ve malzemelerin fiziksel davranışlarını etkiler. Fiziksel özellikler, lazer parametreleri, tarama stratejisi, işlem sıcaklığı, çevresel faktörler ve malzemenin özelliklerine bağlı olarak değişir. Lazer parametreleri, lazer gücü, odak çapı, darbe süresi ve darbe frekansı gibi faktörlerden etkilenir. Tarama stratejisi ise tarama hızı, tarama aralığı ve desen gibi öğeleri kapsar. Bu parametrelerin herhangi birinde yapılan bir değişiklik, tarama stratejisinin dinamiğini etkileyebilir. İşlem sıcaklığı, üretim sırasındaki yapı tablası, toz yatağı, toz yeniden kaplama, bir inert gazın sıcaklığını ve hacim başına giriş enerjisini, yani bir parçanın üretimi sırasında hacimsel ED (enerji yoğunluğu)’yi içerir. Destek yapısı, parçadan yapı tablasına ısı iletiminde önemli rol oynadığından, ürün segmenti sıcaklığı ve eylem bölgesinin soğutma hızı da destek yapısına bağlıdır (Hanzl vd., 2017). İnert gaz, oksijen konsantrasyonu, gaz akış hızı ve hazne sıcaklığı, çevresel parametreleri belirleyen faktörlerdir. Malzemenin fiziksel davranışı, parçacık boyutu, şekli ve boyut dağılımı gibi malzemenin morfolojik özelliklerine bağlı olarak değişir. Ayrıca, malzemenin metalürjik özellikleri, özgül ısı, ısı iletkenlik, erime sıcaklığı gibi termal parametrelerle etkileşim içerisinde. Bir parçanın imal edilmesinde yapı tablası malzemesi ısı iletim hızının düzenlenebileceği önemli bir malzemedir. Bahsi geçen üretim parametreleri içerisinde, lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı ve katman kalınlığı, be-

lirli bir malzemenin fiziksel davranışını belirleyen temel faktörlerdir. Son yıllarda istenmeyen ürün kusurlarına yol açan ciddi ürün kalitesiyle ilgili sorunlar ortaya çıkmıştır. Bu kaliteyle ilgili sorunların üstesinden gelmek için artık bu alanlarda iyileştirmeler gereklidir (Pal vd., 2018).

Tablo1. SLM üretim sürecinde malzemelerin fiziksel davranışlarınaçesitli etki eden işlem parametreleri (Hanzl vd., 2017)

İŞLEME PARAMETRELERİNİN MALZEMELERİN FİZİKSEL DAVRANIŞLARI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ				
LAZER PARA-METRE-LERİ	TARA-MA STRA-TEJİ-Sİ	İŞLEM SICAKLIĞI	ÇEVRESEL KOŞUL	MALZEME ÖZELLİKLERİ
Lazer gücü	Tarama hızı	Tepsi yapma sıcaklığı	İnert gaz	Toz parçacık şekilleri
Odak çapı	Tarama aralığı	Toz yatak sıcaklığı	Oksijen seviyesi	Toz parçacık boyutları
Darbe süresi	Tarama deseni	Yeniden kaplama sıcaklığı	Gaz akış oranı	Boyut dağılımı
Darbe frekansı		Isi iletimi için destek tasarımı	Üretim odası sıcaklığı	Toz tabakasının kalınlığı
		Enerji yoğunluğu		Malzemenin metalurjik özellikleri
				Yapı tablaa malzemesi

Seçici lazer ergitme yönteminin avantajları:

- İşlenmiş standart metalin yoğunluğu %99'u aşmaktadır.
- İyi mekanik özelliklerle geleneksel işlem yöntemlerine eşdeğerdir.
- Parçalar daha sonraki kaynaklama için kullanılabilir.
- SLM, özellikle karmaşık geometrilere sahip malzemelerin üretiminde kullanılır.
- Harmanlanmış metal veya metal-seramik tozların kullanımıyla çok malzemeli üretime olanak tanır.
- SLM fonksiyonel olarak derecelendirilmiş üretime uygundur. Örneğin, SLM yöntemi, manganez (Mg) bazlı ve titanyum (Ti) bazlı malzemeleri birleştirerek, kemik yerine biyomedikal malzemeler oluşturmak için kullanılır.

- 3 boyutlu malzeme üretiminde istenilen mekanik özellikler elde edilebilir.
- Diğer yöntemlere göre daha iyi yüzey kalitesi elde etmek mümkündür.

Seçici lazer ergitme yönteminin dezavantajları:

- Yüksek fiyat
- Korozyona karşı hassas
- EBM yönteminden daha düşük tarama hızı
- Parçalar ısıtıl işlem sonrası gerilmelere sahiptir.
- Metal parçaların ağırlığı ve yüksek sıcaklıktaki bozulmaları nedeniyle yapı destek malzemesinin kullanılması gerekir (Gao vd., 2022; Ahmadi vd., 2022; Buj-Corral vd., 2020).

3.METALİK BİYOMALZEMELER

Metaller, yüksek elektriksel ve termal iletkenlikleri ile mekanik özellikleri sayesinde biyomalzeme olarak kullanılır. Bazı elektronlar metallerde serbest hareket edebildiğinden, elektriksel yük ve ısıyı hızla iletebilirler. Serbest hareket eden elektronlar, pozitif metal iyonlarını bir arada tutarak bağlayıcı bir kuvvet oluşturur. Bu çekim, çoğu metalin yüksek özgül ağırlığını ve yüksek erime noktalarını açıklayan sıkı atomik düzenlemeyle desteklenir. Metalik bağ, yönsüz olduğu için metal iyonlarının yerleri, kristal yapıyı bozmadan değiştirilebilir ve bu da malzemenin plastik şekilde şekil alabilmesine yol açar. Bazı metaller, üstün mekanik özellikleri ve korozyon direnci nedeniyle ortopedik uygulamalarda, örneğin kalça ve diz eklemleri, kemik plakaları ve vidalar gibi kırık iyileşme yardımcıları, omurga destek cihazları ve diş implantları gibi sert doku protezlerinde yaygın olarak tercih edilir. Ayrıca, bazı metalik biyomalzemeler, vasküler stentler, kateter rehber telleri, ortodontik tel dizileri ve koklea implantları gibi cihazlarda önemli bir kullanım alanına sahiptir. İnsan tıbbi için tasarlanan ilk metal alaşımı ise, özellikle kemik kırıkları için kullanılan “vanadyum çeliği” olup, bu alaşım, Sherman plakaları ve vidaların üretiminde kullanılmıştır. İmplant üretmek için alaşımlar yapmak için kullanılan demir (Fe), krom (Cr), kobalt (Co), nikel (Ni), titanyum (Ti), tantal (Ta), niyobyum (Nb), molibden (Mo) ve tungsten (W) gibi çoğu metal vücut tarafından yalnızca çok az miktarda tolere edilebilir. Bazı metalik elementler, vücutta doğal olarak bulunmalarına rağmen, örneğin kırmızı kan hücrelerinin işlevi (Fe) veya B12 vitamininin üretimi (Co) için gerekli olsalar da aşırı miktarlarda birikmeleri durumunda toksik olabilirler. Metal implantların biyouyumluluğu, bu implantların biyolojik ortamlarda zamanla aşındırılabilmesi nede-

niyle önemli bir problem teşkil etmektedir. Korozyonun etkileri, implant malzemesinin bozulmasına yol açar, bu da implantı zayıflatır ve korozyon ürünlerinin çevredeki dokular ve organlar üzerinde zarar verici etkiler oluşturmaya sebep olur (Park ve Bronzino, 2002).

3.1. Paslanmaz Çelikler

Paslanmaz çelikler, iyi mekanik özellikleri, korozyon direnci, biyouyumluluk ve düşük fiyatları nedeniyle kardiyovasküler stentler/valfler, ortopedik protezler, diş hekimliği ve biyomedikalde kullanılan implantlar üretmek için yaygın olarak bir biyomalzeme olarak kullanılır. Ancak, antibakteriyel özelliklerin eksikliği, biyomedikal alanlardaki en büyük zayıflıklarından biridir. Nisshin Steel (Tokyo, Japonya), 1990'ların sonlarında bakır içeren ilk antibakteriyel paslanmaz çeliği geliştirmiştir. Bu yüzyılın başlarından itibaren çok sayıda araştırma yapılmış ve şu ana kadar feritik, östenitik, martensitik ve dubleks antibakteriyel paslanmaz çelikler gibi farklı bakır veya gümüş içeren antibakteriyel paslanmaz çelik türleri incelenmiştir (Zhang vd., 2021).

Paslanmaz çeliklerin kullanımı, artık nikelin insan vücudu üzerindeki toksik etkileri, gerilmeli korozyon çatlaması ve çatlak korozyonuna karşı hassasiyet nedeniyle yük taşıma uygulamalarında sadece geçici cihazlarla sınırlıdır. Ancak, kanda yeterli oksijen sağlanabilen koroner arterdeki stentler, yıllardır başarılı bir şekilde kullanılan kalıcı cihazlardır. 316L paslanmaz çeliklerin maliyeti, diğer yaygın metalik biyomalzemelere kıyasla çok daha düşük olup, fiyatı onların onda biri ile beşte biri arasındadır. Bu, paslanmaz çeliklerin büyük miktarlarda metalik biyomalzemeler olarak tasvir edilmesinin nedenidir, ancak kalite açısından paslanmaz çelikler kobalt-krom alaşımları ve titanyum alaşımlarıyla karşılaştırıldığında daha düşüktür. Tıbbi ve cerrahi kullanımlar için paslanmaz çeliklerin ASTM standartları Tablo 2 'de verilmiştir (Teoh, 2024).

Tablo 2. Tıbbi ve Cerrahi Kullanımları için Paslanmaz Çeliklerin ASTM Standartları (Teoh, 2024)

Türü	İçeriği
F 138-97	İşlenmiş 18Cr-14Ni-2.5Mo Paslanmaz Çelik Çubuk ve Tel
F 139-96	İşlenmiş 18Cr-14Ni-2.5Mo Paslanmaz Çelik Sac ve Şerit
F 745-95 18Cr-12.5Ni-2.5Mo	Döküm ve Çözelti Tavlama İçin Paslanmaz Çelik
F 899-95	Paslanmaz Çelik Kütük, Çubuk ve Tel

F 1314-95	İşlenmiş N Güçlendirilmiş-22Cr-12.5Ni-5Mg-2.5Mo Paslanmaz Çelik Çubuk ve Tel
F 1586-95	İşlenmiş N Güçlendirilmiş-21Cr-10Ni-3Mg-2.5Mo Paslanmaz Çelik Çubuk

3.2. Kobalt Krom (CoCr) Alaşımları

Son 20 yıl içinde, özellikle dökme CoCrMo alaşımı diş hekimliği alanında ve daha yakın zamanda yapay eklem protezlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Dövülmüş CoNiCrMo alaşımı ise daha yeni bir malzeme olup, diz ve kalça gibi yüksek yük taşıyan eklem protezlerinin üretiminde tercih edilmektedir. Dökme CoCrMo, dövülmüş CoCrWNi ve dövülmüş CoNiCrMo alaşımları, cerrahi implant uygulamaları için ASTM standartlarında tanımlanmıştır. Şu an implant üretiminde yalnızca döküm CoCrMo ve dövülmüş CoNiCrMo alaşımları yaygın olarak kullanılmaktadır. Aşınma, korozyon ve sürtünme nedeniyle metalik ürünler, protez organlara ve çevre dokulara zarar verebilir. İn vitro çalışmalar, partikül olarak kobalt elementinin insan osteoblast benzeri hücreler üzerinde toksik etkiler gösterdiğini ve kültür ortamında kollajen, osteokalsin ve alkali fosfataz sentezini engellediğini ortaya çıkarmıştır. Ancak, partikül krom ve kobalt-krom alaşımları, önemli toksik etkiler göstermeyen hücre hatları tarafından iyi tolere edilmektedir (Findik, 2018).

CoCrMo biyomedikal alaşımları, toz metalurjisi, dövme ve hassas döküm tekniği gibi çeşitli üretim süreçleriyle üretilebilir. Bu yöntemler arasında yatırım döküm tekniği, ortopedik cerrahi operasyonlarında kullanılan implantların üretiminde umut vadeden yöntemdir. Hassas döküm yöntemi, diğer tekniklere göre en büyük avantajını, çok düşük maliyetle karmaşık şekilli parçaların, son boyutlara oldukça yakın ölçü ve toleranslarla üretilebilmesinde gösterir. CoCrMo biyomedikal alaşımları, sahip oldukları mukavemetleri, sertlikleri, toklukları, korozyon ve aşınma dirençleri nedeniyle ortopedik implantların üretiminde yaygın olarak kullanılır. CoCrMo alaşımlarının, döküm halinde mikro gözeneklilik, kimyasal homojensizlik ve büyük tane boyutu gibi döküm kusurlarının yanı sıra düşük sünekliğe sahip olduğu iyi bilinmektedir. Zayıf süneklikleri uygun ısıtma işlemi ve alaşım ilaveleriyle geliştirilebilir (Yıldırım ve Keleş, 2018).

3.3. Ti ve Ti Alaşımları

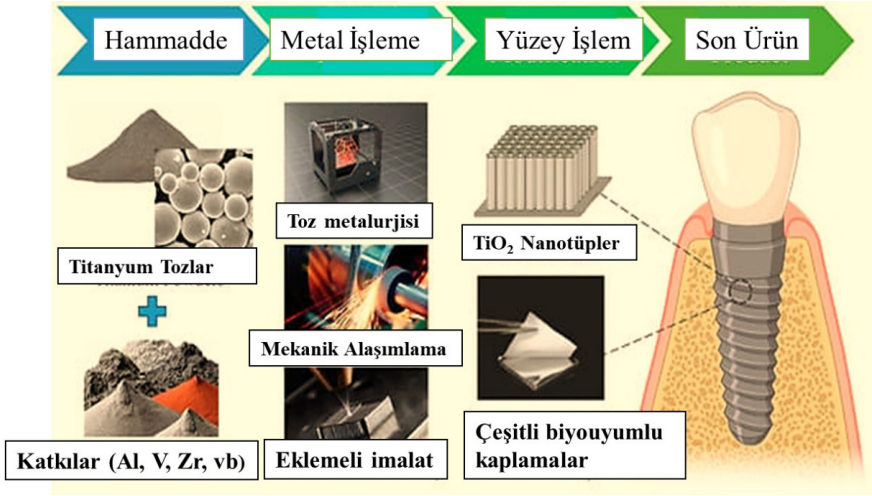
Titanyum, paslanmaz çelikler ve kobalt-krom alaşımlarına göre daha iyi özgül mukavemet, korozyon direnci ve biyouyumluluk sağlasa da tribolojik performans açısından daha zayıf kalmaktadır. Demir içermeyen bir metal olan titanyumun elastik modülü, paslanmaz çelik ve kobalt-krom

alaşımlarının elastik modülünün yaklaşık yarısı kadar bir değere sahiptir. Ayrıca, oksijenle hızlı bir şekilde reaksiyona girerek oda sıcaklığında oldukça stabil bir pasif film oluşmasına neden olur (Teoh, 2004). Titanyum alaşımları, onları çok çeşitli uygulamalar için tercih edilen bir malzeme haline getiren benzersiz özellikler sunar. Yüksek mukavemet-ağırlık oranları, havacılık ve tıbbi implantlar gibi ek ağırlık olmadan yüksek dayanıklılık gerektiren alanlarda mükemmel bir seçenek olmalarını sağlar. Ayrıca, oksijen, su ve çeşitli kimyasallara karşı üstün korozyon direnci, onları insan vücudu veya deniz suyu gibi aşındırıcı ortamlarda kullanılabilir kılar. Bunun yanı sıra, biyouyumlulukları, titanyum alaşımlarının toksik olmadığını ve insan vücudu tarafından iyi tolere edildiklerini gösterir, bu da onları tıbbi implantlar ve protezler için ideal hale getirir. Ayrıca, düşük ısı iletkenlikleri, yüksek yorulma direnci, yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklılıkları ve manyetik olmayan özellikleri, ısı yalıtımı, tekrarlanan yükleme ve boşaltma, yüksek sıcaklık dayanımı ve tıbbi görüntüleme gibi uygulamalarda kullanılmalarını sağlar. Son olarak, nikel-titanyum (NiTi) gibi bazı titanyum alaşımları, şekil hafızası ve süperelastisite özellikleri göstererek, ısıtıldıklarında veya büyük deformasyonlara uğradıklarında orijinal şekillerine geri dönebilirler (Teoh, 2004).

Isıl işlem sıcaklığı ve alaşım elementleri üzerindeki etkilerine bağlı olarak, titanyum alaşımları alfa (α), alfa-beta (α - β) titanyum ve beta (β) titanyum alaşımları olarak üçe ayrılır. Alfa (α) Ti alaşımları, alüminyum, oksijen, nitrojen veya karbon gibi büyük miktarda α -dengeleyici alaşım elementleri içerir. Titanyumun α alaşımlarının sınırlaması ısıl işlem uygulanamaz olmasıdır ancak bunlar genellikle çok kaynaklanabilir. Bu alaşımlar, düşük ila orta seviyede mukavemete, iyi çentik tokluğuna ve makul düzeyde sünekliliğe sahip olup, kriyojenik sıcaklıklarda üstün özellikler sergiler. Kalay veya zirkonyum gibi eklemelerle daha da güçlendirilebilirler. Bu metaller, alfa ve beta fazlarında önemli bir çözünürlük gösterir ve bu elementlerin eklenmesi dönüşüm sıcaklıklarını büyük ölçüde etkilemediği için genellikle nötr eklemeler olarak kabul edilir. Alfa-beta (α - β) titanyum alaşımları, %4-6 oranında molibden, vanadyum, tungsten, tantal ve silisyum gibi β -fazı stabilizatörleri içerir. Bu elementlerin eklenmesi, alaşımda bulunan β -fazının miktarını yükseltir. Bu nedenle, bu alaşımlar ısıl işlemle güçlendirilebilir ve çökme sertleştirilmesi ile önemli ölçüde dayanıklılık kazanır (Agripa ve Botef, 2019). Beta alaşımları, alfa veya alfa-beta alaşımlarına kıyasla daha fazla sertleştirilebilirliğe sahip olarak kolayca ısıl işleme tabi tutulabilir. Bu alaşımın oda sıcaklığı dayanımı yüksek olsa da yüksek sıcaklık dayanımı zayıftır. Çözeltiye alınmış durumda beta alaşımlarından mükemmel şekillendirilebilirlik beklenebilir. Ticari olarak temin edilebilen birkaç beta alaşımına örnek olarak Ti3Al8V6Cr4Mo4Zr, Ti45Sn6Zr115Mo, Ti8Mo8V2Fe3Al ve Ti13V11Cr3Al verilebilir (Ma-

jumdar ve Manna, 2015). Titanyum biyomalzemelerinin sağlık sektörünün geleceğini şekillendiren bazı temel uygulamaları şunlardır:

Diş İmplantları: Titanyumun diş implantları ve ortodontik diş tellerine entegrasyonu, her iki alanda da büyük bir yenilik yaratmış ve hasta sonuçları ile konforunu önemli ölçüde geliştirmiştir. Titanyumun diş hekimliğinde kullanımı, kemik ile titanyum arasındaki doğrudan bağlantıyı sağlayan osseointegrasyonu keşfeden Dr. Per-Ingvar Brånemark'ın öncü çalışmalarıyla başlamıştır. Bu keşif, sadece diş implantlarının kullanımını dönüştürmekle kalmamış, aynı zamanda ortodontik uygulamalarda titanyum kullanımını mümkün kılmıştır. Ağız ortamı, diş implantları ve ortodontik cihazlar için zorlayıcı ve değişken bir ortam sunar. Ağız içindeki pH, çeşitli yiyecek ve içeceklerin etkisiyle sürekli dalgalanır. Asidik yiyecek ve içecekler, diş minesine zarar verebilir ve diş cihazlarının yüzeyini etkileyebilir. Titanyumun yüksek korozyon direnci, bu zorluklarla başa çıkmada ve implant yüzeyinin korunmasında kritik bir rol oynar, böylece uzun süreli stabilite sağlanır. Diş hekimliğinde yaygın olarak kullanılan titanyum malzemeler arasında β -titanyum alaşımları, Ti6Al4V alaşımı, ticari saf titanyum ve Nitinol bulunmaktadır (Marin ve Lanzutti, 2023).



Şekil 2. Dental implantların üretim süreçleri (Wu vd., 2023)

Ortopedik İmplantlar: Titanyum, genellikle kalça ve diz protezleri gibi ortopedik implantlarda kullanılır. Yüksek mukavemeti ve korozyona karşı dirençli olması, onu yük taşıyan implantlar için özellikle faydalı kılar (Abd-Elaziem vd., 2024). Titanyum ve alaşımları, özellikle CP Ti (α) ve Ti6Al4V ($\alpha + \beta$) gibi ortopedik kemik implantları olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak, CP Ti ve TC4'ün gelişimi, yüksek elastik modül ve toksik element olan vanadyum (V) nedeniyle sınırlı kalmıştır. Düşük

elastik modüle sahip ve toksik olmayan β -Ti alaşımları, bu sorunları çözmek için tasarlanmıştır. Ortopedik implantlarda elastik modül, en önemli fiziksel özelliklerden biridir. İnsan kemiğinin elastik modülü maksimumda 30 GPa iken, Ti alaşımlarının elastik modülü genellikle 80 GPa'nın üzerindedir. Yüksek elastik modüllü bir metal implant, “stres kalkanı” etkisi yaratabilir ve bu da iyileşmeyi olumsuz etkiler. “Stres kalkanı” etkisi, elastik modül uyumsuzluğu nedeniyle bir kemik ile yakınındaki implant arasında dengesiz yük dağılımı ile ilişkilidir. Metal implantlar, genellikle kemiklerden daha serttir, bu da elastik modül uyumsuzluğunun kemik rezorpsiyonuna ve implantın gevşeyip başarısız olmasına yol açmasına neden olabilir. β -Ti alaşımlarının elastik modülü, kortikal kemikle uyumludur. Ayrıca, gözenekli Ti alaşımlarının, düşük elastik modüllü Ti alaşımları geliştirmek için potansiyel seçenekler sunduğu bulunmuştur (Shao vd., 2021).

Omurga Cihazları: Ti alaşımları, çeşitli omurga rahatsızlıklarını tedavi etmek için omurga füzyon operasyonlarında kullanılır. Bu malzeme, omurgadaki kafesler, çubuklar ve vidalar gibi implantlar için tercih edilir (Abd-Elaziem vd., 2024).

Kardiyovasküler Cihazlar: Titanyum ve alaşımlarının benzersiz özellikleri, kardiyovasküler tıpta birçok farklı uygulama alanı bulmasına olanak sağlamıştır. İlk uygulamalarından biri protez kalp kapakları ve kalp pillerinin koruyucu kılıflarının üretimiydi. Ardından, titanyum yapay kalplerde ve dolaşım destek cihazlarında kullanıldı. Son yıllarda, stentler ve oklüzyon bobinleri gibi damar içi cihazlarda şekil hafızalı titanyum-nikel alaşımı (Nitinol) kullanımına büyük ilgi gösterilmiştir. Titanyumun kardiyovasküler uygulamalardaki bir avantajı, güçlü, inert ve manyetik olmayan yapısına sahip olmasıdır. Ancak, daha ince yapılar için yeterince radyoopak olmaması, dezavantajlarından biridir (Brunette vd., 2001).

Yumuşak Doku İmplantları: Titanyum, genellikle yumuşak doku implantları için birincil malzeme olarak kullanılmaz; çünkü yumuşak dokuların esneklik ve özellikleriyle daha uyumlu olan kolajen ve çeşitli polimerler gibi malzemeler tercih edilir. Ortopedik cerrahi ve diş implantları gibi sert doku implantlarıyla daha yaygın olarak ilişkilendirilse de, titanyum bazı durumlarda yapısal destek veya ankraj sağlamak için diğer malzemelerle birlikte ya da yumuşak doku implantlarının bir parçası olarak kullanılabilir (Marin ve Lanzutti, 2023).

4. SLM İLE ÜRETİLEN METALİK BİYOMALZEMELERİN ELEKTROKİMYASAL ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Son yıllarda, biyomalzemelerin vücutta daha uzun ömürlü olmasını sağlamak için paslanmaz çelik (SS), kobalt-krom alaşımları (CoCr) ve titanyum (Ti) ile ilgili alaşımlar, en yaygın kullanılan metal malzemeler

haline gelmiştir. Metalik implantlar vücutta korozyona uğradığında, metaldeki elektron hareketi çevredeki dokularda iyonik akışa yol açarak sinir hücrelerinde hasara neden olabilir. Metal ile vücut sıvıları arasındaki potansiyel farkı, korozyonun temel tetikleyicisidir. Ancak, çözeltideki direnç veya metal yüzeyindeki oksit tabakasının varlığı, korozyon hızını sınırlayabilir. Metalik biyomalzemelerin, pasif bir film oluşumu sayesinde fizyolojik olarak inert oldukları ve bu nedenle yüksek korozyon direncine sahip oldukları bilinmektedir. Pasif ve inert oksit tabakaları vücut ortamı tarafından çevrelenmiştir ve metalik malzemelerin biyolojik olarak parçalanabilir olması nedeniyle, ortopedik implantların neden olduğu iltihaplanma, resitenoz ve stres kalkanı gibi olumsuz etkiler azalır. Metalik biyomalzemeler, galvanik korozyon, çukurlaşma, çatlak, taneler arası, stres-korozyon çatlama, korozyon yorgunluğu ve tribokorozyon veya sürtünme korozyonu gibi şu anda kullanılan alaşımlarla ilgili genel ve lokal korozyon tipleri de dahil olmak üzere çeşitli şekillerde korozyona uğrar (Dikici vd., 2015).

Galvanik korozyon, bir elektrolit ve bir elektron iletkeni bulunduğu iki farklı metalin elektrokimyasal bir reaksiyona girmesidir. İki farklı metal arasında temas olduğunda genellikle bir potansiyel farkı oluşur. Bu durumda, daha az dirençli metal daha fazla korozyona uğrarken, daha dirençli metalin korozyonu azalır; daha aktif olan metal anot (aşınacak olan) olarak işlev görürken, daha dirençli metal katot rolünü üstlenir. Galvanik serideki metaller arasındaki mesafe arttıkça, galvanik korozyon oranı da artar. Magnezyum alaşımları, yüksek miktarda ağır metal veya akı kirlenmesi sebebiyle galvanik korozyona karşı daha duyarlı hale gelir. Şiddetli galvanik korozyon, magnezyumun demir (Fe), nikel (Ni) veya bakır (Cu) gibi daha az reaktif metallerle teması sonucu ortaya çıkar, çünkü bu metaller düşük hidrojen aşırı potansiyeline sahip olup, etkin katotlar olarak görev yaparlar. Buna karşılık, aktif korozyon potansiyeli ile yüksek hidrojen aşırı potansiyelini birleştiren Al, Zn, Cd ve Sn gibi metaller çok daha az hasar vericidir ve bu nedenle magnezyum alaşımları için alaşım elementi olarak tercih edilirler (Makhlouf, 2015). Çukurlaşma korozyonu, metal yüzeyindeki koruyucu pasif filmin bozulması sonucu ortaya çıkan ve metalin yerel olarak hızla çözünmesiyle meydana gelen bir korozyon türüdür. Bu tür korozyon, pasifleştirilmiş yüzeylerde oluşabilecek yerel bir hasar biçimidir. Metal yüzeyindeki kalıntılar veya tanecik sınırları, bu yıkımın başlangıç noktası olabilir (Frankel, 1998). Yorulmalı korozyon ise, aşındırıcı bir ortamda bulunan metal bir bileşiğin döngüsel gerilimlere maruz kalmasıyla oluşur. Bu durum, korozyon ortamının (örneğin kuru inert gaz ya da vakum) bulunmadığı yorgunluktan farklıdır. Ancak, ortamın etkisi yorulmalı korozyon söz konusu olduğunda çok daha az belirgindir. Aktif veya pasif koşullar altında hemen hemen tüm metaller ve alaşımlar, yorulma ömürleri inert bir ortama göre azaldığı için sulu bir ortamda ko-

rozyona maruz kalırlar. Nemli hava bile birçok metal ve alaşım için agresif bir ortamdır. Pasif davranış gösteren alaşımlarda yorulmalı korozyona özgü transgranüler çatlaklar çukurlardan oluşmaya başlar. Fretting tribo-korozyon her zaman kimyasal, elektrokimyasal ve mekanik etkilerin eş zamanlı etkisinden kaynaklanır ve bu da korozyon koşulları altında fretting temas modlarında malzemelerin bozulmasına neden olur (Kang vd., 2023).

En önemli eklemeli üretim teknikleri arasında, SLM yöntemi biyomedikal implantlarının geliştirilmesinde kullanım açısından büyük ilgi görmüştür. SLM, odaklanmış ve bilgisayar kontrollü bir lazer ışınının sağladığı termal enerjiyi kullanarak, ardışık metal tozu katmanlarını birbiri üzerine seçici olarak eriterek karmaşık 3B parçaların üretilmesine olanak tanıyan katman bazlı bir malzeme ekleme tekniğidir. Karmaşık geometrilere sahip gözenekli yapıların üretilmesi, yüksek doğruluk ve düşük malzeme israfı birçok avantaj sağlar. Literatürde SLM ile üretilen metalik biyomalzemelerin elektrokimyasal korozyon özelliklerinin araştırılması ile ilgili yapılan bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir:

Çeşitli aşındırıcı ortamlarda biyoimplantların yüzey bozulması konusunda artan bir endişe vardır. İmplant malzemelerinin çözünmesi iç organlarda iltihabi reaksiyona neden olabilir ve ölümcül olabilir. Seçici lazerle eritilmiş Ti6Al4V malzemesinin (SLM Ti6Al4V) farklı aşındırıcı ortamlarda (NaOH, NaCl, H₂SO₄ ve yapay vücut sıvısı (SBF)) korozyon özellikleri araştırılmıştır. Elektrokimyasal korozyon testleri, potansiyodinamik polarizasyon ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi ile yapılmıştır. Sonuçlar, SLM ve döküm Ti6Al4V'un polarizasyon ve yük transfer direncinin NaOH, SBF ve NaCl'de önemli ölçüde yüksek olduğunu, buna karşın daha sert bir çözeltide (H₂SO₄) son derece zayıf korozyon direncinin meydana geldiğini göstermiştir (Sharma vd., 2020).

Seçici Lazer Ergitme (SLM), paslanmaz çelik, CoCr alaşımları ve titanyum (Ti) ile alaşımlarının özelliklerini ve yapısını geliştirmek için en önemli katkılı üretim yöntemlerinden biridir. Son yıllarda, SLM-Ti malzemelerinin çeşitli biyomedikal alanlarda üretimi, bu gelişmiş üretim sürecinin yüksek mühendislik potansiyeli nedeniyle tıpta büyük ilgi görmüştür. SLM tekniği, çeşitli parametrelerin hassas şekilde kontrol edilmesi sayesinde, özellikle mekanik, tribolojik ve korozyon özellikleri açısından eşsiz yapılar ve özelliklere sahip Ti implantlarının üretimini mümkün kılmaktadır (Mohammed vd., 2020). Yapay vücut sıvısında (Hank çözeltisi) üretilen CP-Ti ve Ti-TiB kompozitlerinin korozyon davranışları, vücut sıcaklığında elektrokimyasal ölçümler (potansiyodinamik polarizasyon eğrileri ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi) ve detaylı yapısal analizler ile sistematik bir şekilde incelenmiştir. Sonuçlar, SLM ile üretilen Ti-TiB kompozit numunelerinin Hank çözeltisindeki SLM ile üretilen CP-Ti numunelerinden daha iyi korozyon direncine sahip olduğunu göstermiştir.

Titanyum matrisinde düzgün bir şekilde dağılan bu küçük TiB ve TiB_2 parçacıkları nedeniyle, korozyon sürecinde titanyum matrisinin anodik çözünmesi erken aşamalarda belirgin şekilde kolaylaşmış ve bunu yüzeyde hızlı bir şekilde pasifleşme izlemiştir (Chen vd., 2017). Bir başka çalışmada, seçici lazer ergitme (SLM) ile üretilmiş CoCrMo alaşımı üzerine magnetron püskürtme tekniği kullanılarak biriktirilen TiN kaplamanın mikro yapısı ve kalınlığı X-ışını kırınımı (XRD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. TiN kaplamalı ve kaplamasız SLM CoCrMo numunesinin elektrokimyasal korozyon davranışı incelenmiştir. Sonuçlar, TiN kaplı yüzeyde bazı makropartiküller ve gözenekler meydana geldiğini, ayrıca TiN kaplama kalınlığının yaklaşık $1,44 \mu m$ olduğu belirlenmiştir. TiN kaplama, SLM CoCrMo numunesinin korozyon akım yoğunluğunu $19,1 nA/cm^2$ 'den $8,12 nA/cm^2$ 'ye düşürmüş ve korozyon direncini bir miktar iyileştirmiştir (Chen vd., 2024).

Seçici lazer ergitme (SLM) yöntemiyle üretilen NiTi alaşımları, karmaşık yapılarla donatılmış implant malzemelerinin yüksek doğrulukla üretilmesi nedeniyle büyük bir ilgi görmüştür. Ancak, SLM-NiTi alaşımı, implant malzemesi olarak zayıf osteojenik özellikler sergilemekte ve fazla Ni iyonu salınımına neden olmaktadır. Yapılan araştırmada, SLM-NiTi alaşımlarının biyouyumluluğunu ve korozyon direncini geliştirmek için ilk kez SLM-NiTi alaşımının yüzeyine elektrokaplama yoluyla biyoaktif dikalsiyum fosfat dihidrat (DCPD) kaplama hazırlanmıştır. Kaplama oluşturma parametrelerinin (birikim akımı ve süre) morfolojik yapısı ve korozyon direnci üzerindeki etkileri, SEM, elektrokimyasal ve daldırma testleri ile araştırılmıştır. Birikim akımı 3 mA ve birikim süresi 30 dakika olduğunda elde edilen DCPD kaplaması, düzgün ve yoğun bir yüzey yapısı sergileyerek en iyi korozyon direncine sahip olduğu tespit edilmiştir (Guo vd., 2022).

Günümüzde eklemeli imalat (AM) teknikleriyle üretilen parçalar, tıp sektöründe geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bunun başlıca sebepleri, karmaşık yapıları özel olarak tasarlayıp üretme kabiliyeti, hızlı üretim süreçleri, kullanım kolaylıkları ve yerinde üretim imkânı sunmasıdır; bu da kişiye özel, ileri teknoloji biyomedikal implantların üretimine olanak tanımaktadır. Bu parçaların, uygun mekanik dayanıklılık, biyouyumluluk, tatmin edici yüzey özellikleri ve mükemmel korozyon ve aşınma performansı gibi birçok önemli özelliği taşıması gerekmektedir (Wei vd., 2024). Eklemeli üretim (AM), mühendislik bileşenleri üretiminde yeni bir teknolojik gelişme olarak ortaya çıkmıştır. Ancak, AM'nin pratikteki en büyük zorluklarından biri, eklemeli imalatla üretilen bileşenlerin özelliklerindeki tutarsızlıktır. Bir araştırmada, seçici lazerle eritilmiş (SLM) 316L paslanmaz çeliğin (SS) korozyon performansını iyileştirmek için bir hammadde modifikasyonu stratejisi sunulmuştur. Modifiye edilmiş besleme stok

tozları, ticari-316LSS tozunun ağırlıkça %1 krom nitrür (CrN) ile bilyeli öğütülmesiyle üretilmiştir. Modifiye edilmiş toz hammadde kullanılarak (SLM-316L/CrN) üretilen SLM kuponları, yüksek oyuklanma ve pasivasyon potansiyelleri ile birlikte yarı kararlı oyuklanmanın olmaması nedeniyle önemli ölçüde iyileştirilmiş korozyon dayanımı sergilemiştir. Mikroyapısal analiz, SLM-316L'de Si, Mn ve S elementlerinin oluşturduğu ince oksit kalıntılarını, SLM-316L/CrN'de ise sadece Si ve Mn içeren oksit kalıntılarını ortaya koymuştur. SLM-316L/CrN'deki kükürt içermeyen oksit kalıntıları ve daha rafine hücresel yapı ile kimyasal bileşimdeki değişiklik, CrN katkısının korozyon direncini artırmasında etkili olmuştur (Vukkum vd., 2022).

İnsan vücudunda yer alan implantların zararlı etkilerini en aza indirmek için, biyomalzemelerin korozyon özelliklerinin gerçek bir fizyolojik ortamda incelenmesi büyük önem taşımaktadır. İnsan vücudu sıvısının gerçek oksidatif doğasını simüle etmek için bir araştırmada, SLM işlemiyle üretilen 316L paslanmaz çeliğin (SS) korozyon davranışını fosfat tamponlu tuzlu su (PBS) çözeltisindeki kompleks oluşturunca maddenin, yani sitrat iyonunun, kompleks tür oluşumu yoluyla 316L SS'nin pasivasyon davranışını güçlü bir şekilde etkilediğini göstermiştir. Ancak hızlı bir katılaşma süreci nedeniyle, eklemeli olarak üretilen metalin mikroyapısal özellikleri, geleneksel olarak üretilen muadilinininkine benzer değildir. SLM 316L SS'nin mikro yapısı, her iri tanenin içinde rafine edilmiş alt tanecikler içerdiği ve MnS oluşumunu sınırladığı gözlemlenmiştir. SLM 316L SS daha iyi oyuklanma direncine ve pasif film stabilitesine sahip olduğu belirlenmiştir (Al-Mamun vd., 2020). Bir diğer araştırmada, in vivo implantasyon için elektron ışını ergitme (EBM) ve seçici lazer ergitme (SLM) yöntemleriyle üretilen Ti-6Al-4V alaşımının korozyon direnci incelenmiştir. Kontrol olarak, işlem görmemiş bir Ti-6Al-4V alaşımı kullanılmıştır. Açık devre potansiyeli (OCP) testine göre, EBM örneği en düşük termal stabiliteye sahip olarak belirlenmiştir. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi sonucunda, SLM örneğinin korozyon direncinin düşük elektriksel potansiyel altında en yüksek olduğu görülmüştür. Potansiyodinamik polarizasyon testi, SLM örneğinin düşük elektrik potansiyeli (<1,5 V) altında en iyi korozyon direncine sahip olduğunu, EBM örneğinin ise yüksek elektrik potansiyeli (>1,5 V) altında en iyi performansı sergilediğini göstermektedir. Genel olarak EBM ve SLM ile üretilen iskeleler iyi korozyon direncine sahip ve in vivo implantasyona uygun olduğu sonucuna varılmıştır (Zhao vd., 2017).

5. Sonuç ve Öneriler

1980'lerin ortalarından itibaren, karmaşık şekilli ve yüksek kaliteli bileşenlere duyulan artan talep ile ürün atıklarının minimize edilmesi ge-

rekliliği, üç boyutlu baskı veya eklemeli üretim teknolojisinin gelişimine zemin hazırlamıştır. Eklemeli üretim süreçlerinin temelinde, dijital olarak kontrol edilebilen bir malzeme yerleştirme sistemi kullanılarak, katmanlar halinde biriktirilen materyalle yoğun üç boyutlu yapılar üretmek için bir mekanizma bulunmaktadır. Eklemeli üretim yöntemlerinden biri olan Seçici Lazer Ergitme (SLM) süreci, koruyucu bir atmosferde, önceden işlenmiş üç boyutlu bir modele dayalı olarak bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımı aracılığıyla üretilcek parçaların tasarım aşamasıyla başlar. SLM yöntemi, yapı platformuna düzgün bir şekilde yayılan ve ayarlanabilir dalga boyuna sahip bir lazer ışınından oluşan bir enerji kaynağı tarafından seçici olarak eritilen metalik bir tozu içerir. SLM yönteminde biyomodelleme, protez prosedürleri, rehabilitasyon ve doku mühendisliği alanlarında kişiselleştirilmiş implantların tasarımı ve üretimi gibi klinik uygulamalarda kullanımıyla ilgili örnekler mevcuttur. Bu teknoloji, cerrahların ameliyatlarını önceden simüle etmelerine imkân tanıyarak, daha güvenli ve doğru cerrahi müdahaleler yapılmasına yardımcı olabilir. Yapılan literatür çalışmalarında, SLM ile üretilen biyomalzemelerde gerilme kalkını etkisinin azaltılması, yüzey modifikasyonu ve tedavisi, özellikle fonksiyonel hareket ve yük taşıyan iskelet kası uygulamalarında kemik bozukluklarını tedavi etmek için potansiyel kullanımını mevcuttur. Ayrıca, implantların mükemmel biyoyumluluğu ve korozyon direnci tıbbi uygulamalar için temel gerekliliklerdir. Malzemelerin korozyon direnci, geleneksel işlenmiş yöntemlerle üretilenlere kıyasla daha zayıf korozyon direncine sahip fazların veya yapıların üretilip üretilmediğine bağlıdır. SLM ile üretilen parçaların temel yapısal özellikleri ile korozyon direnci arasındaki ilişkiyi belirlemek gereklidir. SLM ile üretilen biyomalzemelerin osseointegrasyonu artırırken ve piyasadaki geleneksel ortopedik implantları geride bırakıp, implantların gelecekteki katkı maddesi üretimi için sistematik bir strateji ve yön oluşturacaktır.

KAYNAKÇA

- Abd-Elaziem, W., Darwish, M. A., Hamada, A., & Daoush, W. M. (2024). Titanium-Based alloys and composites for orthopedic implants Applications: A comprehensive review. *Materials & Design*, 112850.
- Agripa, H., & Botef, I. (2019). Modern production methods for titanium alloys: A review. *Titanium Alloys-Novel Aspects of Their Manufacturing and Processing*, 10.
- Ahmadi, M., Tabary, S. B., Rahmatabadi, D., Ebrahimi, M. S., Abrinia, K., & Hashemi, R. (2022). Review of selective laser melting of magnesium alloys: Advantages, microstructure and mechanical characterizations, defects, challenges, and applications. *Journal of materials research and technology*, 19, 1537-1562.
- Al-Mamun, N. S., Deen, K. M., Haider, W., Asselin, E., & Shabib, I. (2020). Corrosion behavior and biocompatibility of additively manufactured 316L stainless steel in a physiological environment: the effect of citrate ions. *Additive Manufacturing*, 34, 101237.
- Amano, H., Ishimoto, T., Suganuma, R., Aiba, K., Sun, S. H., Ozasa, R., & Nakano, T. (2021). Effect of a helium gas atmosphere on the mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy built with laser powder bed fusion: A comparative study with argon gas. *Additive manufacturing*, 48, 102444.
- Andreatta, F., Lanzutti, A., Vaglio, E., Totis, G., Sortino, M., & Fedrizzi, L. (2019). Corrosion behaviour of 316L stainless steel manufactured by selective laser melting. *Materials and Corrosion*, 70(9), 1633-1645.
- Aufa, A. N., Hassan, M. Z., Ismail, Z., Ramli, F., Jamaludin, K. R., Daud, M. Y. M., & Ren, J. (2024). Current Trends in Additive Manufacturing of Selective Laser Melting for Biomedical Implant Applications. *Journal of Materials Research and Technology*.
- Braun, J., Kaserer, L., Stajkovic, J., Leitz, K. H., Tabernig, B., Singer, P., ... & Leichtfried, G. (2019). Molybdenum and tungsten manufactured by selective laser melting: Analysis of defect structure and solidification mechanisms. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 84, 104999.
- Brunette, D. M., Tengvall, P., Textor, M., Thomsen, P., & Olin, C. (2001). Titanium in cardiac and cardiovascular applications. *Titanium in Medicine: Material-Science, Surface Science, Engineering, Biological Responses and Medical Applications*, 889-907.
- Buj-Corral, I., Tejo-Otero, A., & Fenollosa-Artés, F. (2020). Development of additive technologies for metals in the sector of medical implants. *Metals*, 10(5), 686.
- Chalicheemalapalli Jayasankar, D., Gnaase, S., Kaiser, M. A., Lehnert, D., & Tröster, T. (2024). Advancements in Hybrid Additive Manufacturing: Integrating SLM and LMD for High-Performance Applications. *Metals*, 14(7), 772.

- Chao, Q., Cruz, V., Thomas, S., Birbilis, N., Collins, P., Taylor, A., ... & Fabijanic, D. (2017). On the enhanced corrosion resistance of a selective laser melted austenitic stainless steel. *Scripta Materialia*, 141, 94-98.
- Chen, Y., Zhang, J., Dai, N., Qin, P., Attar, H., & Zhang, L. C. (2017). Corrosion behaviour of selective laser melted Ti-TiB biocomposite in simulated body fluid. *Electrochimica Acta*, 232, 89-97.
- Chen, J., Ding, X., Wang, J., Xie, Z., & Wang, S. (2024). Corrosion behavior, metal ions release and wear resistance of TiN coating deposited on SLM CoCrMo alloy by magnetron sputtering. *Journal of Alloys and Compounds*, 1002, 175318.
- Cragolino, G. A. (2021). Corrosion fundamentals and characterization techniques. In *Techniques for corrosion monitoring* (pp. 7-42). Woodhead Publishing.
- Kang, X., Qiu, H., Li, G., & Yin, M. (2023). The fretting
- Dai, N., Zhang, L. C., Zhang, J., Chen, Q., & Wu, M. (2016). Corrosion behavior of selective laser melted Ti-6Al-4 V alloy in NaCl solution. *Corrosion Science*, 102, 484-489.
- Dai, N., Zhang, L. C., Zhang, J., Zhang, X., Ni, Q., Chen, Y., ... & Yang, C. (2016). Distinction in corrosion resistance of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy on different planes. *Corrosion Science*, 111, 703-710.
- Davoodi, E., Montazerian, H., Mirhakimi, A. S., Zhianmanesh, M., Ibhade, O., Shahabad, S. I., ... & Toyserkani, E. (2022). *Additively manufactured metallic biomaterials*. *Bioact Mater* 15: 214-249.
- Dikici, B., Esen, Z., Duygulu, O., & Gungor, S. (2015). Corrosion of metallic biomaterials. *Advances in Metallic Biomaterials: Tissues, Materials and Biological Reactions*, 275-303.
- Findik, F. (2018). *Metallic biomaterials*. *Curr Trends Biomed Eng & Biosci*, 17(1), 7-8.
- Frankel, G. S. (1998). Pitting corrosion of metals: a review of the critical factors. *Journal of the Electrochemical society*, 145(6), 2186.
- Gao, B., Zhao, H., Peng, L., & Sun, Z. (2022). A review of research progress in selective laser melting (SLM). *Micromachines*, 14(1), 57.
- Guo, Y., Xu, Z., Liu, M., Zu, S., Yang, Y., Wang, Q., ... & Ren, L. (2022). The corrosion resistance, biocompatibility and biomineralization of the dicalcium phosphate dihydrate coating on the surface of the additively manufactured NiTi alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 17, 622-635.
- Hanzl, P., Zetkova, I., & Dana, M. (2017, November). A comparison of lattice structures in metal additive manufacturing. In *Proceedings of the 28th DA-AAM International Symposium* (pp. 0481-0485).
- Hassanin, H., Finet, L., Cox, S. C., Jamshidi, P., Grover, L. M., Shepherd, D. E., ... & Attallah, M. M. (2018). Tailoring selective laser melting process for

titanium drug-delivering implants with releasing micro-channels. *Additive Manufacturing*, 20, 144-155.

Hu, Q., Chen, C., Liu, M., Chang, C., Yan, X., & Dai, Y. (2023). Improved corrosion resistance of magnesium alloy prepared by selective laser melting through T4 heat treatment for biomedical applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 27, 813-825.

Hu, Y., Dong, C., Kong, D., Ao, M., Ding, J., Ni, X., ... & Li, X. (2022). Degradation behaviour of selective laser melted CoCrMo alloys in H₂O₂-containing chloride solutions. *Corrosion Science*, 195, 109981.

Jafari, D., & Wits, W. W. (2018). The utilization of selective laser melting technology on heat transfer devices for thermal energy conversion applications: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 91, 420-442.

Jalali, M., Mohammadi, K., Movahhedy, M. R., Karimi, F., Sadrnezhaad, S. K., Chernyshikhin, S. V., & Shishkovsky, I. V. (2023). SLM additive manufacturing of NiTi porous implants: a review of constitutive models, finite element simulations, manufacturing, heat treatment, mechanical, and biomedical studies. *Metals and Materials International*, 29(9), 2458-2491.

Kang, X., Qiu, H., Li, G., & Yin, M. (2023). The fretting tribocorrosion properties of CrAlTiN coating on the Inconel 690 alloy. *Journal of Materials Science*, 58(14), 6313-6328.

Kruth, J. P., Froyen, L., Van Vaerenbergh, J., Mercelis, P., Rombouts, M., & Lauwers, B. (2004). Selective laser melting of iron-based powder. *Journal of materials processing technology*, 149(1-3), 616-622.

Majumdar, J. D., & Manna, I. (2015). *Laser surface engineering of titanium and its alloys for improved wear, corrosion and high-temperature oxidation resistance*. In *Laser Surface Engineering* (pp. 483-521). Woodhead publishing.

Marin, E., & Lanzutti, A. (2023). Biomedical applications of titanium alloys: a comprehensive review. *Materials*, 17(1), 114.

Makhlouf, A. S. H. (2015). Intelligent stannate-based coatings of self-healing functionality for magnesium alloys. In *Intelligent coatings for corrosion control* (pp. 537-555). Butterworth-Heinemann.

Mohammed, M. T., Semelov, V. G., & Sotov, A. V. (2020). SLM-built titanium materials: Great potential of developing microstructure and properties for biomedical applications: A review. *Materials Research Express*, 6(12), 122006.

Pal, S., Drstvensek, I., & Brajliah, T. (2018). Physical behaviors of materials in selective laser melting process. *DAAAM International Scientific Book*, 2018, 239-256.

Park, J. B., & Bronzino, J. D. (2002). *Biomaterials: principles and applications*. cress.

- Pauzon, C., Forêt, P., Hryha, E., Arunprasad, T., & Nyborg, L. (2020). Argon-helium mixtures as Laser-Powder Bed Fusion atmospheres: Towards increased build rate of Ti-6Al-4V. *Journal of Materials Processing Technology*, 279, 116555.
- Popovich, A., Sufiiarov, V., Borisov, E., & Polozov, I. A. (2015). Microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V manufactured by SLM. *Key Engineering Materials*, 651, 677-682.
- Ralls, A. M., John, M., Noud, J., Lopez, J., LeSourd, K., Napier, I., ... & Menezes, P. L. (2022). Tribological, corrosion, and mechanical properties of selective laser melted steel. *Metals*, 12(10), 1732.
- Ralls, A. M., Kumar, P., & Menezes, P. L. (2020). Tribological properties of additive manufactured materials for energy applications: a review. *Processes*, 9(1), 31.
- Shao, L., Du, Y., Dai, K., Wu, H., Wang, Q., Liu, J., ... & Wang, L. (2021). β -Ti alloys for orthopedic and dental applications: a review of progress on improvement of properties through surface modification. *Coatings*, 11(12), 1446.
- Sharma, A., Oh, M. C., Kim, J. T., Srivastava, A. K., & Ahn, B. (2020). Investigation of electrochemical corrosion behavior of additive manufactured Ti-6Al-4V alloy for medical implants in different electrolytes. *Journal of Alloys and Compounds*, 830, 154620.
- Singh, N., Hameed, P., Ummethala, R., Manivasagam, G., Prashanth, K. G., & Eckert, J. (2020). Selective laser manufacturing of Ti-based alloys and composites: Impact of process parameters, application trends, and future prospects. *Materials today advances*, 8, 100097.
- Soni, N., Renna, G., & Leo, P. (2024). Advancements in Metal Processing Additive Technologies: Selective Laser Melting (SLM). *Metals*, 14(9), 1081.
- Teoh, S. H. (2004). *Engineering materials for biomedical applications* (Vol. 1). World scientific.
- Vukkum, V. B., Christudas justus, J., Darwish, A. A., Storck, S. M., & Gupta, R. K. (2022). Enhanced corrosion resistance of additively manufactured stainless steel by modification of feedstock. *npj Materials Degradation*, 6(1), 2.
- Wei, Z., Attarilar, S., Ebrahimi, M., & Li, J. (2024). Corrosion and wear behavior of additively manufactured metallic parts in biomedical applications. *Metals*, 14(1), 96.
- Wirth, F., Frauchiger, A., Gutknecht, K., & Cloots, M. (2021). Influence of the inert gas flow on the laser powder bed fusion (LPBF) process. In *Industrializing Additive Manufacturing: Proceedings of AMPA2020* (pp. 192-204). Springer International Publishing.
- Wu, H., Chen, X., Kong, L., & Liu, P. (2023). Mechanical and Biological Properties of Titanium and Its Alloys for Oral Implant with Preparation Techniques: A Review. *Materials*, 16(21), 6860.

- Yap, C. Y., Chua, C. K., Dong, Z. L., Liu, Z. H., Zhang, D. Q., Loh, L. E., & Sing, S. L. (2015). Review of selective laser melting: Materials and applications. *Applied physics reviews*, 2(4).
- Yadroitsava, I., Grewar, S., Hattingh, D., & Yadroitsev, I. (2015, September). Residual stress in SLM Ti6Al4V alloy specimens. In Materials Science Forum (Vol. 828, pp. 305-310). Trans Tech Publications Ltd.
- Yıldırım, M., & Keleş, A. (2018). Production of Co-Cr-Mo biomedical alloys via investment casting technique. *Turk. J. Electromech. Energy*, 3, 12-16.
- Zhang, E., Zhao, X., Hu, J., Wang, R., Fu, S., & Qin, G. (2021). Antibacterial metals and alloys for potential biomedical implants. *Bioactive materials*, 6(8), 2569-2612.
- Zhao, B., Wang, H., Qiao, N., Wang, C., & Hu, M. (2017). Corrosion resistance characteristics of a Ti-6Al-4V alloy scaffold that is fabricated by electron beam melting and selective laser melting for implantation in vivo. *Materials Science and Engineering: C*, 70, 832-841.
- Zhou, Y. H., Zhang, Z. H., Wang, Y. P., Liu, G., Zhou, S. Y., Li, Y. L., ... & Yan, M. (2019). Selective laser melting of typical metallic materials: An effective process prediction model developed by energy absorption and consumption analysis. *Additive Manufacturing*, 25, 204-217.

BÖLÜM 2

MOTOSİKLET JANTI CAD MODELLERİNİN OLUŞTURULMASININ OTOMASYONU

Hakan MUMCU¹

¹ Hakan MUMCU, Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, ORCID: 0009-0005-2306-5522

1. GİRİŞ

Günümüz endüstriyel tasarım ve üretim süreçlerinde hız, doğruluk ve verimlilik, rekabetin en belirleyici unsurları arasında yer almaktadır. Teknolojinin hızla gelişmesiyle birlikte CAD yazılımları, mühendislik ve üretim alanlarında yaygın olarak kullanılmakta ve tasarım süreçlerini önemli ölçüde optimize etmektedir. Ancak, manuel modelleme süreçleri, tekrar eden işlemler ve karmaşık hesaplamalar, zaman kaybına ve hata riskine yol açmaktadır. Ayrıca, belirli bir ürünün tasarımına yönelik özel olarak geliştirilmiş yazılımların eksikliği, tasarım süreçlerinde verimliliği sınırlayan bir faktör olmaktadır.

Tasarım süreçlerini hızlandırmak ve hata oranını en aza indirmek için CAD otomasyonu devreye girmektedir. CAD yazılımlarında kullanılan makrolar ve programlanabilir komutlar, tekrarlayan görevleri otomatikleştirerek mühendislerin daha verimli ve yenilikçi çözümler üretmesine olanak tanımaktadır. Özel ihtiyaçlara yönelik gelişmiş makrolar geliştirmek amacıyla CATIA, Pro/E, NX, SolidWorks gibi Üç Boyutlu (3D – Three-Dimensional) CAD yazılımları, kullanıcıların yazılımı özelleştirmesine olanak tanıyan açık sistemler sunmaktadır.

CAD otomasyonu, parametrik modelleme, bilgi tabanlı tasarım ve entegrasyon sistemleri ile birleşerek mühendislik alanında büyük bir dönüşüm sağlamaktadır. Bu sayede, tasarım süreçleri daha esnek hale gelirken, hem üretim süresinde hem de maliyetlerde önemli ölçüde tasarruf sağlanmaktadır. Literatürde, çeşitli 3D modelleme yazılımlarında otomasyon veya özelleştirme süreçlerinin geliştirilmesi üzerine birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar, endüstrilerde parça tasarım sürelerini kısaltmak, standardizasyon sağlamak ve kullanıcı dostu modelleme yöntemleri geliştirmek için önemli katkılar sunmuştur. Literatürde bu alanda yapılan bazı çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Wayzode ve *Tupkar*, CATIA V5 yazılımında makrolar ve Visual Basic kullanarak bir mil kaplini tasarımının otomasyonu üzerine odaklanmıştır. Kullanıcıdan temel giriş parametreleri alındıktan sonra, gerekli hesaplamalar otomatik olarak gerçekleştirilerek güvenlik kontrolü yapılarak 3D model oluşturmuşlardır. Bu otomasyon süreci, tasarım süresini önemli ölçüde kısaltarak verimliliği artırmakta ve doğrudan üretime uygun teknik çizimlerin oluşturulmasını sağla-

maktadır. Böylece, tasarım sürecinin hızlanması ve kalite standartlarının iyileştirilmesi hedeflenmiştir (Wayzode & Tupkar 2012).

Kumbhar ve arkadaşları, CATIA V5 yazılımında makrolar kullanarak otomobil jant diskinde farklı deliklerin oluşturulmasını otomatik hale getirmeyi ele almaktadır. Giriş parametreleri doğrultusunda, tekrarlayan işlemler makrolarla gerçekleştirilerek modelleme süreci hızlandırılmış ve hata olasılığı azaltılmıştır. VBA kullanılarak geliştirilen makrolar, merkez deliği, cıvata delikleri ve havalandırma deliklerini içeren farklı türde deliklerin oluşturulmasını sağlamıştır. Bu otomasyon sayesinde, 3D modelleme süresi önemli ölçüde kısaltmakta ve doğrudan üretime uygun teknik çizimler elde edilmektedir. Böylece, standartlaştırılmış ve hatasız bir modelleme süreci sağlanarak, tasarım ve üretim verimliliği artırılmaktadır (Kumbhar vd. 2014).

Rojas-Sola ve arkadaşları, CATIA yazılımında VBA kullanılarak geliştirilen yenilikçi bir uygulama yapmışlardır. CATIA yazılımının metal üretim elemanlarını tasarlamak için yeterli araçlara sahip olmaması nedeniyle geliştirilen bu uygulama, silindirik ve konik dirseklerin 3D olarak modellenmesini ve yüzeylerinin düzlem üzerinde açılımının elde edilmesini sağlamaktadır. Kullanıcılar, gerekli geometrik ve boyutsal parametreleri klavye aracılığıyla girerek tasarımın mümkün olup olmadığı doğrulatıldıktan sonra, “Wireframe and Surface Design” modülünde 3D modeli oluşturabilir ve “Drafting” modülünde yüzey açılımını elde edebilmektedir. Bu uygulamanın CATIA yazılımına entegrasyonu, teknik tasarım sürecini hızlandırarak bazı ara işlemleri ortadan kaldırmakta ve az deneyimli kullanıcıların geometrik tasarım etkinliğini artırmaktadır (Rojas-Sola vd. 2020).

Nayak ve arkadaşları, çalışmalarında reaktörlerin nozul tasarım sürecinin otomasyonu üzerine odaklanılmıştır. SolidEdge ve Microsoft Excel kullanılarak geliştirilen yazılım, parametrik ilişkiler aracılığıyla nozul tasarımını otomatikleştirerek, benzer geometrik yapıya sahip ancak farklı boyutlara sahip modellerin üretim süresini önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu yöntem, geleneksel manuel çizim süreçlerine kıyasla yaklaşık %70 zaman tasarrufu sağlayarak mühendislik süreçlerini standartlaştırmakta, hata oranlarını düşürmekte ve tasarım sürecinin tekrar kullanılabilirliğini artırmaktadır. Kullanıcılar, belirlenen geometrik ve boyutsal parametreleri girdiklerinde, yazılım otomatik olarak üretim çizimlerini oluşturmakta ve gerektiğinde hızlı düzenlemelere olanak tanımaktadır. Bu otomasyon süreci, reaktör nozulları için tasarım süresini kısaltarak üretim verimliliğini artıran yenilikçi bir mühendislik çözümü sunmaktadır (Nayak vd. 2012).

Ali ve arkadaşları, CATIA yazılımında Visual Basic programlama dili kullanılarak jant tekerlek modellerinin otomatik oluşturulmasını sağlayan bir CAD otomasyon sürecinin geliştirilmesini amaçlamışlardır. Makro

kaydetme ve düzenleme teknikleri kullanılarak oluşturulan sistem, farklı jant tasarımlarını belirlenen parametrelere göre otomatik olarak modelleyebilmekte ve böylece tasarım süresini kısaltarak üretim verimliliğini artırmaktadır. Kullanıcı arayüzü ile parametre girişine olanak tanıyan bu otomasyon, hata oranlarını minimize ederken, özelleştirilmiş müşteri taleplerine hızlı yanıt verebilme avantajı sağlamaktadır (Ali vd. 2018).

Peipei ve Lufeng, Pro/Engineer (Pro/E) yazılımında Visual C++ 6.0 ve Pro/TOOLKIT kullanılarak dişli milinin parametrik tasarımını gerçekleştiren bir sistem geliştirmişlerdir. Parametrik tasarım yaklaşımıyla, kullanıcı dostu bir arayüz üzerinden girilen tasarım parametreleri sayesinde 3D modeller hızlı bir şekilde oluşturulmaktadır. Access 2003 tabanlı bir veri tabanı kullanılarak veri yönetimi sağlanmakta ve model parametreleri dinamik olarak güncellenebilmektedir. Geliştirilen sistem, dişli mili modelleme sürecini hızlandırarak tasarım verimliliğini artırmakta ve tekrarlayan modelleme işlemlerini en aza indirmektedir (Peipei & Lufeng 2011).

Zhou ve Qin, SolidWorks ve Visual Basic kullanarak turbo matkabın yatak bölümünün parametrik tasarımını gerçekleştiren bir yazılım geliştirmişlerdir. Parametrik tasarım, benzer yapıya sahip ancak farklı boyutlardaki yatak bölümlerinin otomatik olarak modellenmesini sağlayarak tasarım sürecini hızlandırmaktadır. SolidWorks yazılımının ikincil geliştirme araçları kullanılarak boyut yönlendirme yöntemi ile parametrik modelleme gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen yazılım, tasarım verimliliğini artırarak tasarım süresini kısaltmakta ve petrol sahası makinelerinin benzer tasarımlarında uygulanabilirliğini kanıtlamaktadır (Zhou & Qin 2013).

Sun ve arkadaşları, SolidWorks yazılımında bir standart parça kütüphanesi geliştirmek için Visual Basic kullanan bir yöntemi sunmaktadır ve örnek olarak bir spiral sarımlı conta ele alınmaktadır. Çalışma, bir model veri tabanı oluşturma, insan-makine arayüzü tasarlama ve SolidWorks içinde parametrik 3D modelleri oluşturma sürecini ayrıntılı bir şekilde açıklamaktadır. Ayrıca, standart parça kütüphanesini verimli bir şekilde entegre etmek için bir SolidWorks eklentisi oluşturma süreci de açıklanmaktadır. Önerilen yaklaşım, tasarım verimliliğini artırmakta, tekrarlayan görevleri otomatikleştirmekte ve ürün geliştirme süresini kısaltmaktadır (Sun vd. 2011).

Patwardhan ve Nimbalkar, CATIA V5 yazılımı kullanarak iki kademeli dişli kutusu tasarımının özelleştirilmesi, makrolar ve Grafiksel Kullanıcı Arayüzü (GUI - Graphical User Interface) formları ile nasıl yapılacağı açıklanmaktadır. Kullanıcı, dişli kutusunun temel parametrelerini girerek, geri kalan tasarım parametreleri formüllerle hesaplanmakta ve bu parametrelerle dişli kutusunun parça modeli oluşturulmaktadır. Bu özelleştirme sayesinde, dişli kutusu tasarım süresi birkaç dakikaya indirgenmekte ve

tasarım kalitesi artarken, üretim için gerekli çizimler de hızlıca elde edilebilmektedir (Patwardhan & Nimbalkar 2021).

Trivedi ve arkadaşları, Pro/E yazılımı ile Microsoft Excel'in entegrasyonu kullanılarak 3D parametrik modelleme süreci otomatikleştirmişlerdir. Özellikle, küresel makaralı yatakların iç halkasının tasarımında kullanılan parametreler, Excel üzerinden girilen verilerle Pro/E modeline aktarılmakta ve böylece modelleme süresi kısaltılmaktadır. Kullanıcı, yalnızca yatak tipi bilgisini girerek, doğru ölçülerle bir parça modeli oluşturabilmektedir. Bu entegrasyon, parçaların özellikleri arasında değişmeyen ilişkiler olduğunda, parametrik modelleme ve tasarım sürecini kolaylaştırarak verimliliği artırmaktadır. Ayrıca, model, analiz ve üretim süreçlerine entegrasyon için de uygun hale getirilmiştir (Trivedi vd. 2013).

Zbiciak ve arkadaşları, NX Siemens CAD/CAM/CAE ortamında dişli tasarımı ve geometrik modelleme süreçlerini otomatikleştiren orijinal bir yazılım oluşturmuşlardır. Yazılım, özellikle dişli tasarımında kullanılan dişli çarkları için parametrik modelleme ve üretim maliyetlerinin tahmin edilmesini sağlamaktadır. "Generator" modülü, daha doğru bir evolvent eğrisinin çizilmesini sağlayarak, modelleme süresini birkaç dakikaya indirmektedir. Yazılım, kullanıcıya tasarımda daha fazla kontrol imkanı sunarak, ürünün kalite standartlarına uygun olarak üretilmesini sağlamaktadır (Zbiciak vd. 2015).

Joshi ve arkadaşları, CAD yazılımlarında tekrarlayan modelleme görevlerinin otomatikleştirilmesiyle tasarım sürecinin verimliliğini artırma yöntemi ele alınmıştır. Çeşitli makine parçalarının CAD modelleme işlemleri, CATIA V5 programında Visual Basic kullanılarak otomatikleştirilmiş ve bu sayede tasarımcıların zaman kaybı ve hata riskleri azaltılmıştır. Ayrıca, kullanıcılar için basit bir arayüz ile tasarım verileri alınarak, güvenli ve doğru bir modelleme süreci sağlanmıştır. Bu yöntem, CAD yazılımlarında uzmanlık gereksinimini azaltmak, maliyetleri düşürmek ve tasarım süresini kısaltmak için etkili bir çözüm sunmaktadır (Joshi vd. 2016).

Sawant ve Nimbalkar, CATIA V5 yazılımında yatay vida konveyörü bileşenlerinin 3D modellemesi için otomatik bir sistem geliştirilmiştir. Excel kullanılarak vida konveyörü bileşenlerinin tasarım hesaplamaları ve parametre belirlemeleri yapılmakta, CATIA VBA dilinde yazılan kodlar ile modeller otomatik olarak oluşturulmaktadır. Sistem, kullanıcıların karmaşık CAD yazılımlarına ihtiyaç duymadan vida konveyörü bileşenlerini hızlı ve hatasız bir şekilde modellemelerini sağlamaktadır (Sawant & Nimbalkar 2015).

Mokhede ve arkadaşları, rulman tasarımında CATIA V5 yazılımında VBA kullanarak tasarım sürecini hızlandırmak ve hataları azaltmak amacıyla bir otomatik modelleme ve tasarım sistemi geliştirilmiştir. Sistem,

müşteri ihtiyaçları, yükleme koşulları gibi girdileri alarak, yatak türleri için 3D model ve 2D çizimler üretmektedir. Ayrıca, bu sistemin kullanımıyla manuel modelleme süresi büyük ölçüde kısaltmakta ve tasarım hataları azalmakta, kullanıcılar CATIA yazılımında ileri düzey bilgiye sahip olmasa bile modelleme yapabilmektedir (Mokhede vd. 2017).

Siddesh ve Suresh, CAD modellerini otomatik olarak oluşturmak için manuel modelleme yönteminden CAD otomasyonuna geçiş önerilmektedir. Çalışmalarında, CATIA yazılımında VBA kullanılarak makro yöntemi ve manuel programlama yöntemiyle helisel yayın CAD modellerinin otomatik olarak nasıl oluşturulduğundan bahsedilmiştir. Otomasyon süreci, tasarımın oluşturulmasında zaman kazandırdığı, insan hatalarını azalttığı, tasarım maliyetlerini düşürdüğü ve tekrar eden CAD modelleme işlemleri kolayca yapılabildiği vurgulanmıştır (Siddesh & Suresh 2015).

Fan ve arkadaşları, kalıp setleri standart parça kütüphanesinin geliştirilmesini ele almışlardır. Pro/E kullanarak parametrik 3D modeller oluşturulmuş, aile tablosu fonksiyonu ile standart parça kütüphanesi oluşturulmuş ve Access ile parça veri tabanı kurulmuştur. Python ile kullanıcı arayüzü tasarlanmış ve VC++6.0 ile uygulama programı geliştirilerek, kullanıcıların ilgili standart parçalara ait verileri hızlı bir şekilde alarak 3D modelleri otomatik olarak oluşturabilmesi sağlanmıştır. Bu sistem, tasarım verimliliğini artırarak zaman kazandırmakta ve yenilikçi tasarımların yapılmasına olanak sağlamaktadır (Fan vd. 2011).

Rojas-Sola ve arkadaşları, CATIA V5 yazılımında bir makro olarak tasarlanmış bir geometri hesaplayıcısının mühendislik grafikleri alanındaki uygulaması sunulmaktadır. Makro, CATVBA diliyle yazılmış ve VBA kullanılarak CATIA iç editörüyle geliştirilmiştir. Uygulamanın ana amacı, üç temel geometri elemanını (nokta, doğru ve düzlem) oluşturmak ve beş tür genel geometri problemini çözmektir. Bu problemlerin çözümü analitik geometri ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Geometrik hesaplayıcı, 3D hacimlerin oluşturulması, simetrilerin oluşturulması ve elemanların boyutlandırılması gibi işlemlere de destek sağlamaktadır (Rojas-Sola vd. 2023).

Rojas-Sola ve arkadaşları, mühendislik grafikleri alanında eğitim amaçlı geliştirilen bir uygulama yapmışlardır. Uygulama, öğrencinin verdiği düzlem kesit çözümünü, 3D CAD modelleme yazılımı CATIA ile elde edilen referans çözümle karşılaştırarak doğrulamaktadır. CATVBA diliyle yazılan ve CATIA yazılımının “Part Design” modülünde çalışan bu makro, kesitin 3D modelde elde edilmesi, çift dik iz düşüm görünümlere yansıtılması ve görünür/gizli çizgilerin hesaplanması süreçlerini içermektedir. Doğrulama işlemi, kesit koordinatlarının Microsoft Excel’e aktarılması ve formüller yardımıyla hata hesaplamalarının yapılmasıyla gerçekleştirilmektedir.

Ayrıca, uygulama iki kesitin merkezi simetrisini karşılaştıracak şekilde de programlanabilmektedir (Rojas-Sola vd. 2023).

Yukarıda sunulan çalışmalar, CAD otomasyon süreçlerinin farklı yönlerine katkılar sağlamış ve bu alandaki ilerlemelere ışık tutmuştur. Bununla birlikte, mevcut literatürde motosiklet jant tekerlekleri gibi karmaşık geometrilere sahip bileşenlerin tasarım süreçlerinde özelleştirilmiş otomasyon uygulamalarına yer verilmediği görülmektedir. Bu çalışmanın amacı, motosiklet jant tekerleği için CAD modelleme sürecinin otomasyonunu sağlamak ve kullanıcı girişlerine dayalı parametre tabanlı bir otomasyon yaklaşımı gerçekleştirmektir. Bu yöntem, hem modelleme süresini önemli ölçüde kısaltmakta hem de tasarımda hata olasılığını en aza indirerek CAD modelleme verimliliğini artırmaktadır.

2. METOT

2.1. Otomasyon Süreci Yöntemi

Gerçek motosiklet jant tasarımlarına dayanan dört farklı motosiklet jantı ve dört farklı jant kasnağı kesit profili, otomasyon sürecine uygun şekilde modellenmiştir (Kumar vd. 2024; Crf300l-tubeless-wheels-1.(t.y.); Classic-brochure. (t.y.); Wheel-rims. (t.y.)).

Bu süreçte, motosiklet jantının temel parametreleri ve tasarım unsurları detaylı bir şekilde tanımlanarak 3D CAD modelleme sürecine entegre edilmiştir. Tanımlanan veriler doğrultusunda, her bir jant modeli ve jant kasnağı kesit profili için geometrik modeller oluşturulmuş ve otomasyon sürecine uygun hale getirilmiştir.

Otomasyon sürecinin nasıl yapıldığını göstermek amacıyla, CAD ortamında oluşturulan modelleme ve veri akışı şematik bir şekilde sunulmuştur (Şekil 1). Bu şema, tasarım parametrelerinin tanımlanmasından nihai modelin oluşturulmasına kadar geçen süreci görselleştirerek, modelleme sırasında kullanılan yöntemlerin ve otomasyon sürecinin anlaşılmasını kolaylaştırmaktadır.



Şekil 1. Otomasyon sürecinin ana akış şeması

2.2. CATIA Yazılımında Makro Kullanımı ile Otomasyon Süreci Geliştirme

CATIA programında bir makro, tekrarlanabilir görevlerin kolaylaştırılması ve yeniden kullanılması amacıyla komutların ve seçeneklerin bir araya getirilerek oluşturulduğu bir kod dizisidir. Otomasyon sürecinin oluşturulabilmesi için gerekli tüm veriler dikkatlice analiz edilmiş ve giriş-çıkış ilişkileri belirlenerek tasarım sürecine entegre edilmiştir. Bu süreçte kullanılan makro programlama, VBA dili ile gerçekleştirilmiştir ve yazılımın kullanıcı dostu bir şekilde özelleştirilmesini sağlamıştır.

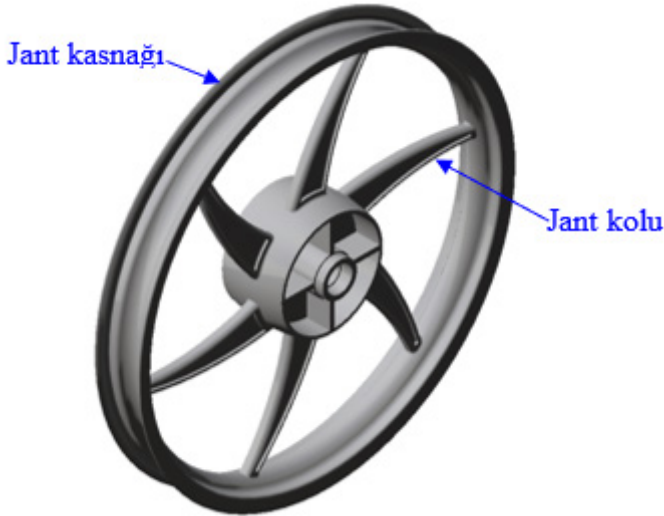
Makro kaydedicisi, özellikle otomasyon sürecinde kritik bir rol oynayan araçlardan biri olarak öne çıkmaktadır. Bu araç, başlangıç modeline dayalı geometrik modelin düzenlenmesini kolaylaştırmak için kullanılır.

maktadır. Tasarım sürecinde jant modelleri, jant kasnağı kesit profilleri ve ilgili parametreler için ara yüzler geliştirilmiş, bu ara yüzler aracılığıyla belirli boyutların ve tasarım unsurlarının doğrudan değiştirilmesine olanak tanınmıştır. Bu yaklaşım, tekrarlayan modelleme işlemlerini standartlaştırarak tasarım sürecini hızlandırmış, kullanıcı hatalarını en aza indirmiş ve CAD modellemenin doğruluğunu artırmıştır.

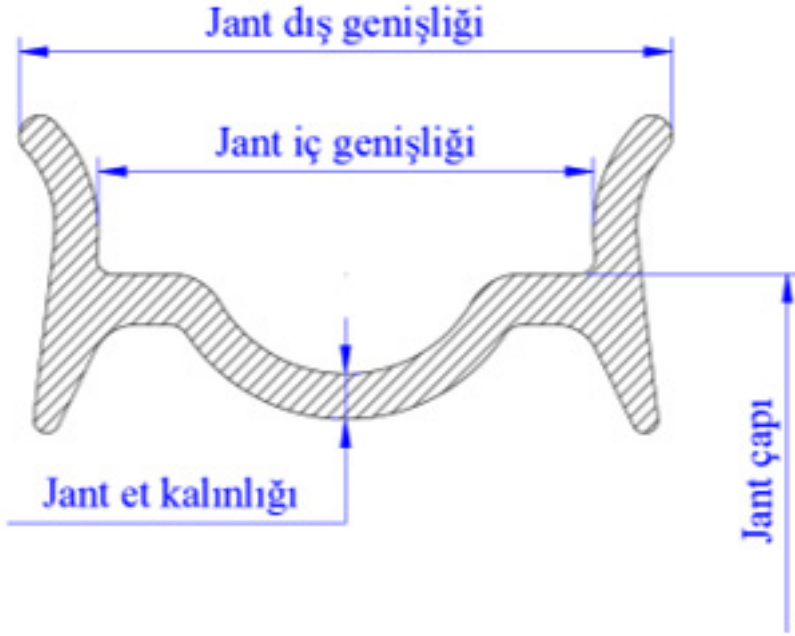
2.2.1. 3D Geometrik modelleme için parametrik yaklaşım

Bu çalışmada, 3D geometrik modellerin tasarımı için motosiklet jantları temel referans olarak seçilmiştir. Otomasyon sürecinde, jant modelleri ve jant kasnağı kesit profili tiplerine bağlı olarak tanımlanan beş ana parametre ve unsurlar, tasarımın esnekliğini ve özelleştirilebilirliğini artırmak amacıyla dikkatlice belirlenmiştir. Bu parametreler; jant çapı, jant dış genişliği, jant iç genişliği, jant et kalınlığı ve jant kolu adedi olarak tanımlanmış ve her biri, tasarım sürecindeki geometrik ve işlevsel gereksinimlere uygun şekilde modeller oluşturulmuştur. Jant modeli unsurları Şekil 2’de ve jant kasnağı kesit profili parametreleri Şekil 3’de gösterilmiştir.

Çalışma kapsamında, dört farklı jant tasarımına ve dört farklı jant kesiti profil tipine ilişkin parametrik veriler ve unsurlar detaylı bir şekilde incelenerek belirlenmiştir. Bu bilgilerin tamamı, otomasyon sürecindeki girdiler için bir rehber işlevi görmek üzere organize edilmiştir. Bu parametrik yaklaşım, farklı tasarım senaryolarında sistemin esnek bir şekilde çalışmasını sağlamış ve tasarım sürecini standartlaştırarak, modelleme işlemlerinin doğruluğunu ve verimliliğini artırdığı görülmüştür.



Şekil 2. Jant modeli unsurları



Şekil 3. Jant kasnağı kesit profili parametreleri

2.2.2. Makro programlama ile otomasyon sürecinin entegrasyonu

Makro kütüphanesine eklenen betikler, motosiklet jant modelleri ve jant kasnağı kesit profilleri için ayrı modüller halinde organize edilmiştir. Bu modüllerin etkin bir şekilde kullanılabilmesi ve kullanıcıdan gerekli veri girişlerinin sağlanabilmesi amacıyla Visual Basic editöründe kullanıcı dostu formlar tasarlanmıştır. Formların üzerine, kullanıcı ile etkileşimi kolaylaştıran çeşitli kontroller eklenmiş ve programın işleyişi sırasında gerekli olan girişler bu formlar aracılığıyla sağlanmıştır.

Otomasyon sürecinde, kullanıcıdan alınan veriler doğrultusunda doğru ve tutarlı sonuçlar elde edilebilmesi için formlar sırasıyla çağrılmış ve veri akışı düzenlenmiştir. Kullanıcı hatalı veya eksik veri girdiğinde, yazılım, mesaj pencereleri aracılığıyla anlık olarak geri bildirim sağlamış ve hataların düzeltilmesine olanak tanımıştır. Bu mekanizma, kullanıcı hatalarını en aza indirmek ve modelleme sürecinin doğruluğunu artırmak için kritik bir rol oynamıştır.

Formlar aracılığıyla alınan unsurlar ve parametreler, ilgili modüllerin içerdiği veri yapılarına atanmış ve bu şekilde modelleme sürecinde kullanılan parametreler dinamik hale getirilmiştir. Kullanıcı tarafından seçilen

unsurlarla ilgili kod modülleri, form kodları ile entegre edilerek çağrılmış ve 3D motosiklet jantları başarılı bir şekilde oluşturulmuştur.

Bu yöntem, sadece tasarım sürecini hızlandırmakla kalmamış, aynı zamanda modelleme işlemlerinin doğruluğunu artırarak, kullanıcı ihtiyaçlarına yönelik esnek ve özelleştirilebilir bir otomasyon süreci sunmuştur. Bu sistem, CAD tabanlı projelerde kullanıcı girdisine dayalı parametrik modelleme süreçlerinin nasıl yapılabileceğine dair başarılı bir örnek oluşturmaktadır.

3. BULGULARLAR VE TARTIŞMA

3.1. Modelleme Sürecinin Otomasyonu ve Kodlama Altyapısı

CATIA yazılımında bir modelin modelleme sürecini otomatikleştirmek için öncelikle, modelin temel aldığı kodlama algoritmasının geliştirilmesi gerekmektedir. Bu süreç, parça tasarım modülünde yer alan “Araçlar” menüsünden erişilen “Makro” komutu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Özellikle “Kayıt Başlat” komutunun etkin kullanımıyla, modelleme sürecinin her adımı kaydedilmiş ve bir referans kodlama modülü oluşturulmuştur. Bu makro modülü, kodlama sürecinin temel yapı taşı olarak tasarlanmış ve daha ileri otomasyon süreçleri için kullanılacak bir temel oluşturmıştır.

Kodlama algoritmasının etkinliği ve sadeliğini sağlamak için, her bir modelleme işlemi sırasında makro kaydı yapılırken gereksiz işlem adımlarından kaçınılmıştır. Örneğin, geri alma veya silme gibi işlemler yapılmamış; bunun yerine, modelleme işlemi eksiksiz ve düzgün bir akışla tamamlanmıştır. Bu yaklaşım, hem algoritmanın karmaşıklığını azaltmış hem de kodlama modülünün doğruluğunu garanti altına almıştır. Çizim işlemi tamamlandıktan sonra, makro kaydı durdurulmuş ve böylece modelleme sürecinin başından sonuna kadar tüm detaylar başarıyla kaydedilmiştir.

Şekil 4’te gösterildiği gibi, farklı tasarım seçenekleri sunmak amacıyla dört farklı motosiklet jant modeli ve Şekil 5’te gösterilen dört farklı jant kasnağı kesit profili oluşturulmuştur. Bu modeller ve profillerin her biri için üretilen kodlama betikleri, makro kütüphanesinde organize bir şekilde saklanmıştır. Saklanan kodlar, makro kütüphanesi üzerinden kolayca erişilebilmekte ve ‘Çalıştır’ komutu aracılığıyla aynı modelin ve profilin otomatik olarak yeniden oluşturulmasını sağlamaktadır. Bu betikler, daha sonraki aşamalarda otomasyon sürecinin genişletilmesi ve kullanıcı odaklı formlar ile entegre çalışması sağlanmıştır.

Kaydedilen kodlar, kullanıcı formu ve model arasındaki bağlantıyı kurarak otomasyon sürecini destekleyen bir işlev görmektedir. Bu süreçte, makro kodları içinde yer alan parametreler, kullanıcı formu kodlamasına

yönelik nesne referansları olarak kullanılmıştır. Bu yapı sayesinde, kullanıcıdan alınan giriş verileri doğrultusunda modellerin parametrik bir şekilde oluşturulması mümkün hale gelmiş ve otomasyon süreci daha esnek bir yapıya kavuşturulmuştur. Bu kodlama altyapısı, CAD tasarım süreçlerinde hem zaman tasarrufu hem de hata oranlarının minimize edilmesi için güçlü bir araç olarak işlev görmektedir.

3.2. Programın Arayüzünün Oluşturulması

Programın arayüzünün oluşturulmasında Visual Basic tabanlı kullanıcı formları, CATIA yazılımında CAD otomasyon süreçlerini etkin bir şekilde yürütmek için temel araçlardan biri olarak öne çıkmaktadır. Kullanıcı formları, CATIA yazılımındaki Araçlar → Mako → Visual Basic Editör aracılığıyla tasarlanabilmekte ve uygulanabilmektedir. Kullanıcı formuna atanmış her bir işlevselliğin etkin hale gelebilmesi için gerekli kodların manuel olarak geliştirilmesi ve entegre edilmesi gerekmektedir. Kullanıcı formunda yer alan kodlama, form ile model arasındaki bağlantıyı kurarak otomasyon sürecini destekleyen önemli bir yapı taşı oluşturulmaktadır.

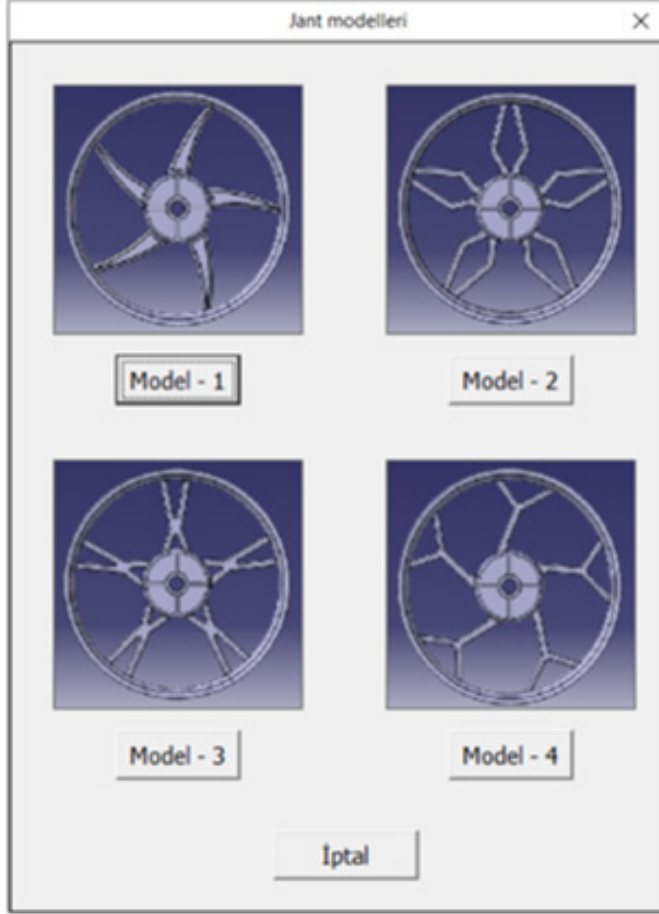
Bu çalışmada, CAD otomasyon sürecini kolaylaştırmak için arayüz olarak üç aşamalı bir kullanıcı formu tasarımı gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, kullanıcıdan farklı jant modelleri arasından seçim yapması istenmektedir. İkinci aşamada, seçilen modelde kullanılacak jant kasnağı kesit profillerinden birinin seçilmesi istenmektedir. Son aşamada ise, kullanıcı formu aracılığıyla ilgili parametreler girilerek tasarım tamamlanmaktadır. Bu aşamalı yaklaşım, kullanıcı etkileşimini kolaylaştırırken tasarım süreçlerinde esneklik ve doğruluğu sağlamaktadır.

Geliştirilen programda ilk kullanıcı formu olan “Jant modelleri” kullanıcı formu, dört farklı jant tasarımlarını görselleştiren resimler ve her bir modele atanmış komut butonlarından oluşmaktadır. Ayrıca, formda bir iptal butonu yer alarak kullanıcıya işlemi sonlandırma seçeneği sunulmuştur (Şekil 4).

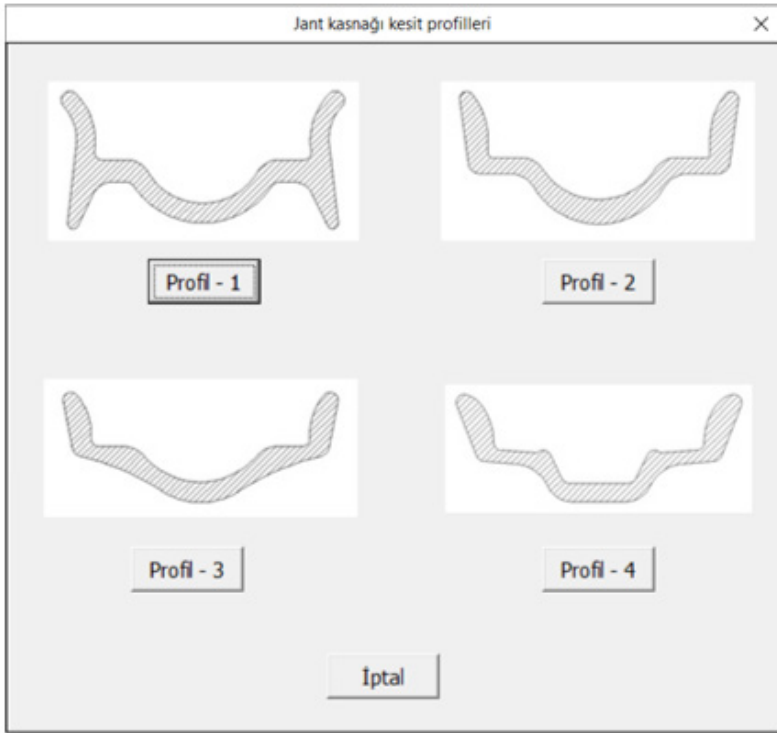
İkinci form olan «Jant kasnağı kesit Profilleri» kullanıcı formu, modelde kullanılacak dört farklı jant kasnağı kesit profillerini temsil eden resimler ve ilgili komut butonları bulunmaktadır. Bu formda kullanıcının seçim işleminden vazgeçebilmesi için iptal işlevine sahip bir komut butonu bulunmaktadır (Şekil 5).

Üçüncü form olan “Jant kasnağı kesit profili ve jant unsuru parametreleri” kullanıcı formu, jantın oluşturulmasında kullanılacak parametrelerin neler olduğunu açıklayıcı resim ile kullanıcıdan gerekli parametrelerin girilmesini bekleyen boş metin kutuları ve bu kutuların açıklamalarını içeren etiket kontrollerine sahiptir. Ayrıca, tasarımın çizilmesi, verilerin temiz-

lenmesi ve işlemin iptal edilmesi için üç farklı komut butonu bulunmaktadır (Şekil 6). Parametrelerin kullanıcıdan alınarak model üzerinde kullanılabilmesi için, kodlama sürecinde model parametrelerini temsil eden satırlar kullanıcı formundaki metin kutularına yönlendirilmiştir. Bu yaklaşım, parametrelerin esnek bir şekilde düzenlenmesine olanak tanımakta ve kullanıcının giriş verilerine göre tasarımın dinamik olarak oluşturulmasını sağlamaktadır. Bu kullanıcı formları ile tasarım sürecini daha verimli hale getirirken aynı zamanda kullanıcı dostu bir arayüz sunarak CAD otomasyonu için güçlü bir temel oluşturmuştur.



Şekil 4. Jant modelleri kullanıcı formu



Şekil 5. Jant kasnağı kesit profilleri kullanıcı formu

Jant kasnağı kesit profili ve jant unsuru parametreleri

Lütfen verilen aralıklarda parametre değerlerini giriniz

Jant çapı
(330-535) mm

Jant dış genişliği
(44-155) mm

Jant iç genişliği
(30-141) mm

Jant et kalınlığı
(3-10) mm

Jant kolu adedi
(3 - 6)

Şekil 6. Jant kasnağı kesit profili ve jant unsuru parametreleri kullanıcı formu

3.3. Programın Çalışması ve Sonuçları

Geliştirilen programın işlevselliğini ve kullanım kolaylığını değerlendirmek için çeşitli modeller oluşturulmuştur. Makro çalıştırıldığında, kullanıcıyı farklı jant tasarımları arasından seçim yapmaya yönlendiren bir arayüz formu açılmaktadır. Şekil 4'te gösterildiği gibi, bu kullanıcı formunda Model-1, Model-2, Model-3 ve Model-4 olmak üzere dört farklı tasarım seçeneği bulunmaktadır. Kullanıcı ekrandaki modellerden birinin seçimini yaptıktan sonra, form kapanmakta ve kullanıcıyı farklı jant kasnağı kesit profilleri arasından seçim yapmaya yönlendiren bir arayüz formu açılmaktadır. Bu kullanıcı formunda Profil-1, Profil-2, Profil-3 veya Profil-4 olmak üzere dört farklı tasarım seçeneği bulunmaktadır. Kullanıcı bu profillerden birinin seçimini yaptıktan sonra, form kapanmakta ve parametrelerin girişine olanak sağlayan bir başka form açılmaktadır. Bu kullanıcı formunda, gerekli parametrelerin açıkça belirtildiği bir resim kutusu ve her parametre için ilgili boş metin kutuları yer almaktadır.

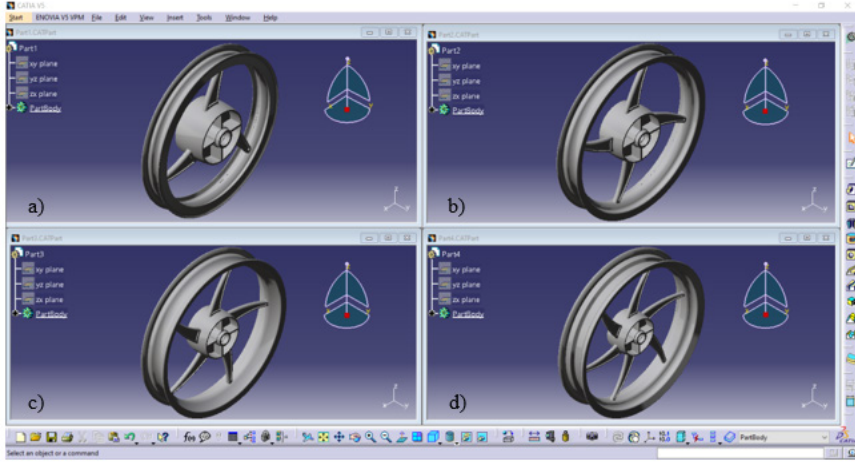
Kullanıcı tarafından girilen değerlerin, formda belirtilen aralıklar içinde olması gerekmektedir. Belirtilen değerler girildikten ve tasarım parametreleri tamamlandıktan sonra, “Çiz” düğmesine basıldığında, metin kutularına girilen değerlere dayalı olarak model oluşturulmaktadır. Bu süreç, hem kullanıcı dostu bir tasarım arayüzü sağlamayı hem de tasarım sürecinde zaman ve iş gücü tasarrufu sağlamayı amaçlamaktadır.

Programın esnekliğini ve uyarlanabilirliğini göstermek için, dört farklı jant modelinin her biri için dört farklı jant kasnağı kesit profili ve bu profillere ait parametrelere farklı değerler tanımlanmış ve Tablo 1’de sunulmuştur. Bununla birlikte, programın yeteneklerini daha iyi anlamak için her bir model için Tablo 1’deki dört farklı profil ve farklı parametre değerleri tanımlanan jant tasarımı sonuçları Şekil 7-10’da gösterilmiştir.

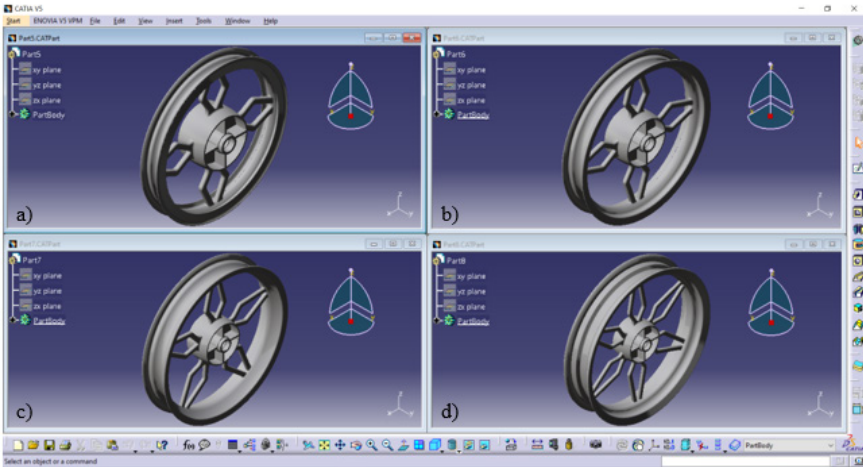
Elde edilen sonuçlar, geliştirilen otomasyon algoritmasının başarılı bir şekilde çalıştığını ve belirlenen parametrelere dayalı olarak doğru modeller oluşturabildiğini göstermektedir. Bu çalışma, CAD yazılımlarında parametre tabanlı otomasyon süreçlerinin endüstriyel tasarım verimliliğini artırmak için nasıl etkili bir araç olarak kullanılabileceğini net bir şekilde ortaya koymaktadır.

Tablo 1. Farklı modeller için tasarım parametreleri

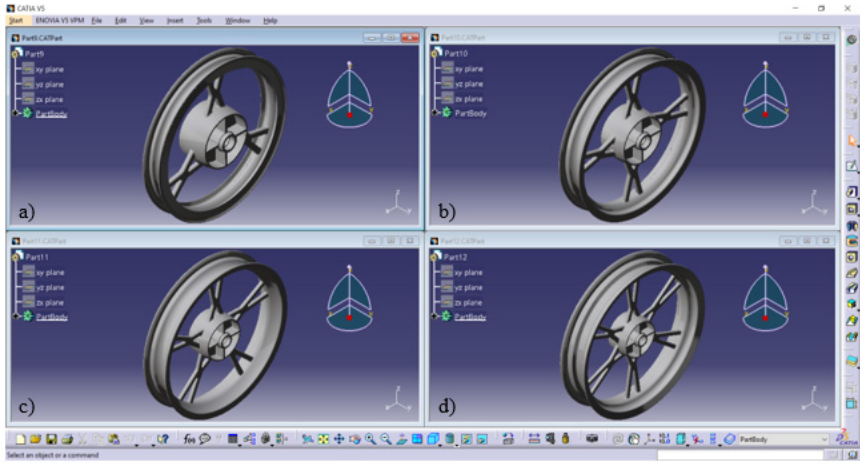
Parametreler	Model-1-2-3-4			
Profil tipleri	Profil-1 (a)	Profil-2 (b)	Profil-3 (c)	Profil-4 (d)
Jant çapı	360	400	450	500
Jant dış genişliği	50	70	90	110
Jant iç genişliği	36	55	69.4	80
Jant et kalınlığı	4	5.8	6.7	7
Jant kolu adedi	3	4	5	6



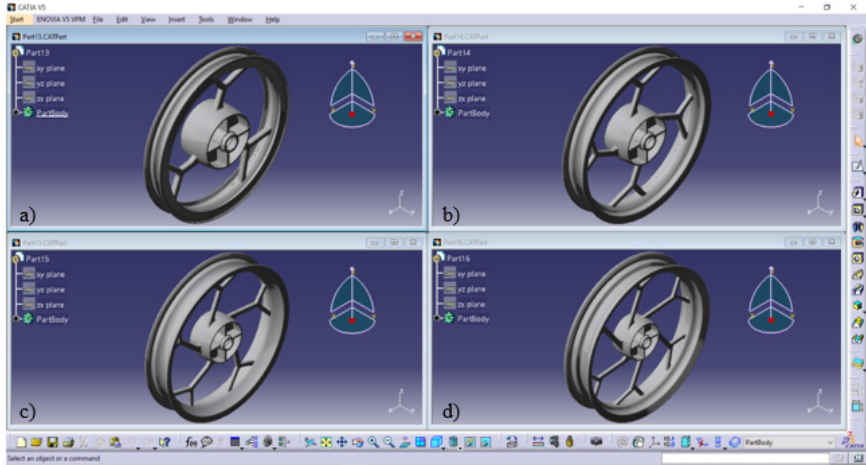
Şekil 7. Model-1'e ait tasarımlar: a) Profil-1, b) Profil-2, c) Profil-3, d) Profil-4



Şekil 8. Model-2'ye ait tasarımlar: a) Profil-1, b) Profil-2, c) Profil-3, d) Profil-4



Şekil 9. Model-3'e ait tasarımlar: a) Profil-1, b) Profil-2, c) Profil-3, d) Profil-4



Şekil 10. Model-4'e ait tasarımlar: a) Profil-1, b) Profil-2, c) Profil-3, d) Profil-4

4. SONUÇLAR

Bu çalışma, motosiklet jantı CAD modellerinin oluşturulması için otomasyon süreçlerinin geliştirilmesine yönelik olarak CATIA yazılımında makro uygulamaları ve Visual Basic programlamanın etkin kullanımını ortaya koymuştur. Geliştirilen sistem, tekrarlayan tasarım süreçlerini otomatikleştirerek modelleme süresini önemli ölçüde azaltmakta, hata oranını en aza indirerek tasarım doğruluğunu yükseltmekte ve üretim süreçlerine doğrudan katkı sağlamaktadır.

Önerilen yaklaşım, makro kayıt işlevi ve parametrik modelleme teknikleri ile tasarım süreçlerini standart hale getirerek manuel müdahale ihtiyacını en aza indirmektedir. Bu bağlamda, Visual Basic araçlarının sağladığı kullanıcı dostu arayüz ve veri giriş kontrolleri, insan-makine etkileşimini kolaylaştırarak tasarım süreçlerini daha sistematik hale getirmektedir. Böylece, motosiklet jantı CAD modelleme için gereken sürecin büyük ölçüde otomatikleştirilmesi teknik beceri gereksinimi azaltılmış ve tasarım süreci için gereken uzman veya nitelikli kişilere ihtiyaç duyulmadan uygulanabilir duruma getirilmiştir. Dolayısıyla tasarım maliyetleri önemli ölçüde düşmektedir.

Günümüz üretim trendleri göz önüne alındığında, esneklik ve özelleştirilebilirlik giderek daha önemli hale gelmektedir. Bu çalışma kapsamında geliştirilen sistem, kullanıcıların ihtiyaçlarına göre özelleştirilebilir tasarımlar oluşturmasını sağlamaktadır. Kullanıcılar, belirlenen parametreler doğrultusunda tasarımlarını önceden değerlendirebilmekte ve üretim sürecini daha bilinçli bir şekilde yönetebilmektedir.

KAYNAKÇA

- Wayzode, N. D., & Tupkar, A. B. (2012). Customization of Catia V5 for design of shaft coupling. In *Int. Conf. emerging frontiers in technology for rural area (EFITRA) IJCA* (pp. 30-33).
- Kumbhar, R., Pawar, S., Jadhav, D., & Dhanrale, N. (2014). Customization of Catia V5 for creating different types of holes on disc wheel. *International Journal of Engineering Research*, 3(5).
- Rojas-Sola, J. I., del Río-Cidoncha, G., Ortiz-Marín, R., & López-Pedregal, J. M. (2020). Design and development of sheet-metal elbows using programming with visual basic for applications in CATIA. *Symmetry*, 13(1), 33.
- Nayak, H. B., Trivedi, R. R., & Araniya, K. K. (2012). Drawing automation of reactor nozzle. *Int. J. Eng. Res. Appl*, 2(1), 281-286.
- Ali, M. B., Azhar bin Shafie, S., Daud, M. A. M., Zakaria, K. A., & Latif, M. J. A. (2018). Implementation Of Automation Process In Generating Cad Model-for Rim Wheel. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*.
- Peipei, G., & Lufeng, L. (2011, September). Parametric design of gear shaft based on Pro/E. In *2011 International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC)* (pp. 2743-2745). IEEE.
- Zhou, S., & Qin, L. (2013, June). Parametric design of turbodrill bearing section based on VB and Solidworks. In *Proceedings of the 2013 IEEE 17th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD)* (pp. 391-394). IEEE.
- Sun, B., Qin, G., & Fang, Y. (2011, August). Research of standard parts library construction for SolidWorks by Visual Basic. In *Proceedings of 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology* (Vol. 5, pp. 2651-2654). IEEE.
- Patwardhan, M. V., & Nimbalkar, U. (2021). Catia customization for Design and Modeling of Two stage spur Gearbox. *International Journal of Advanced Science Computing and Engineering*, 3(3), 113-122.
- Trivedi, R. D., Shah, D. B., & Patel, K. M. (2013). 3D parametric modeling for product variants using case study on inner ring of spherical roller bearing. *Procedia engineering*, 51, 709-714.
- Zbiciak, M., Grabowik, C., & Janik, W. (2015, October). An automation of design and modelling tasks in NX Siemens environment with original software-generator module. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 95, No. 1, p. 012117). IOP Publishing.
- Joshi, H., Ghole, P., Shirse, S., & Madke, S. (2016, December). Automated CAD modelling of mechanical components. In *International Conference on Communication and Signal Processing 2016 (ICCASP 2016)* (pp. 229-233). Atlantis Press.

- Joshi, H., Ghole, P., Shirse, S., & Madke, S. (2016, December). Automated CAD modelling of mechanical components. In *International Conference on Communication and Signal Processing 2016 (ICCASP 2016)* (pp. 229-233). Atlantis Press.
- Sawant, Y. H., & Nimbalkar, U. M. (2015). Automated Modeling of Screw Conveyor Components in CATIA. *International Journal of Engineering and Technical Research*, (4), 112-116.
- Mokhede Y, Chikshe S, Ghavate R. (2017). Automation of Bearing Modelling and Drafting using CATIA – VBA Approach. *International Conference on Ideas, Impact and Innovation in Mechanical Engineering*; 5(6), 471–477.
- Siddesh S, Suresh BS. Automation of Generating CAD Models. *Journal of Mechanical Engineering and Automation* 2015; 5(3B): 55–58.
- Fan, Q., Liu, G., & Wang, W. (2011). Development of Die Sets standard parts library based on Pro/E. *Procedia Engineering*, 15, 3802-3807.
- Rojas-Sola, J. I., del Río-Cidoncha, G., Ortíz-Marín, R., & Cebolla-Cano, A. (2023). Design and Development of a Geometric Calculator in CATIA. *Symmetry*, 15(2), 547.
- Rojas-Sola, J. I., del Río-Cidoncha, G., Ortíz-Marín, R., & Moya-Ocaña, J. A. (2023). Design and Development of a Macro to Compare Sections of Planes to Parts Using Programming with Visual Basic for Applications in CATIA. *Symmetry*, 15(1), 242.
- Kumar, P. V., Hallika, P. M. S., & Singh, J. (2024). Advancements in lightweight two-wheeler rim design: a finite element analysis approach with diverse materials. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 1-13.
- Crf300l-tubeless-wheels-1.(t.y.). Adventure Motorcycling Handbook. Eriřim adresi <https://adventure-motorcycling.com/2023/07/10/crf300l-tubeless-wheels-1/>
- Classic-brochure. (t.y.). Central Wheel Components. Eriřim adresi <https://www.central-wheel.co.uk/pub/media/wysiwyg/downloads/pdfs/classic-brochure.pdf>
- Wheel-rims. (t.y.). Motorcycle Wheel Rims. Eriřim adresi <https://burtonbikebits.net/wheel-rims/>

BÖLÜM 3

KÖPRÜLÜ KREN SİSTEMLERİNİN DESTEK AYAKLARINDAKİ BURKULMA DEFORMASYONUN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Engin ERBAYRAK¹

¹ Engin ERBAYRAK, Doç. Dr., İzmir Demokrasi Üniversitesi, E-mail: engin.erbayrak@idu.edu.tr

1-Giriş

Günümüzde özellikle ağır sanayi de büyük yükler kren mekanizmaları yardımıyla kaldırılabilir, taşınabilir ve çeşitli yönlerde hareket ettirilebilmektedir. Kren sisteminin çalışma mekanizması kren üzerine yerleştirilen vinç elemanın yükü yatay ve dikey olarak taşıması üzerinedir. Burada yük vince kanca ara elemanı kullanılarak bağlanmaktadır. Taşınacak yükün ağırlığına göre kren mekanizması tek kollu veya çift kollu olarak tasarlanabilmektedir. Transport tekniğinde kren mekanizmaları süresiz mekanizmalar olarak ifade edilmektedir (Demirsoy M., 1991). Bunun sebebi kren mekanizmaların sürekli çalışma prensibine göre çalışmasıdır.

Kren mekanizmaları çalışma mekaniği açısından hidrolik, paletli ve elektrikli olmak üzere üç kısımda incelenmektedir. Bunlar içerisinde elektrikli vinç motoru ile tahrik edilen köprülü krenler en sık kullanılanıdır. Köprülü kren mekanizmasında hareket mekanizması kartezyen koordinatlar ile tanımlanabilmektedir. Mekanizma x ekseninde ileri geri, Y ekseninde kaydırma ve Z ekseninde ise yük indirip kaldırma hareketi yapmaktadır. Köprülü kren mekanizmasında kullanılan kancanın kaldırma hızı, köprü ilerleme hızı, motor gezinme mesafesi ve kren yüksekliği gibi parametreler tasarımda önemli bir rol oynamaktadır (Köprülü krenler., 2018). Şekil 1 de birçok sektörde kullanılan çift kollu köprülü kren sistemi görülmektedir.



Şekil 1.Çift kollu köprülü kren sistemi (Kenan Cranes., 2023)

Bu çalışmada sektörde kullanılan köprülü kren sistemlerinin destek ayaklarında meydana gelen burkulma durumu incelenecektir. Bu

kapsamda Euler yaklaşımı kullanılarak, destek ayaklarının burkulma koşulları incelenecek ve uygun sınır şartı altındaki burkulma yükleri belirlenecektir. Köprülü kren mekanizmasının yük taşıması sırasında bu ayaklarda meydana gelen yükler sonlu elemanlar yaklaşımı ile belirlenerek, ayaklarda burkulma deformasyon durumu irdelenecektir.

2-Euler Burkulma

Euler teoreminde uzun, ince kesitli parçaların kritik burkulma yük değeri, mukavemet yaklaşımları kullanarak belirlenmektedir. Euler burkulma teoreminin uygulanabilmesi için, herhangi bir kesit geometrisine sahip parçanın yeteri kadar uzun ve parça üzerinde meydana gelen kritik gerilmenin parçanın akma gerilmesinden az olması gerekmektedir. Parçanın uzunluğunun Euler teoremine uygunluğunu belirlemek amacıyla (Studocu., 2023)

$$\frac{L_e}{r_{min}} > \sqrt{\frac{\pi^2 E}{\sigma_y}} \quad (1)$$

eşitliği kullanılmaktadır. Burada, r minimum atalet yarıçapını (atalet momentinin kesit alanına oranı), y ise parça malzemesinin akma mukavemetini ifade etmektedir. Eşitliğin sol tarafında yer alan eşdeğer burkulma uzunluğunun atalet yarıçapına oranının büyük olması, çubuğun uzun olduğunu ve Euler yaklaşımının uygulanabileceğini belirtmektedir. Ayrıca eşitliğin sol tarafında kalan kısım narinlik olarak ifade edilmektedir. Bu çalışmada kren mekanizmasında kullanılan destek ayakların sınır şartları belirlenerek, Euler burkulma yük formülü belirlenecektir. Kren mekanizmasında kullanılan destek ayaklar krenin üst kısmına ankastre mesnet şeklinde tutturulurken alt kısmı ise serbest olacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu kapsamda bir uç ankastre bir uç serbest sınır şartı için kritik burkulma yük formülü denklem 2 de gösterilmektedir (E., Koç, 2010).

$$P_{cr} = 0.25 \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (2)$$

Burada E parça malzemesinin Elastisite modülünü, I parça geometrisinin atalet momentini ve L ise parça uzunluğunu göstermektedir.

Çalışma kapsamında kullanılacak kren sistemi ve kren sistemini oluşturan destek ayaklar yapısal çelik malzemeden üretilmiştir. Yapısal çelik malzemenin mekanik özellikleri tablo 1 de gösterilmektedir.

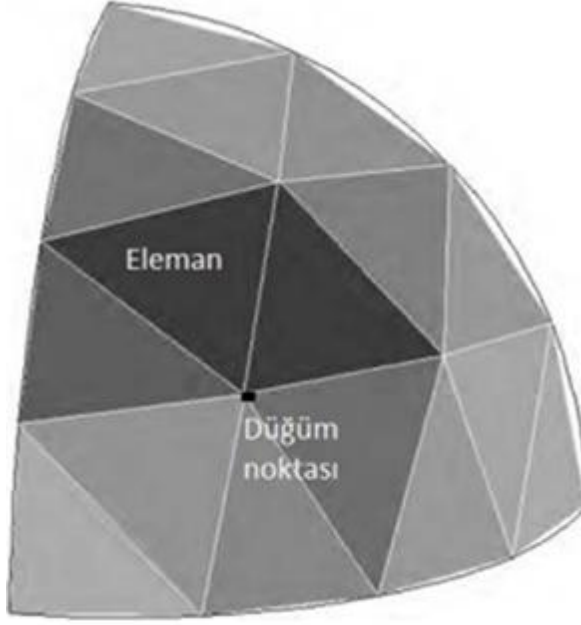
Tablo 1 Yapısal çelik mekanik ve fiziksel özellikleri (Eurocode.applied., 1993)

Özellik	Birim	Değer
Elastisite Modülü	MPa	200000
Kayma Modülü	MPa	77000
Poisson oranı		0.3
Yoğunluk	kg/m ³	7850

Kritik burkulma yük değeri teorik yaklaşım ile hesaplanan kren destek ayaklarının burkulma durumları sonlu elemanlar analiz yöntemi uygulanarak da gerçekleştirilecektir. Sonlu elemanlar analizinin uygulama adımlarımdan önce yöntemin teorik yaklaşımı bölüm üçte detaylı olarak açıklanmaktadır.

3-Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu Eleman Yöntemleri (SEY), bugün modelleme ve simülasyonda gelişmiş teknik sistemlerde önemli bir rol oynamaktadır. Bu, kısmi diferansiyel denklemleri bir, iki veya üç oda değişkeni ile çözmek için genel bir sayısal yöntemdir. SEY, büyük bir sistemi sorunu çözmek için sonlu elementler adı verilen daha küçük, daha basit parçalara ayırır. Bu parçalara element denir ve bu parçaların düğümlerden oluştuğu noktalardır. Gerilme ve birim şekildeki değişiklikler, bu düğümlerin kaydırılmasıyla belirlenir (Liu., G.R. and Quek., S. S., 2003). Birincisi voltaj uzunluğu problemini çözmek için kullanıldı. Bu yöntem daha sonra termal analiz, sıvı akış analizi, piezoelektrik analiz, modal analiz ve daha fazlasını geliştirmek için geliştirilmiştir. SEY, analitik olarak elde edilmesi zor olan problem değişkenlerinin dağılımı için yaklaşık bir çözüm sağlamayı amaçlayan sayısal bir yöntemdir. Çözüm süreci, bilinen fizik yasalarının, basit geometri ile sonlu elemanlar yerleştiren tüm küçük unsurlara uygulayarak elde edilir.



Şekil 2. Sonlu elemanlar gösterimi (Liu., G.R. and Quek., S. S., 2003)

Bir elemanın yapısal analiz için sonlu elemanlar denklemi şekil değişimi enerjisi kullanılarak aşağıda gösterildiği gibi formüle edilebilir (Liu., G.R. and Quek., S. S., 2003);

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_{V_e} \varepsilon^T c \varepsilon dV = \frac{1}{2} \int_{V_e} d_e^T B^T c B d_e dV = \frac{1}{2} d_e^T \left(\int_{V_e} B^T c B dV \right) d_e$$

(3)

burada e ifadesi elemanı, B birim şekil değişim matrisini, c sabit değeri, T transpoze ifadesini, ε birim şekil değişimini göstermektedir.

Denklem 3 de birim şekil değişim enerjisi formülünde yer alan $\int_{V_e} B^T c B dV$

ifadesi rijidlik matrisi k_e eşit olduğuna göre, birim şekil değiştirme enerjisi rijidlik matrisi cinsinden (Liu., G.R. and Quek., S. S., 2003);

$$\Pi = \frac{1}{2} d_e^T k_e d_e$$

(4)

şeklinde ifade edilir.

Birim şekil değişim enerjisi formülünde yer alan ifadeleri kuvvetin yaptığı iş formülü üzerinde kullanırsak;

$$W_f = \int_{V_e} d_e^T N^T f_b dV + \int_{S_e} d_e^T N^T f_s dS = d_e^T \left(\int_{V_e} N^T f_b dV \right) + d_e^T \left(\int_{S_e} N^T f_s dS \right)$$

Düğüm kuvvetleri;

$$F_b = \int_{V_e} N^T f_b dV \quad ; \quad F_s = \int_{S_e} N^T f_s dS$$

(5)

Denklem 5 de yer alan sınır kuvvetleri kullanılarak iş formülü yeniden yazılırsa (Liu., G.R. and Quek., S. S., 2003);

$$W_f = d_e^T F_b + d_e^T F_s = d_e^T f_e$$

(6)

Elde edilen düğüm kuvvetleri, sertlik matrisi ve düğüm yer değiştirme vektörü u'yu lineer olarak ifade edebilecek ayrık eleman denklemini;

$$F = Kq$$

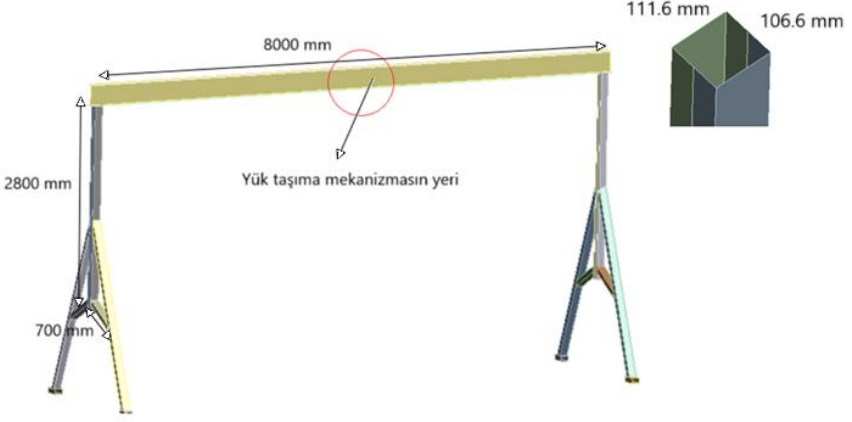
(7)

şeklinde ifade edilmektedir.

4-Sonlu Elemanlar Yönteminin Uygulanması

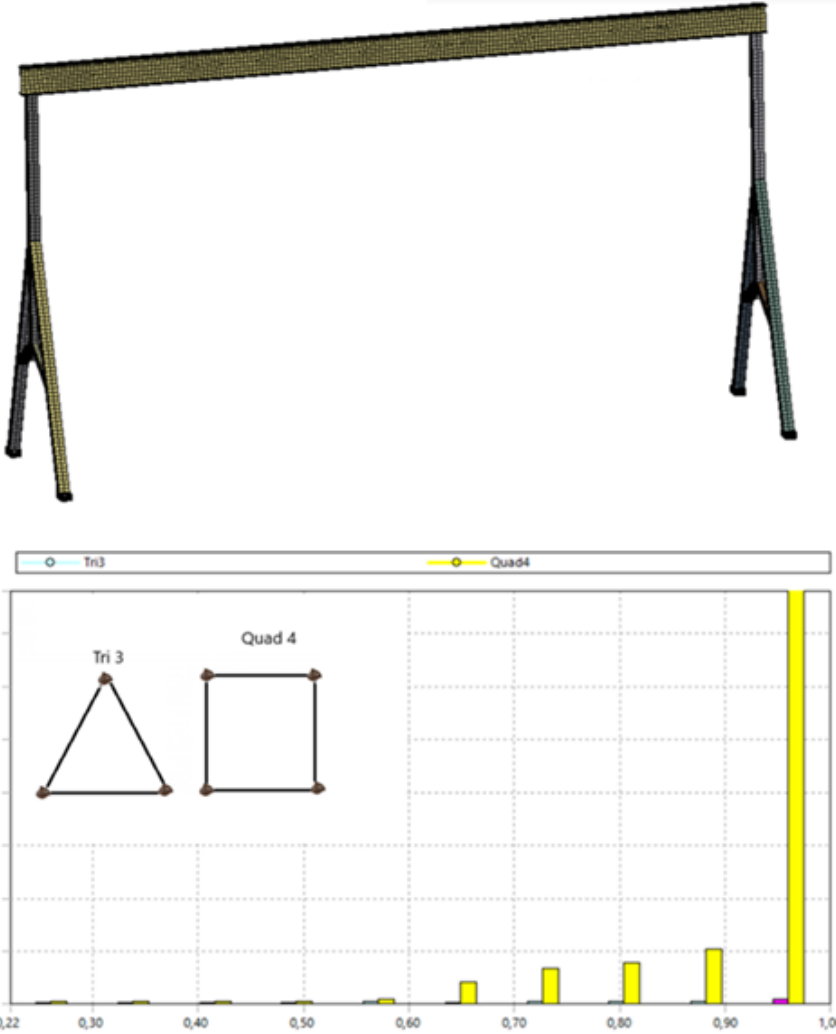
Bu kısımda köprülü kren sisteminin ANSYS sonlu elemanlar programında modellenmesi, sonlu elemanlarına ayrılması ve destek ayaklarında meydana gelen kritik burkulma yük değerlerinin hesaplanması açıklanacaktır.

Analizin uygulama adımı olarak köprülü kren sisteminin *Space-Claim* modülü üzerinden üç boyutlu tasarımı yapılmıştır. Tasarım montaj modülü kullanılarak kren mekanizmasının her bir parçası ayrı ayrı olarak çizilip, montajlanmıştır. Üç boyutlu tasarımı tamamlanan kren mekanizmasının *Workbench* modülü üzerinden yapısal analizi yürütülmüştür. Yapısal analiz iki farklı analizin birleştirilmesi ile yürütülmüştür. Sonlu elemanlar programında ilk olarak yapısal analiz seçilerek kren sistemi oluşturulmuş, daha sonra burkulma analizi ile yapısal analiz çözüm basamakları üzerinden birleştirilmiştir. İki analizinde çözüm basamakları üzerinden birleştirilmesinin sebebi aynı sınır şartları altında analizin yürütülmek istenmesindendir. Kren sisteminin tasarımının program üzerinden gösterimi şekil 3'te verilmektedir.



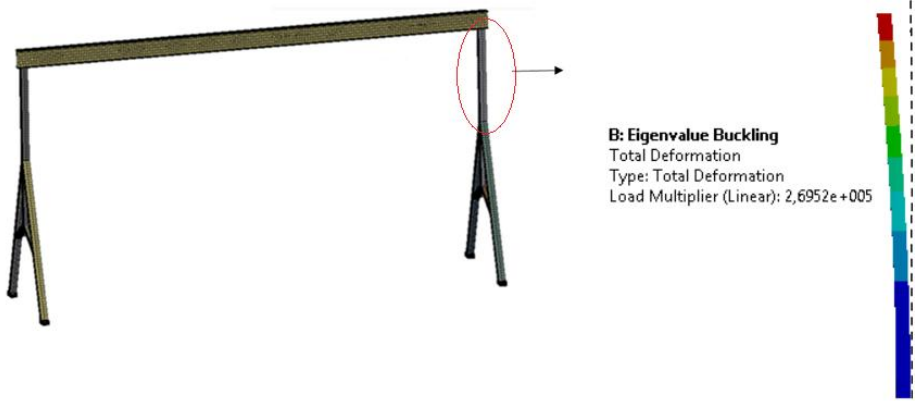
Şekil 3 Kren mekanizmasının sonlu elemanlar programında tasarımı

Sonlu elemanlar programında tasarımı tamamlanan köprülü kren sisteminin sonlu elemanlarına ayrılması işlemi gerçekleşmiştir. Sonlu elemanlar yaklaşımda iki farklı eleman kullanılmıştır. Bunlardan bir tanesi 4 düğüm noktalı dörtgen (Quad) eleman, bir diğeri ise 3 düğüm noktaları üçgen eleman (Tri) dir. Her iki elemanında sonlu elemanlarda kullanılan eleman dizilimi lineer eleman dizilimidir. Toplam kren sisteminin düğüm sayısı 5641 ve eleman sayısı ise 5455 dir. Bununla birlikte kren destek ayaklarının düğüm sayısı 520 ve eleman sayısı ise 512 dir. Kren sisteminin tamamında iki farklı eleman kullanılırken, destek ayaklar için sadece dörtgen eleman kullanılmıştır. Sonlu elemanlarına ayrılan köprülü kren mekanizmasının ortalama ağ kalitesi (0.91) ve ortalama ağ geometri oranı (Aspect ratio) (1.23) sonlu elemanlar analizi için uygun değerdedir (Gabriel., J.D. ve John., A.S., 1985). Sonlu elemanlarına ayrılmış köprülü kren mekanizması, eleman kalitesi ve ağ geometri oranı ve kullanılan elemanlar şekil 4 de gösterilmektedir.



Şekil 4 Kren mekanizmasında kullanılan elemanlar ve sonlu elemanlar görüntüsü

Sonlu elemanlarına ayrılma işlemi tamamlanan kren sisteminin destek ayağı için kritik burkulma yük değeri belirlenmiştir. Kren sisteminde yer alan destek ayağı bir noktasından ankastre bir noktasından serbest uç şeklinde sınır şartları bulunmaktadır. İlgili sınır şartları uygulanarak eigenvalue burkulma analizi yürütüldüğünde birinci burkulma moduna karşılık gelen deformasyon ve kritik burkulma yük değeri şekil 5 de gösterilmektedir.



Şekil 5 Kren mekanizmasının ayağında meydana gelen burkulma deformasyonu ve yük değeri

Şekil 5 de kren mekanizmasında yer alan destek ayağın kritik burkulma deformasyonu ve bu deformasyona ait kritik burkulma yük değeri görülmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak belirlenen bu değer teorik yaklaşım ile de doğrulanmıştır. Bu kapsamda geometrik ve malzeme özellikleri bilinen destek ayağın denklem 1 ve 2 yer alan eşitlikler kullanılarak teorik olarak kritik burkulma yük değeri hesaplanmıştır. Öncelikle denklem 1 de yer alan eşitlik kullanılarak ilgili destek ayağının Euler yaklaşımına uygunluğu belirlenmiştir. Daha sonra denklem 2 de yer alan eşitlik kullanılarak kritik burkulma yük değeri hesaplanmıştır. Elde edilen teorik değer sonlu elemanlar yaklaşımı ile elde edilen değer ile karşılaştırılmış ve Tablo 2 de sunulmuştur.

Tablo 2. Destek ayakta meydana gelen kritik burkulma yük değerlerinin karşılaştırılması

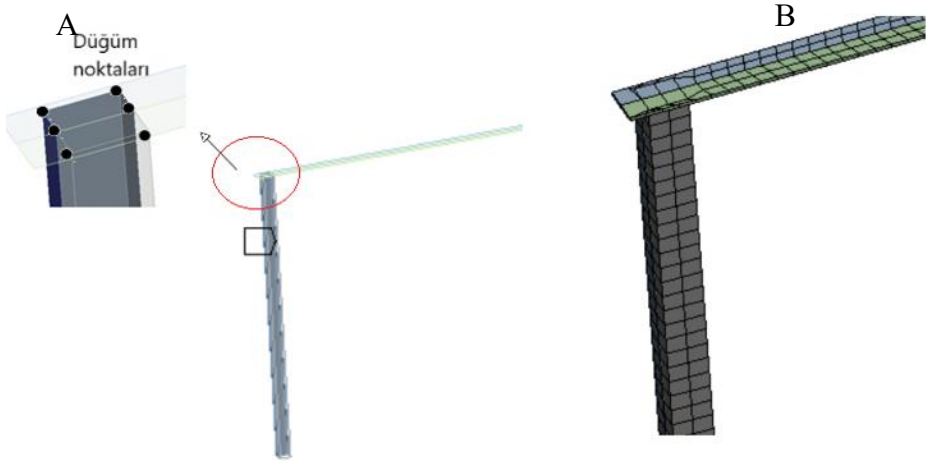
Yöntem	Burkulma yük değeri (N)	Hata oranı (%)
SEY	26520	2.15
Teorik	25950	

Tablo 2 de görüldüğü gibi destek ayaklarda meydana gelen kritik burkulma yük değerlerinin karşılaştırılması sonucunda sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen kritik burkulma yük değeri ile teorik yaklaşımdan elde edilen kritik burkulma yük değeri arasındaki hata payının oldukça küçük olduğu görülmektedir. Böylece sonlu elemanlar ile belirlenen kritik burkulma yük değerinin doğrulaması teorik yaklaşım ile yapılmıştır.

Çalışma kapsamında kullanılacak kren mekanizmasının ortalama yük kapasitesi 14.6 kN olarak belirlenmiştir (Kren hesabı, 2015). İlgili yük

değeri sonlu elemanlar modelinde lokal bölge oluşturularak uygulanmıştır. Destek ayaklarda meydana gelen yük değerleri destek ayakların kren mekanizmasına temas ettiği noktalarının tepki kuvvetlerinden belirlenmiştir. Yükleme durumunda temas noktalarında meydana gelen düğüm yer değiştirme değerleri kullanılarak düğüm kuvvetleri hesaplanmıştır. İlgili düğüm kuvvet denklemleri denklem 5-7 gösterilmiştir.

Kren sisteminde üst kısım ile destek ayak arasında kurulan temas ve temasa ait ağ yapısı görüntüsü şekil 6 da gösterilmektedir.



Şekil 6 Kren sisteminde üst kısım ile destek ayak arasında kurulan temas ve temasa ait ağ yapısı görüntüsü

Temas tepki kuvvetleri sonlu elemanlar programında ilgili temasların programda çözüme taşınması ile belirlenmektedir. Çözüme taşınan temaslar yükleme koşulları altında üzerlerinde meydana gelen tepki kuvvetlerini göstermektedirler. Temas noktasında meydana gelen tepki kuvveti değeri ve sonlu elemanlar programında gösterilişi şekil 7 de gösterilmektedir.



Şekil 7 Temas noktasındaki tepki kuvveti ve sonlu elemanlar programında gösterilişi

Şekil 7 de görüleceği gibi temas noktasında belirlenen tepki kuvvet değeri destek ayağın burkulma yük değerinden daha düşük değerdedir. Bu sebeple kren mekanizmasında kullanılacak olan 14.6kN yüke karşılık kren mekanizmasının destek noktası olan ayaklarında herhangi bir burkulma deformasyonu (flambaj) beklenmemektedir.

5- SONUÇ

Bu çalışmada transport alanında yaygın olarak kullanılan kren mekanizmasının destek ayaklarında meydana gelebilecek burkulma yük değerleri belirlenmiştir. Kritik burkulma yük değerleri teorik ve sonlu elemanlar yöntemi ile ayrı ayrı olarak hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar ile hesaplanan kritik burkulma yük değeri teorik sonuç ile yakınsak olarak elde edilmiştir. Kren mekanizmasının taşıyabileceği ortalama yük değeri uygulandıktan sonra destek ayaklarında oluşacak yük değeri sonlu elemanlar analizinde temas bölgelerinden elde edilmiştir. Temas bölgesindeki tepki kuvvetleri düğüm noktası kuvvetlerinden belirlenerek, yükleme sonrası destek ayakta oluşan tepki kuvvetleri belirlenmiştir.

Yapılan analizler sonucunda kren mekanizmasının stabilitesini de sağlayan destek ayaklarda meydana gelen tepki kuvvetinin ayaklarda herhangi bir burkulma deformasyonuna (Flambaj) sebep olmadığı gözlemlenmiştir.

6- REFERANSLAR

- Demirsoy, M. (1991). Transport Tekniği Kaldırma Makineleri. Birsen Yayınevi, Cilt: 1, 332 syf, İstanbul
- Gabriel J. D., and John., A., S. (1985). ANSYS engineering analysis system user's manual. Houston, Pa. :Swanson Analysis Systems
- Kenan Cranes, (2023). EN1090 Standart Gezer Köprülü Vinç. <http://tr.gantrycranesupplier.com/gantry-crane/single-girder-chinese-gantry-crane.html>
- Koç, E. (2010). Makine Elemanları. Nobel Yayınları, Cilt: 1, Adana
- Köprülü Krenler, (2018).Worldpres.com. <https://istanbultavanvinci.wordpress.com/2018/03/13/koprulu-krenler-koprulu-gezer-vinc>
- Kren hesabı (2015). Lisans sahibi Ahmet Özbayrak <https://www.st1453.com/assets/images/EG/KH.pdf>
- Liu, G. R., & Quek, S. S. (2003). The finite element method: A practical course. Oxford, England: Butterworth-Heinemann
- Mechanical properties of steel, (1993). Eurocode applied.com. <https://eurocodeapplied.com/design/en1993/steel-design-properties>
- Studocu, (2023). Long (Selender) columns. Structural Analysis A (CON4336). Technological and Higher Education Institute of Hong Kong. <https://www.studocu.com/hk/document/technological-and-higher-education-institute-ofhong-kong/structural-analysis-a/ch6-long-column/12513279>

BÖLÜM 4

AL 1050-H14 SAC LEVHALARININ SPIF YÖNTEMİ İLE ŞEKİLLENDİRİLMESİNDE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN İNCELENMESİ

Hakan MUMCU¹

¹ Hakan MUMCU, Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, ORCID: 0009-0005-2306-5522

1. GİRİŞ

Artımlı Şekillendirme (Incremental Forming – IF), sac metal şekillendirme süreçlerinde geleneksel kalıplara duyulan ihtiyacı ortadan kaldıran yenilikçi bir üretim yöntemidir. Özellikle düşük hacimli üretimler, prototipleme ve kişiselleştirilmiş üretim uygulamaları için maliyet bakımından etkin ve esnek bir alternatif sunmaktadır. Bu yöntemde, şekillendirme ucu, sac metal yüzeyi üzerinde belirlenen bir takım yolu boyunca adım adım hareketi ile sac metalin plastik deformasyona maruz bırakılarak istenen formu oluşturmaktadır. IF, geleneksel kalıp ve preslerle yapılan şekillendirme yöntemleriyle kıyaslandığında daha düşük takım maliyeti, prototipleme süreçlerine uygunluğu ve yüksek geometrik esneklik gibi avantajlar sağlamaktadır.

Bu yöntemin en yaygın uygulamalarından biri olan Tek Nokta Artımlı Şekillendirme (Single Point Incremental Forming – SPIF), yalnızca tek bir takım ucu ile şekillendirme işlemini gerçekleştirirken, İki Nokta Artımlı Şekillendirme (Two Point Incremental Forming – TPIF) ise bir destek elemanı kullanılarak deformasyon kontrolü sağlamaktadır. Ayrıca, karmaşık geometriye sahip parçaların üretiminde çok aşamalı artımlı şekillendirme yöntemleri de yaygın olarak tercih edilmektedir.

IF, esnekliği ve düşük maliyetli üretim avantajlarıyla havacılık, otomotiv, biyomedikal ve özel tasarım endüstrilerinde giderek daha fazla ilgi görmektedir. Bununla birlikte, proses sırasında ortaya çıkan gerilme-birikim mekanizmaları, geri esneme ve yüzey kalitesi gibi faktörler, yöntemin endüstriyel ölçekte uygulanabilirliğini belirleyen kritik unsurlar arasında yer almaktadır. Dolayısıyla, IF yönteminin optimizasyonu, deformasyon mekanizmalarının incelenmesi ve proses parametrelerinin doğru belirlenmesi, bu alandaki araştırmaların temel odak noktalarından oluşmaktadır. Literatürde bu alanda yapılan bazı çalışmalar aşağıda verilmiştir.

SPIF yöntemi ile ilgili önceki bazı çalışmalar; Martins vd. (2008), temel deformasyon modları, membran analizi ve sünek hasar mekanizması kullanarak kapalı formda modellemiştir. Deneysel veriler ve literatür sonuçları, modelin proses parametrelerinin etkisini başarıyla açıklamış ve SPIF'in yüksek şekillendirilebilirliğini anlamaya katkı sağlamıştır. Filice vd. (2002), AA 1050-0 alüminyum alaşımlı sac levhalarının mekaniklerini ve şekillendirilebilirliğini incelemiş, CNC kontrollü deneyler sonucunda özgün bir Şekillendirme Limit Diyagramı (FLD) elde edilmiştir. Elde edilen FLD, geleneksel yöntemlere kıyasla daha yüksek şekillendirme limitlerine ulaştığını göstermiş ve yöntemin endüstriyel uygulanabilirliği doğrulanmıştır. Tisza (2012), AA 1050 sac levhalarının şekillendirilebilirliği teorik ve deneysel olarak incelenmiş, limit duvar açısı ve FLD belirlenmiştir. Deneysel bulgular, IF'nin geleneksel yöntemlere kıyasla daha

yüksek şekillendirilebilirlik sunduğunu ve özellikle küçük ölçekli üretim ile prototipleme süreçleri için büyük bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Mumcu (2009), 0.5 mm kalınlığındaki kesik kare piramit formunda şekillendirilen Al 1050-H14 sac levhalarının maksimum duvar açısı ve bu duvar açısındaki et kalınlıklarını araştırmıştır. Durante vd. (2009), AA 7075-T0 alüminyum alaşımlı saclar üzerinde takım devir hızının ve yönünün IF yöntemine etkisi deneysel olarak incelenmiş ve şekillendirme kuvvetlerinde azalma, sıcaklık artışında ise hızla orantılı bir yükselme görülmüştür. Ayrıca, yüzey pürüzlülüğünün takım dönüşünden etkilendiği ancak dönüş yönü ve hızının bu parametre üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Ham ve Jeswiet (2006), önemli parametreleri belirlemek amacıyla iki farklı Deney Tasarımı (Design of Experiments - DOE) uygulanmış ve ilerleme hızı, devir hızı, adım miktarı ile şekillendirme açısının parça oluşumu üzerindeki etkisi incelenmiştir. Küçük takım çapları ve kalın malzemeler kullanılarak şekillendirilebilirlik sınırlarının genişletilebileceğini ve adım miktarının maksimum şekillendirme açısı üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Gulati, vd. (2016), Al 6063 sacının şekillendirilebilirlik ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki altı temel parametrenin etkileri deneysel olarak incelenmiş ve Taguchi yöntemi ile optimize edilmiştir. Yağlamanın en etkili parametre olduğu, adım miktarı ve takım çapının ise şekillendirilebilirliği önemli ölçüde etkilediğini görülmüştür. Choudhary ve Mulay (2024), AA 1050, AA 6061-T6 ve AA 7075-T6 sac levhaların şekillendirilebilirliği karşılaştırılmış ve proses parametrelerinin etkisi deneysel ve istatistiksel analizlerle incelenmiştir. Optimum şekillendirme koşullarında mikro yapı, mikro sertlik ve geometrik doğruluk analizleri yapılmış, ayrıca takım çapı ve adım derinliği seçim kılavuzu oluşturulmuştur. Ghazi vd. (2023), proses parametrelerinin AA 1050 alüminyum alaşımının incelme ve şekillendirilebilirlik üzerindeki etkileri Taguchi deney tasarımı ve ANOVA ile incelenmiştir. Optimum parametrelerin doğrulama deneyleriyle güvenilir olduğu ve tahmin edilen değerlerle uyumlu olduğu görülmüştür. Azpen vd. (2018), AA 6061-T6 alüminyum alaşımından parçalar üretilmiş ve proses parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi Taguchi yöntemiyle incelenmiştir. En etkili parametrenin takım çapı olduğu ve en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri 0.3 μm olarak elde edilmiştir. Kumar vd. (2022), AA 2024 alaşımlı sacın kesik konik parçalarının yüzey pürüzlülüğü üzerine takım çapı ve şekillendirme açısındaki etkisi incelenmiştir. Düşük duvar açısı ve büyük takım çapının en düşük yüzey pürüzlülüğünü sağladığı görülmüştür. Echraf ve Hrairi (2014), yüzey pürüzlülüğü değişimini, dört proses parametresiyle incelenmiş ve Taguchi analizi ile ANOVA kullanılarak parametre seviyeleri optimize edilmiştir. Takım çapı ve dikey adım miktarı büyüklüğünün en büyük etkiye sahip parametreler olduğu görülmüştür. Dabwan vd. (2020), AA 1050-H14 sac metal levhalarının yüzey profili doğruluğunu etkileyen

takım çapı, adım derinliği ve sac kalınlığı gibi parametreler incelenmiştir. Takım çapı ve adım derinliğinin profil doğruluğu üzerinde etkili olduğu, ancak ilerleme hızının anlamlı bir etkisi olmadığı görülmüştür. Shrivastava ve Tandon (2024), SPIF yönteminde AA 1050-H14 sac metalde oluşan artık gerilmelerini azaltmak ve geometrik doğruluğu artırmak amacıyla ön ısıtma uygulanmıştır. 330°C’de ön ısıtılan numunelerin en düşük artık gerilme seviyelerine sahip olduğu ve ön ısıtma işleminin parçaların geometrik doğruluğunu artırarak geri esnemeyi azalttığı görülmüştür. Dufflou vd. (2007), SPIF yönteminde kuvvet gereksinimlerini etkileyen temel parametreler deneysel olarak incelenmiştir. Levha kalınlığının kuvvet üzerinde en belirgin etkiye sahip olduğu ve maksimum duvar açısına yakın bölgelerde kuvvet eğrisinde düşüş görülmüştür. Formisano vd. (2023), poliüretan levhalarını farklı takım yolu stratejileri kullanılarak sayısal olarak incelenmiş ve şekil verme kuvvetleri, enerji tüketimi ve deformasyon üzerindeki etkileri tespit edilmiştir. Eğimli yol stratejisinin enerji verimliliği sağladığı ve şekil verme hatalarını minimize ettiği görülmüştür. Yamashita vd. (2008), sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak artımlı şekillendirme yönteminin deformasyon davranışı sayısal olarak incelenmiş ve farklı takım yollarının etkileri analiz edilmiştir. Spiral takım yolunun daha homojen kalınlık dağılımı ve daha düzgün yüzey kalitesi sağladığı görülmüştür.

TPIF yöntemi ile ilgili önceki bazı çalışmalar; Asghari vd. (2017), AA 1050 sac levhalarının minimum kalınlık, geri esneme ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Takım çapının arttırılması minimum kalınlık ve yüzey kalitesini artırırken, geri esneme üzerinde olumsuz etki yaptığı görülmüştür. Devir hızı arttıkça yüzey kalitesi ve geri esneme iyileşirken, kalınlık dağılımı sınırlanmıştır. Ayrıca, duvar açısı ve adım miktarının arttırılmasının şekillendirme kabiliyetini ve yüzey kalitesini olumsuz etkilediği belirlenmiştir. Xiaoqiang vd. (2020), AA 2024-0 ve DC04 sac levhalarındaki takım çapı, adım miktarı ve interpolatör kalınlığı gibi parametrelerin yüzey pürüzlülüğü, şekillendirme kuvveti ve geometrik hata üzerindeki etkileri incelenmiştir. İnterpolatör kalınlığının yüzey pürüzlülüğünü dikey yönde azalttığı, yatay yönde ise artırdığı ve geometrik hatanın adım miktarı ile arttığı, takım çapının ise önce azalttığı sonra artırdığı görülmüştür. Attanasio vd. (2008), en iyi boyutsal doğruluk, yüzey kalitesi ve minimum levha incelmesini sağlamak için takım yolu tasarımı deneysel olarak değerlendirilmiş ve optimize edilmiştir. Ayrıca, sonlu elemanlar modeli kullanılarak proses parametrelerinin etkileri analiz edilmiş, simülasyon ile optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Mostafanezhad vd. (2018), proses parametrelerinin AA 1050 sacın incelme oranı ve şekillendirme kuvveti üzerindeki etkileri, Box-Bhenken deney tasarımı ve yanıt yüzey metodolojisiyle incelenmiştir. İncelme oranı için duvar açısının,

şekillendirme kuvveti için ise sac kalınlığının en etkili faktörler olduğu görülmüştür.

Literatürde, SPIF yöntemiyle şekillendirilen parçaların yüzey pürüzlülüğünü önemli ölçüde etkileyen faktörlerin etkisine dair uygun kılavuzların eksikliği nedeniyle, çeşitli parametreler ve bunların etkileşimlerinin yüzey kalitesine etkisi konusunda elde edilecek bilgiler, bu tekniğin üretim birimlerinde uygulanması için yeni bir perspektif sunacaktır. Bu nedenle, şekillendirilen parçaların yüzey kalitesine etkisi olan kritik giriş değişkenlerinin önemini araştırmak amacıyla deneysel çalışmalar yapmak büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, Al 1050 alüminyum sac levhalar hafiflik, yüksek yansıtıcılık ve mükemmel korozyon direnci gerektiren uygulamalar gibi avantajlı özellikleri nedeniyle otomotiv, ısıtma, soğutma, havalandırma ve mimari gibi çeşitli sektörlerde yaygın olarak kullanılabilen önemli bir alaşımdır. Bu çalışmanın amacı, SPIF yöntemiyle Al 1050 sac levhaların devir sayısı, ilerleme, duvar açısı, yağ, takım çapı, adım miktarı ve bunların etkileşimlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini belirlemektir. Kesik altıgen piramit formundaki Al 1050 alaşımlı sac levhalarının yüzey pürüzlülüğünü etkileyen, belirlenen proses parametreleri ve değerleri ile bu parametrelerin etkileşimleri konusunda bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada, yüzey pürüzlülüğü değişimi üzerindeki etkisini deneysel olarak değerlendirmek amacıyla altı farklı proses parametresi incelenmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Malzeme

Bu çalışmada, sac metal levha olarak Al 1050-H14 alüminyum alaşımı serisi kullanılmıştır. 1.2 mm kalınlığında olan sac malzeme 105 x 105 mm boyutlarında olacak şekilde giyotin ile kesilerek deney numuneleri hazırlanmıştır. Kullanılan bu malzemenin kimyasal bileşimi Tablo 2.1’de ve mekanik özellikleri Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.1 Al 1050-H14 Sac Malzemenin Kimyasal Bileşimi

%								PPM			%
Si	Fe	Cu	Mn	Ti	Zn	Mg	Cr	Pb	Cd	Hg	Al
0.11	0.26	0	0	0.01	0.01	0.01	10	10	0	0	99.58

Tablo 2.2 Al 1050-H14 Sac Malzemenin Mekanik Özellikleri

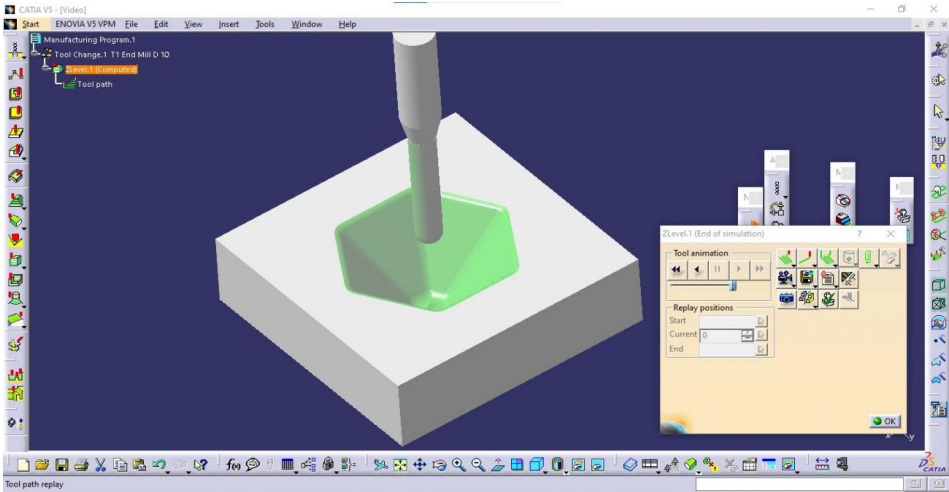
Çekme Gerilmesi (MPa)	Akma Gerilmesi (MPa)	A50 Uzama (%)
140	132	7.40

Al 1050 malzeme otomotiv parçaları, yapıların dış panelleri, ev aletleri, elektrik-elektronik eşyalar, mobilya, radyatör gibi geniş kullanılabildiği alanına sahiptir. Ayrıca derin çekme sürecine uygun sünük bir malzemedir. Bu malzeme, iki fazlı veya üç fazlı çeliklerle karşılaştırıldığında şekillendirilebilirliği oldukça yüksektir (Seçgin vd., 2018).

2.2. Deneyisel Yöntem

Artımlı şekillendirme yöntemi ile CNC dik işleme merkezinde parça üretimini gerçekleştirebilmek için öncelikle takım yolunun oluşturulması gerekmektedir. Takım yolunun oluşturulması aşamasında ise takım yolu stratejisi (yöntem), işleme payı (kütük), derinlik adım miktarı (Δz), devir, ilerleme ve takım çapı bilgilerinin tanımlanması gerekmektedir. Takım yolu oluşturma stratejisi, free form yüzeylerin işlenmesi için CAM programlarında genel olarak kaba ve finish operasyonlar olmak üzere sınıflandırılır (Durgun, 2017).

Bu çalışmada, Catia V5 R21 programının “Surface Machining” modülünde “ZLevel” komutu kullanılarak takım yolu oluşturulmuştur (Şekil 2.1). Takım yolu olarak işlenecek cebin sınır çizgilerini takip eden konur dolanma komutu kullanılmıştır. Bu döngüde takım, parça şeklinin x-y düzlemindeki sınır çizgilerini dolaştıktan sonra dikey (-z) yönde tanımlanan adım miktarı kadar (Δz) aşağıya inmekte ve tekrar sınır çizgilerini dolaşmaktadır. Bu işlem, deney numunesinin tam şeklini alana kadar devam etmektedir.



Şekil 2.1 Deney Numunesinin Catia V5R 21 Programında Oluşturulan Takım Yolu Simülasyonu

Deneyler, 3 eksenli Fanuc VMC-850B kontrol paneline sahip, maksimum iş mili devri 8000, iş mili motoru 7.5 Kw olan CNC dik işleme merkezinde yapılmıştır. CNC dik işleme merkezi görseli Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Artımlı şekillendirme işleminde, sertliği yaklaşık 58 HRC olan sertleştirilmiş takım çeliğinden yapılmış Ø6 ve Ø10 mm şekillendirme uçları kullanılmıştır (Şekil 2.3).

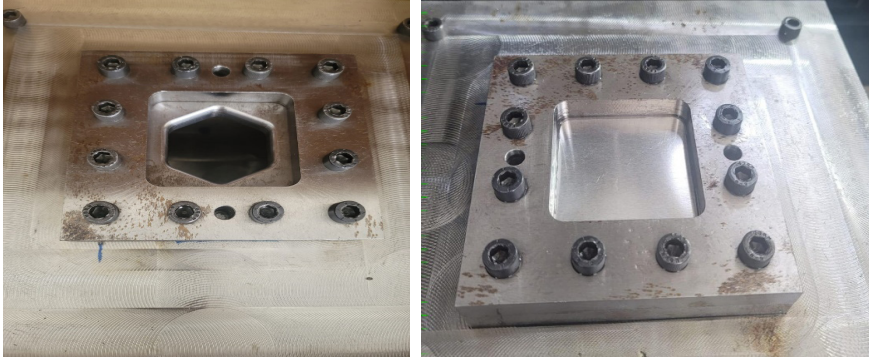


Şekil 2.2 Artımlı Şekillendirme Operasyonunda Kullanılan CNC Dik İşleme Merkezi



Şekil 2.3 Deneylerde Kullanılan Şekillendirme Uçları

Kullanılan şekillendirme kalıbı altıgen forma sahiptir. Kesilen deney numuneleri kalıp ve baskı plakası arasına yerleştirilmiş ve cıvatarlarla sabitlenmiştir (Şekil 2.4). Deney tasarımı için kullanılacak sac levhaları SPIF yöntemiyle şekillendirilmiştir (Şekil 2.5).



Şekil 2.4 Kullanılan Kalıp ve Sac Levhanın Kalıba Sabitlenmesi



Şekil 2.5 Deneylere Ait Şekillendirilen Sac Levhalar

Bir iş parçasının yüzey kalitesi, herhangi bir üretim sürecinde kalitenin önemli bir yönüdür. Şekillendirme işlemi sırasında yüzey kalitesini etkileyen birçok faktör vardır (Palanikumar, 2007). Yüzey pürüzlülüğü, yüzeyde oluşan girintiler ve çıkıntılar olarak da tanımlanır ve parçaların görünümünü ve dokusunu etkileyen önemli bir parametredir. Yüzey dokuları ayrıca parçaların ömrünü de etkiler. Düşük yüzey pürüzlülüğü tercih edilir.

Proses parametreleri olarak altı farklı değişken ve iki seviye olarak belirlenmiştir. Proses parametreleri Tablo 2.3’ de verilmiştir. Bu parametrelere göre şekillendirilen deney numunelerinin yüzey pürüzlülük değerleri Şekil 2.6’ da gösterilen TR-200 (3200) yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Ölçümler, yüzeylerin üç farklı noktasından yapılmış ve ölçülen pürüzlülük değerlerinin ortalaması alınmıştır.

Tablo 2.3 Proses Parametreleri

Proses Parametreleri	Devir Sayısı (dev/dak.)	İlerleme (mm/dak.)	Takım Çapı (mm)	Duvar Açısı (°)	Yağ	Adım miktarı (mm)
Seviye 1	1000	500	6	50	Ayçiçek	0,25
Seviye 2	1500	1000	10	55	Makine	0,50



Şekil 2.6 TR-200 (3200) Deney Numunesinin Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Cihazı ile Ölçüm Anı

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Altıgen profilli kalıp kullanılarak yapılan SPIF deneylerinde, 1.2 mm kalınlığındaki Al 1050-H14 sac levhalarda farklı deney parametrelerinde meydana gelen yüzey pürüzlülüklerinin değişimini görmek için L16 ortogonal deney tasarımı seçilmiştir. Proses parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini görmek için Taguchi yöntemi ile analizi yapılmıştır. Ayrıca parametrelerin sonuca olan katkılarını görebilmek için varyans

analizi yapılmıştır. Deney tasarımı ve ölçülen yüzey pürüzlülükleri Tablo 3.1’de verilmiştir.

Çalışmada, Dr. Genichi Taguchi tarafından geliştirilen Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Sonuçları analiz edebilmek için sinyal/gürültü (S/N) oranı olarak bilinen istatistiksel performans ölçüsü kullanılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar S/N oranına çevrilerek değerlendirme yapılmıştır. S/N oranındaki S sinyal faktörünü, N ise gürültü faktörünü ifade etmektedir. Sinyal faktörü deneylerden alınan gerçek değeri, gürültü faktörü ise deney tasarımına katılamayan fakat deney sonucuna etki eden faktörleri ifade etmektedir. Gürültü kaynakları, elde edilmek istenen performans karakteristiklerinin hedef değerden sapmasına sebep olan tüm değişkenlerdir. S/N oranı, üç temel performans karakteristiğine göre saptanmaktadır. Deney numunelerinin Ra yüzey pürüzlülük faktörünün en düşük seviyede istenmesinden dolayı S/N oranı için “daha küçük-daha iyisi” performans karakteristiği seçilmiştir. S/N oranlarının hesaplanmasında Denklem (1) kullanılmıştır (Koyunbakan vd., 2021).

Tablo 3.1 Deney Tasarımı ve Yüzey Pürüzlülük Değerleri

De- ney No	Devir sayısı (dev/ dak.)	İlerleme (mm/ dak.)	Du- var açısı (°)	Yağ	Takım çapı (mm)	Adım mik- tarı (mm)	Yüzey pürüzlü- lüğü (Ra) (μ m)
1	1000	500	50	Makine	6	0.25	0.984
2	1000	500	50	Ayçiçek	6	0.5	2.135
3	1000	500	55	Makine	10	0.25	0.773
4	1000	500	55	Ayçiçek	10	0.5	1.164
5	1000	1000	50	Makine	10	0.5	1.653
6	1000	1000	50	Ayçiçek	10	0.25	1.973
7	1000	1000	55	Makine	6	0.5	1.318
8	1000	1000	55	Ayçiçek	6	0.25	1.543

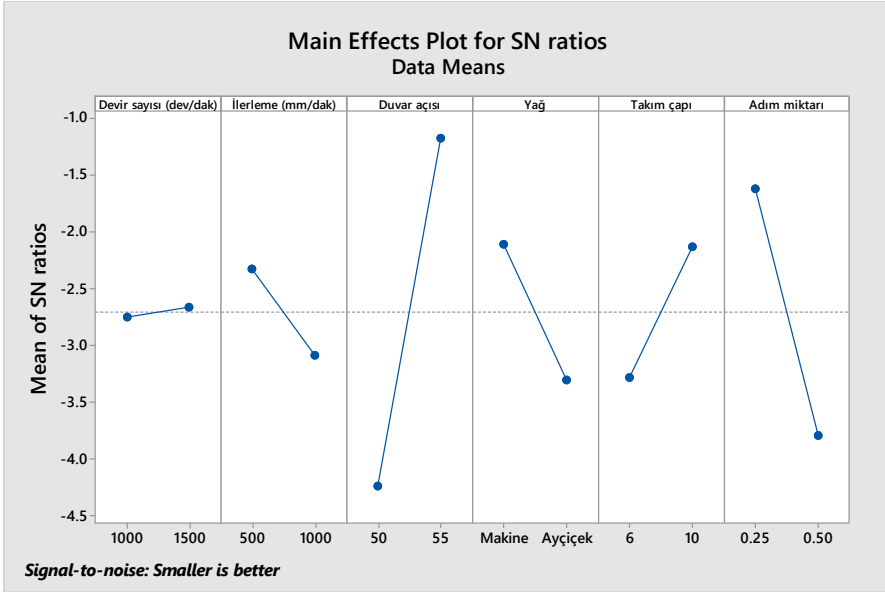
9	1500	500	50	Makine	10	0.5	1.948
10	1500	500	50	Ayçiçek	10	0.25	1.333
11	1500	500	55	Makine	6	0.5	1.609
12	1500	500	55	Ayçiçek	6	0.25	1.076
13	1500	1000	50	Makine	6	0.25	1.298
14	1500	1000	50	Ayçiçek	6	0.5	2.132
15	1500	1000	55	Makine	10	0.25	1.033
16	1500	1000	55	Ayçiçek	10	0.5	0.902

$$S/N_{SB} = \eta = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (1)$$

Minitab 17 programı kullanılarak Taguchi yöntemine göre yapılan analizlerde Tablo 3.2’de görülen S/N oranları için cevap tablosu ve Şekil 3.1’de verilen S/N oranları için ana etki grafiği elde edilmiştir.

Tablo 3.2 S/N Oranları İçin Cevap Tablosu

Level	Devir sayısı (dev/dak.)	İlerleme (mm/dak.)	Duvar açısı (°)	Yağ	Takım çapı (mm)	Adım mik- tarı (mm)
1	-2,747	-2,325	-4,232	-2,109	-3,280	-1,623
2	-2,662	-3,085	-1,177	-3,301	-2,130	-3,786
Delta	0,085	0,760	3,055	1,192	1,150	2,163
Rank	6	5	1	3	4	2



Şekil 3.1 S/N Oranları İçin Ana Etki Grafiği

S/N oranları için cevap tablosu incelendiğinde yüzey pürüzlülüğü için en etkin parametrenin duvar açısı olduğu görülmektedir. İkinci etkili parametre ise adım miktarıdır. En düşük yüzey pürüzlülüğü değeri 3. deneyde 0.773 μm olarak elde edilmiştir. Bu deneyde, 1000 dev/dak. devir sayısı, 500 mm/dak. ilerleme, 55° duvar açısı, makine yağı, 10 mm takım çapı ve 0.25 mm adım miktarı kullanılmıştır. Duvar açısı ve adım miktarının yüzey pürüzlülüğünde en büyük etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca form takımı çapı arttıkça, takımın yüzeyle temas alanı artar, bu da yüzeye daha yakın izlerin oluşmasına ve dolayısıyla daha iyi bir yüzey oluşmasına katkıda bulunur. Başka bir deyişle, küçük çaplı form takımları yüzeyde derin izler bırakır ve yüzey pürüzlülüğünü artırır. Şen vd. (2020) ve Taşdemir (2021) çalışmalarında, takım çapının artmasıyla birlikte yüzey kalitesinin de arttığını belirtmişlerdir. Bu çalışmada elde edilen verilerin literatürle uyumlu olduğu görülmektedir.

S/N oranları için ana etki grafiği incelendiğinde her bir parametre için etkin olan seviyeler görülmektedir. Yüzey pürüzlülüğü için en etkin parametre olan duvar açısının ikinci seviyesi olan 55° yüzey kalitesi için uygun parametre olmuştur.

Yüzey pürüzlülüğü sonuçları için ayrıca varyans analizi yapılmış ve proses parametrelerinin sonuçlara olan katkıları tespit edilmiştir. Tablo 3.3'te S/N oranı için varyans analizi tablosu görülmektedir. S/N oranlarının her bir parametre için büyük olduğu değerler optimal faktör kombinasyonunu

vermektedir (Valarmathi vd., 2013). Herhangi bir faktörün yüzde dağılımı, o faktörün karelerinin toplamının tüm faktörlerin karelerinin toplamına oranı ile elde edilir (Tanyıldızı & Coşkun 2013). Buna göre Tablo 3.3' teki veriler incelendiğinde yüzey pürüzlülüğü açısından en fazla katkıyı sırasıyla %34,55 ile duvar açısı ve %17,31 ile adım miktarı yapmıştır. Devir sayısı parametresinin sonuçlar üzerinde önemli bir katkı sağlamadığı görülmüştür.

Tablo 3.3 Varyans Analizi Tablosu

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	Contr (%)
Devir sayısı	1	0,002	0,002	0,002	0,02	0,1
İlerleme	1	0,043	0,043	0,043	0,35	1,46
Duvar açısı	1	1,019	1,019	1,019	8,33	34,55
Yağ	1	0,169	0,169	0,169	1,38	5,72
Takım çapı	1	0,108	0,108	0,108	0,89	3,67
Adım miktarı	1	0,507	0,507	0,507	4,15	17,31
Ölçüm hatası	9	1,100	1,100	1,100		
Toplam	15	2,949				

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, SPIF yöntemi kullanılarak şekillendirilen Al 1050-H14 alüminyum sac parçalarının yüzey pürüzlülüğü incelenmiştir. Deneylerde kullanılan altı farklı proses parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi detaylı olarak araştırılmış ve elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Duvar açısının yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli bir etkisi olduğu belirlenmiştir. Daha büyük duvar açısı (55°), daha düşük pürüzlülük değerleri elde edilmesine katkı sağlamıştır. Varyans analizi sonuçlarına göre duvar açısının etkisi istatistiksel olarak anlamlıdır.
- Küçük adım miktarının (0.25 mm), büyük adım miktarına (0.5 mm) göre daha düşük pürüzlülük değerleri sağladığı belirlenmiştir.
- Analiz sonuçları incelendiğinde şekillendirme sırasında büyük takım çapı (10 mm) kullanılarak daha düşük yüzey pürüzlülüğü elde edildiği görülmüştür.

Yapılan bu çalışma için değişkenler açısından düşük yüzey pürüzlülüğü sonuçlarına ulaşmak için düşük ilerleme hızı (500 mm/dak.), büyük duvar açısı (55°), makine yağı kullanımı, büyük takım çapı (10 mm) ve küçük adım miktarı (0.25 mm) parametrelerinin optimum parametreler olduğu görülmüştür.

KAYNAKÇA

- Asghari, S. A. A., Shamsi Sarband, A., & Habibnia, M. (2017). Optimization of multiple quality characteristics in two-point incremental forming of aluminum 1050 by grey relational analysis. *Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part c: Journal of Mechanical Engineering Science*, 0954406217693658.
- Attanasio, A., Ceretti, E., Giardini, C., & Mazzoni, L. (2008). Asymmetric two points incremental forming: improving surface quality and geometric accuracy by tool path optimization. *Journal of materials processing technology*, 197(1-3), 59-67.
- Azpen, Q., Baharudin, H., Sulaiman, S., & Mustapha, F. (2018). Effect of process parameters on the surface roughness of aluminum alloy AA 6061-T6 sheets in frictional stir incremental forming. *Advances in Production Engineering & Management*, 13(4).
- Banerjee, G., Gupta, A. K., Mandaloi, G., Nagargoje, A. R., & Tandon, P. (2024). Investigation of Machining Process Parameters for Deformation Machining of AA6061 Monolithic Parts to Improve the Process Outputs. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1-17.
- Choudhary, S., & Mulay, A. (2024). Influence of tool size and step depth on the formability behavior of AA1050, AA6061-T6, and AA7075-T6 by single-point incremental forming process. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 33(7), 3283-3298.
- Dabwan, A., Ragab, A. E., Saleh, M. A., Anwar, S., Ghaleb, A. M., & Rehman, A. U. (2020). Study of the Effect of Process Parameters on Surface Profile Accuracy in Single-Point Incremental Sheet Forming of AA1050-H14 Aluminum Alloy. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020(1), 7265941.
- Duflou, J., Tunçkol, Y., Szekeres, A., & Vanherck, P. (2007). Experimental study on force measurements for single point incremental forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 189(1-3), 65-72.
- Durante, M., Formisano, A., Langella, A., & Minutolo, F. M. C. (2009). The influence of tool rotation on an incremental forming process. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(9), 4621-4626.
- Durgun, İ. (2017, September). Artımsal Şekillendirme Yöntemi İle Alüminyum Parçaların Şekillendirilmesi. In *5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science*.
- Echraf, S. B., & Hrairi, M. (2014). Significant parameters for the surface roughness in incremental forming process. *Materials and manufacturing processes*, 29(6), 697-703.
- Filice, L., Fratini, L., & Micari, F. (2002). Analysis of material formability in incremental forming. *CIRP Annals*, 51(1), 199-202.

- Formisano, A., Boccarusso, L., & Durante, M. (2023). Optimization of single-point incremental forming of polymer sheets through FEM. *Materials*, 16(1), 451.
- Ghazi, S. K., Bedana, A. S., & Salloomb, M. Y. (2023). Investigating the Impact of Process Parameters on Thinning and Formability in Aluminum Alloy AA 1050 Incremental Sheet Metal Forming. *Engineering and Technology Journal*, 41(12), 1653-1659.
- Gulati, V., Aryal, A., Katyal, P., & Goswami, A. (2016). Process parameters optimization in single point incremental forming. *Journal of the Institution of Engineers (india): Series C*, 97, 185-193.
- Ham, M., & Jeswiet, J. (2006). Single point incremental forming and the forming criteria for AA3003. *CIRP annals*, 55(1), 241-244.
- Koyunbakan, M., Ünüvar, A., Eskizeybek, V., & Avcı, A. (2021). CETP kompozitlerin ağaç matkabilıyla delinme performanslarının deneysel incelenmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(2), 770-776.
- Kumar, A., Singh, V., Nayak, S., Kumar, A., Tyagi, A., & Sharma, A. (2022). Impact of process variables on surface roughness in negative incremental forming process. *Materials Today: Proceedings*, 50, 930-934.
- Martins, P. A. F., Bay, N., Skjødt, M., & Silva, M. B. (2008). Theory of single point incremental forming. *CIRP annals*, 57(1), 247-252.
- Mostafanezhad, H., Menghari, H. G., Esmacili, S., & Shirkharkolaee, E. M. (2018). Optimization of two-point incremental forming process of AA1050 through response surface methodology. *Measurement*, 127, 21-28.
- Mumcu, H. (2009). Experimental investigation of maximum forming angle and wall thickness variation on Al-1050 sheet metal in negative incremental forming. *Technological Applied Sciences*, 4(2), 182-191.
- Palanikumar, K. (2007). Modeling and analysis for surface roughness in machining glass fibre reinforced plastics using response surface methodology. *Materials & design*, 28(10), 2611-2618.
- Seçgin, Ö., Ata, E., & Özsert, İ. (2018). İmalat Endüstrisinde Kullanılan Artımlı Şekillendirme Yönteminin Sonlu Elemanlar Analizinde Takımyolu Tanımlama İçin Yeni Bir Yaklaşım. In *International Conference on Automotive Technologies (OTEKON 2018)*, Bursa (pp. 1219-1225).
- Shrivastava, P., & Tandon, P. (2024). Investigation of macro-and grain-scale residual stresses with an emphasis on spring-back behavior in preheated incrementally formed AA 1050 H14 components. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 33(15), 7518-7527.
- Şen, N., Taşdemir, V., & Seçgin, Ö. (2020). Investigation of formability of HC-380LA material via the TPIF-RL incremental forming method. *Ironmaking & Steelmaking*, 47(10), 1199-1205.

- Tanyıldızı, H., & Coşkun, A. (2013). Varyans analizi (ANOVA) yöntemi ile silis dumanı katkılı hafif betonun mekanik özelliklerine deney parametrelerinin etkilerinin belirlenmesi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 29(3), 227-233.
- Taşdemir, V. (2021). Optimization of Incremental Forming of Low-Alloy High-Yield-Strength HC300LA Sheet Using a Rolling Blank Holder Method. *Steel research international*, 92(2), 2000512.
- Tisza, M. (2012). General overview of sheet incremental forming. *Journal of achievements in materials and Manufacturing Engineering*, 55(1), 113-120.
- Valarmathi, T. N., Palanikumar, K., & Latha, B. (2013). Measurement and analysis of thrust force in drilling of particle board (PB) composite panels. *Measurement*, 46(3), 1220-1230.
- Yamashita, M., Gotoh, M., & Atsumi, S. Y. (2008). Numerical simulation of incremental forming of sheet metal. *Journal of materials processing technology*, 199(1-3), 163-172.
- Xiaoqiang, L. I., Kai, H. A. N., Xu, S. O. N. G., Haibo, W. A. N. G., Dongsheng, L. I., Yanle, L. I., & Qing, L. I. (2020). Experimental and numerical investigation on surface quality for two-point incremental sheet forming with interpolator. *Chinese Journal of Aeronautics*, 33(10), 2794-2806.

