

MÜHENDİS VE MAKİNA

ENGINEER AND MACHINERY

ISSN 1300-3402 E-ISSN 2667-7520



tmmob makina mühendisleri odası yayın organı

www.mmo.org.tr/muhendismakina

EKLEMELİ İMALATLA ÜRETİLEN İŞLEVSEL OLARAK DERECELENDİRİLMİŞ
METAL YAPILAR

ÇATI TİPİ PAKET KLİMA CİHAZI İÇİN KONDENSER TARAFINDA
EVAPORATİF SOĞUTMA UYGULAMASI

ÇİFT AĞLI HİDROJELLERİN BASMA YÜKÜ ALTINDA GERİLME GEVŞEMESİ
DAVRANIŞI

TIG KAYNAĞI YAPILAN ALÜMİNYUM BİR SAC PARÇANIN ÇARPILMA
MİKTARININ İNCELENMESİ

GÜNEŞ ENERJİSİ DEPOLAMA MALZEMELERİNİN BUGÜNÜ, YARINI VE
GELECEĞİ

YENİLİKÇİ ÜRÜN TASARIMINDA FONKSİYON ANALİZİ VE BUDAMA
YÖNTEMİ

SOĞUK PÜSKÜRTME TEKNOLOJİSİ VE UYGULAMALARI

BİR GAZ TÜRBİN MOTORU KOMPRESÖR PALESİNİN İTİ6AL4V
ALAŞIMINDAN EKLEMELİ ÜRETİM YÖNTEMİ İLE İMALATI VE BOYUTSAL
DOĞRULAMASI



tmmob makina mühendisleri odası
uctea chamber of mechanical engineers

www.mmo.org.tr/muhendismakina

Mühendis ve Makina

Engineer and Machinery

Cilt 62

Volume 62

Sayı 702

Number 702

Ocak-Mart 2021

January-March 2021

TMMOB MAKİNA MÜHENDİSLERİ ODASI

Yerel Süreli Yayın, Üç Ayda Bir Yayımlanır
Local Periodical - Quarterly

Ocak-Mart /January-March 2021

Cilt / Vol: 62 Sayı / No: 702

Yönetim Yeri / Head Office

Meşrutiyet Cad. No: 19/6 Kızılay - ANKARA
Tel: (+90 312) 425 21 41 Fax: (+90 312) 417 86 21
E-posta: yayin@mmo.org.tr www.mmo.org.tr

MMO Adına Sahibi

Publisher
Yunus YENER

Sorumlu Yazı İşleri Müdürü

Executive Editor
Yunus YENER

Yayın Sekreteri

Editorial Secretary
Ceren YILMAZ ARAS

Editör / Editorial in Chief

Prof. Dr. Harun Kemal ÖZTÜRK

Editör Yardımcıları / Associate Editors

Prof. Dr. L. Berrin ERBAY - *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi / Eskişehir Osmangazi University*
Prof. Dr. Müfit GÜLGEÇ - *Çankaya Üniversitesi / Çankaya University*

Yayın Danışma Kurulu / Editorial Advisory Board

Prof. Dr. C. Erdem İMRAK - *İstanbul Teknik Üniversitesi / Istanbul Technical University, İstanbul*
Prof. Dr. Erdiñ KALUÇ - *Kocaeli Üniversitesi / Kocaeli University, İzmit*
Prof. Dr. Ali GÜNGÖR - *Ege Üniversitesi / Ege University, İzmir*
Prof. Dr. Hikmet RENDE - *Akdeniz Üniversitesi / Akdeniz University, Antalya*
Prof. Dr. Ali PINARBAŞI - *Yıldız Teknik Üniversitesi / Yıldız Technical University, Antalya*
Prof. Dr. Sedat BAYSEÇ - *Gaziantep Üniversitesi / Gaziantep University, Gaziantep*
Prof. Dr. E. İlhan KONUKSEVEN - *Orta Doğu Teknik Üniversitesi / Middle East Technical University, Ankara*
Prof. Dr. Erol KILIÇKAP - *Dicle Üniversitesi / Dicle University, Diyarbakır*
Prof. Dr. Mustafa YURDAKUL - *Gazi Üniversitesi / Gazi University, Ankara*
Prof. Dr. Atilla BIYIKOĞLU - *Gazi Üniversitesi / Gazi University, Ankara*
Prof. Dr. Mirosław BONEK - *Silesian University of Technology, Poland*
Prof. Dr. Burhan ÇUHADAROĞLU - *Karadeniz Teknik Üniversitesi / Karadeniz Technical University, Trabzon*
Prof. Dr. Leszek A. DOBRZANSKI - *Silesian University of Technology, Poland*
Prof. Dr. Ö. Altan DOMBAYCI - *Pamukkale Üniversitesi / Pamukkale University, Denizli*
Prof. Dr. Halim GÜRGENCI - *Queensland Üniversitesi / The University of Queensland, Australia*
Prof. Dr. Hyung-Man Kim - *Power System and Sustainable Energy Laboratory (PSSEL), South Korea*
Prof. Dr. Basim AL-NAJJAR - *Linnaeus University, Sweden*
Prof. Dr. Barış ÖZERDEM - *İzmir Ekonomi Üniversitesi / Izmir University of Economics, İzmir*
Doç. Dr. Tunç APATAY - *Gazi Üniversitesi / Gazi University, Ankara*
Doç. Dr. Melih Cemal KUŞHAN - *ESOGÜ / Eskişehir Osmangazi University, Eskişehir*
Doç. Dr. Yiğit TAŞCIOĞLU - *TED Üniversitesi / TED University, Ankara*
Dr. Öğr. Üye. Nurdan BİLGİN - *Ondokuz Mayıs Üniversitesi / Ondokuz Mayıs University, Samsun*
Dr. Öğr. Üye. Kutluk Bilge ARIKAN - *TED Üniversitesi / TED University, Ankara*
Dr. Varlık ÖZERCİYES - *AIRBUS, UK*

Yayın Kurulu / Editorial Board

- Prof. Dr. Metin AKKÖK - *Orta Doğu Teknik Üniversitesi / Middle East Technical University, Ankara*
Prof. Dr. Müfit GÜLGEÇ - *Çankaya Üniversitesi / Cankaya University, Ankara*
Prof. Dr. L. Berrin ERBAY - *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi / Eskişehir Osmangazi University, Eskişehir*
Prof. Dr. Cemal MERAN - *Pamukkale Üniversitesi / Pamukkale University, Denizli*
Prof. Dr. Harun Kemal ÖZTÜRK - *Pamukkale Üniversitesi / Pamukkale University, Denizli*
Prof. Dr. Semiha ÖZTUNA - *Trakya Üniversitesi / Trakya University, Edirne*
Dr. Öğr. Üye. Gurbet ÖRÇEN - *Dicle Üniversitesi / Dicle University, Diyarbakır*

Kapak ve Sayfa Tasarımı

Cover and Page Design
Muazzez POLAT

Teknik Sorumlu

Technical Manager
Mehmet AYDIN

Baskı

Printed by

Ankamat Matbaacılık Sanayi Ltd. Şti.
30. Cadde 538. Sokak No: 60 İvedik Organize Sanayi - Ankara
Tel: (+90 312) 394 54 94
Basım Tarihi: 15 Aralık 2020
Baskı Sayısı: 1.000

Mühendis ve Makina

Engineer and Machinery

Cilt 62
Volume 62

Sayı 702
Number 702

Ocak-Mart 2021
January-March 2021

İÇİNDEKİLER/CONTENTS

Derleme/Review

Eklemleri İmalatla Üretilen İşlevsel Olarak Derecelendirilmiş Metal Yapılar 1
Metal Additive Manufactured Functionally Graded Structures
Orhan GÜLCAN, Uğur ŞİMŞEK, Barış KAVAS

Araştırma/Research

Çatı Tipi Paket Klima Cihazı için Kondenser Tarafında Evaporatif Soğutma Uygulaması 23

Investigation of "Evaporative Pad" Application on the Condenser
Nisa ÖZÇAKIR, Hüseyin GÜNERHAN

Çift Ağlı Hidrojellerin Basma Yükü Altında Gerilme Gevşemesi Davranışı 45
Stress Relaxation Behavior of Double Network Hydrogels under Compressive Loading
Necmi DÜŞÜNCELİ

TIG Kaynağı Yapılan Alüminyum Bir Sac Parçanın Çarpılma Miktarının İncelenmesi 55
Investigation of the Impact Amount of an Aluminum Sheet With TIG Welding
Tugay KARAGÖZ

Derleme/Review

Güneş Enerjisi Depolama Malzemelerinin Bugünü, Yarını ve Geleceği 70
Today, Tomorrow, and the Future of Energy Storage Materials for Solar Energy
Dawar ALİ , Mehmet Fatih KAYA, Levent ŞENDOĞDULAR

Araştırma/Research

Yenilikçi Ürün Tasarımında Fonksiyon Analizi ve Budama Yöntemi 91
Function Analysis and Trimming Method in Innovative Product Design
Ali KILIÇ, Orhan ERSÜRMEİ, Bahattin DABANIYASTI, Sadettin KAPUCU

Derleme/Review

Soğuk Püskürtme Teknolojisi ve Uygulamaları 106
Cold Spray Technology and its Applications
Elif TEKİN, Serden UYUM, Buğra KARAHAN, Kadir Cihan TEKİN, Uğur MALAYOĞLU

Araştırma/Research

Bir Gaz Türbin Motoru Kompresör Palesinin Ti6Al4V Alaşımından Eklemleri Üretim Yöntemi ile İmalatı ve Boyutsal Doğrulaması 151
Manufacture and Dimensional Verification of a Gas Turbine Engine Compressor Blade Produced via Additive Manufacturing Method using Ti6Al4V
Tamer SARAÇYAKUPOĞLU

TMMOB Makina Mühendisleri Odası Yayın Organı olan Mühendis ve Makina dergisi TMMOB Makina Mühendisleri Odası üyelerine ücretsiz olarak gönderilir. 1957 yılından beri yayımlanan dergimiz, **hakemli** bir dergidir. Dergimizle ilgili detaylı bilgi almak için www.mmo.org.tr genel ağ adresinden yararlanabilirsiniz. Telefon, faks veya e-posta aracılığıyla da bize ulaşabilirsiniz.

Dergimizin yer aldığı veritabanları



SUNUŞ

Değerli Meslektaşlarımız Merhaba,

*Mühendis ve Makina dergimizin bu sayısındaki ilk makale **Orhan Gülcan, Uğur Şimşek,** ve **Barış Kavas**'ın "Eklemeli İmalatla Üretilen İşlevsel Olarak Derecelendirilmiş Metal Yapılar" başlıklı makalesidir. İşlevsel olarak derecelendirilmiş yapılar (İDY), konvansiyonel malzeme işleme yöntemleri ile elde edilemeyen, aynı parça içerisinde birden çok fiziksel özelliğin elde edilebilmesi için mikroyapı, gözeneklilik veya kimyasal kompozisyonun, malzemenin hacmi boyunca kademeli olarak değiştiği bir malzeme çeşididir. Metal İDY, farklı konvansiyonel üretim yöntemleri ile üretilebilmektedir fakat Eklemeli İmalat (Eİ) konusunda son zamanlarda elde edilen gelişmeler, karmaşık şekillerin üretilebilme ihtimali, düşük prototipleme maliyetleri, asgari kalıp üretimi, yüksek hassasiyet ve işlemin yüksek tekrar edilebilme özelliklerinden dolayı, farklı türlerde İDY'lerin üretilebilmesine olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada, Eİ ile üretilen metal İDY'ler konusunda son yıllarda elde edilen gelişmelere odaklanılmıştır. Eİ ile üretilen metal İDY'lerin detaylı literatür taraması ve farklı endüstrilerde kullanımı bu çalışmada anlatılacaktır.*

*İkinci makalemiz **Nisa Özçakar,** ve **Hüseyin Günerhan**'ın "Çatı Tipi Paket Klima Cihazı için Kondenser Tarafında Evaporatif Soğutma Uygulaması" adlı çalışmasıdır. Bu çalışmada klasik çatı tipi klimalar ile kondenser tarafı evaporatif soğutmalı çatı tipi klimaların performansları ve enerji verimlilikleri karşılaştırılmıştır. Evaporatif soğutma yüksek verimli direkt buharlaşmalı soğutma pedi ile sağlanmıştır. Enerji verimliliğini arttırmak hedeflenmiştir. Çalışma, 50 kW'lık soğutma kapasiteli bir klima cihazının EUROVENT ve tropik bölgede çalışması durumunda pedli ve pedsiz olması göz önüne alınıp karşılaştırılarak gerçekleştirilmiştir. Ped kullanılması durumunda, kondensere gelen soğutma havasının sıcaklığı düşmüş, kompresör küçülmüş ve aynı soğutma kapasitesi elde edilmiştir. COP, EER değerlerinde yaklaşık %30 artış sağlanmıştır. Tropik bölge için seçilen cihazda ise COP, EER değerindeki artış çok daha büyük orandadır (%50). Çalışma sonucunda ped kullanılması ile kompresör, kondenserlerde küçülme ve enerji verimli çatı tipi klima cihazlarının yapılabileceği ortaya konmuştur.*

*Üçüncü makalemiz, **Necmi Düşünceli**'nin "Çift Ağılı Hidrojellerin Basma Yükü Altında Gerilme Gevşemesi Davranışı" adlı çalışmasıdır. Akrilamid (AAM) zayıf mekanik özellikleri dolayı, biyodoku iskeleleri ve yumuşak doku aktüatörleri gibi biyomedikal uygulamalarda istenilen özellikleri sergileyememektedir. Bu nedenle Aljinat (ALG) kullanılarak çift ağa sahip hidrojel şeklinde kullanılmaktadır. Bu çalışmada AAM-ALG hidrojelindeki kovalent çapraz bağlayıcı (BIS) ve iyonik çapraz bağlayıcı (CaCl₂) miktarının mekanik özellikler etkisini araştırmak üzere beş farklı hidrojel üretilmiştir. Silindirik basma numuneleri %20 gerinim seviyesine kadar yüklenmiş, daha sonra 300 saniye süre ile gevşeme testi yapılmıştır. Sonuçlar iyonik çarpaz bağlayıcı miktarının mekanik özelliklere etkisinin çok güçlü olduğunu göstermiştir. Kovalent çapraz bağlayıcı miktarının ise belli bir kritik seviyenin üzerinde etkili olduğu gözlemlenmiştir.*

*Dördüncü makalemiz **Tugay Karagöz**'ün "TIG Kaynağı Yapılan Alüminyum Bir Sac Par-*

çanın Çarpılma Miktarının İncelenmesi” adlı makalesidir. Kaynaklı birleştirmeler sanayi uygulamalarında oldukça fazla uygulama alanlarına sahiptir. Kaynak kullanılarak imal edilen parçalarda birçok farklı kaynak yöntemi kullanılmaktadır ve bu yöntemlerin hepsinde ortak olarak ani bir ısı girdisi olmaktadır. Ani ısı girdisiyle beraber malzeme farklı gerilmelere maruz kalır ve bu gerilmelerin giderilememesi sebebiyle malzemede bir çarpılma(distorsiyon) görülür. Bu çalışmada TIG-Argon kaynak yöntemiyle alın kaynağı yapılan bir alüminyum sac parçada değişen akım girdisi ile çarpılma arasındaki ilişki incelenmiştir. Yapılan uygulamalar sonucunda parçalar üzerindeki çarpılma miktarları tespit edilerek aynı boyutlardaki parçalar için akım miktarına bağlı olarak çarpılma miktarının değişimi incelenmiştir.

Beşinci makalemiz ise **Dawar Ali, Mehmet Fatih Kaya ve Levent Şendoğdular**’ın “Güneş Enerjisi Depolama Malzemelerinin Bugünü, Yarını ve Geleceği” isimli makalesidir. Bu çalışmada, Fosil yakıtların tükenmeye başlaması ve bu yakıtların yan ürünleri olarak ortaya çıkan sera gazı salınımları, bunun yanı sıra artan küresel enerji talebi ve çevresel endişeler; güneş, biyoyakıt, hidrotermal enerji gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının potansiyelinin daha da detaylı araştırılmasına yol açmıştır. Bunlar arasında termal güneş enerjisi sistemleri yenilenebilir enerji sistemleri içerisinde güneş ışığına kolay erişilebilir olması, elde edilen verimlilik değerleri ve etkili bir enerji dönüşümü sağlanması sebebiyle çok yaygın olarak tercih edilen sistemler haline gelmiştir. Şimdiye kadar farklı termal depolama biçimleri, özellikle termokimyasal depolama (TCS), artık ısıl depolama (LHS) ve hissedilir ısı depolaması (SHS) ilgili kapsamlı çalışmalar yapılmıştır. Bunların yanı sıra literatürde de ana enerji depolama sistemleri olarak mekanik enerji depolama sistemlerine de odaklanan çalışmalar bulunmaktadır. Ek olarak, bataryalar gibi elektrokimyasal enerji depolama sistemleri yüksek enerji dönüşüm verimleri sayesinde giderek daha fazla popülerlik kazanmaktadır. Çeşitli güneş depolama yöntemleri için yakın zamanda araştırılan malzemeler; teorik sınırlara henüz ulaşılmadığı için güneş enerjisi depolama malzemeleri konusu araştırmacılar için büyük bir potansiyel göstermektedir. Ancak bu çalışmaların çoğu halen deneysel aşamada olup bu değerlendirme çalışmasında güneş enerjisi depolaması ile ilgili malzeme temelli bu potansiyel çalışmalara bir bakış açısı sunulması sağlanmıştır.

Altıncı makalemiz, **Ali Kılıç, Orhan Ersürmeli, Bahattin Dabanyastı ve Sadettin Kapucu**’nun “Yenilikçi Ürün Tasarımında Fonksiyon Analizi ve Budama Yöntemi” isimli makalesidir. Şirketlerin pazarda rekabet edebilme yetenekleri, yenilikçi ürün geliştirme kapasitelerine bağlıdır. Ancak, şirketlerin nasıl yenilikçi olabileceği konusunda belirsizlikler vardır. Son zamanlarda adından sıklıkla bahsedilen yenilikçi problem çözme yöntemleri, bu sorunun cevabı olabilir. Bu çalışmada, firmaların yenilikçi ürün geliştirebilme yeteneğine katkıda bulunacağı düşünülen fonksiyon analizi ve budama yönteminden bahsedilecektir. Fonksiyon analizi, bir ürünün bileşenlerinin arasındaki etkileşiminin görsel olarak ifade edilmesi ilkesine dayanır. Bu gösterimde nesnelere arasındaki işlev ve etkiler açıkça ortaya konur. Budama yöntemi ise fonksiyon modelindeki işlevsel olmayan bir unsurun kaldırılması, değiştirilmesi ya da orijinal sisteminin varyasyonlarının oluşturulması işlemidir. Böylelikle sistemin ya da ürünün ideal nihai sonuca erişmesi için sistemdeki ya da diğer kaynakların kullanılmasını içerir. Bu analiz ve yöntemin uygulanmasıyla mevcut bir ürününe

alternatif yenilikçi ürünler elde edilebileceği gibi, mevcut ürün bir patent ile korunuyorsa da söz konusu patentin kapsamını aşmak da mümkün olmaktadır. Bu çalışmada, gerçek bir endüstriyel ürün üzerinde fonksiyon analizi ve kırpma yapılarak inovatif bir ürün elde etme yöntemlerinin uygulanabilirliği gösterilmiştir.

Yedinci makalemiz, **Elif Tekin, Serden Uyum, Buğra Karahan, Kadir Cihan Tekin ve Uğur Malayoğlu**'nun "Soğuk Püskürtme Teknolojisi ve Uygulamaları" isimli makalesidir. Soğuk püskürtme, katı tozların yakınsak/ıraksak türde bir nozul vasıtasıyla althğa doğru hızlandırıldığı bir katı hal biriktirme işlemidir. Kaplama birikimi püskürtülen parçacıkları ergitmeden gerçekleştirir. Püskürtülen parçacıklar yüksek kinetik enerjiye sahip olduğu için çarpma esnasında althğa yapışır. Başarılı bir yapışma sağlamak için toz parçacıkların, kendi malzeme özelliklerine bağlı olan kritik hız değerini çarpma esnasında aşması gereklidir. Metaller, seramikler, kompozitler ve polimerler gibi farklı malzemeler soğuk püskürtme kullanılarak biriktirilebilir. Soğuk püskürtme, yüzey kaplaması elde etmek için yeni ve gelecek vaat eden bir teknolojidir ve biriktirme için termal enerji yerine kinetik enerji kullandığından termal püskürtmeye göre çeşitli teknolojik avantajlar sunar. Sonuç olarak, kalıntı gerilmeler, oksidasyon ve istenmeyen kimyasal reaksiyonlar önlenir. Soğuk püskürtme teknolojisi endüstride birçok uygulama alanına sahiptir. Birçok endüstride kullanılan bileşenlerin korunması ve onarımı amacıyla geliştirilmiştir. Son yıllarda soğuk püskürtme işlemi elektronik sistemlerin tamiri, eklemeli imalat, kaynak, sert lehimleme, yüzey koruma, tıbbi cihazlar ve tıbbi malzemeler gibi uygulama alanlarında kullanılmaktadır. Bu çalışma, soğuk püskürtme işleminin tarihsel gelişimini, temel ilkelerini ve özelliklerini, yapışma mekanizmasını ve endüstriyel uygulama alanlarını kısaca gözden geçirerek soğuk püskürtme işlemini özetlemektedir.

Sekizinci ve son makalemiz ise **Tamer Saraçyakupoğlu**'nun "Bir Gaz Türbin Motoru Kompresör Palesininti6al4v Alaşımından Eklemeli Üretim Yöntemi ile İmalatı ve Boyutsal Doğrulaması" isimli makalesidir. Bu çalışmada, bir gaz türbin motoruna ait kompresör palesinin, Ti6Al4V alaşımından Eklemeli Üretim (EÜ) yöntemiyle üretimi ve boyutsal doğrulama ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Havacılık endüstrisinde yaygın kullanılan Direkt Metal Lazer Sinterleme (DMLS) yöntemi seçilmiştir. İmalattan sonra her bir palede 87 adet olmak üzere toplam 174 yüzey ölçümü gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde, katı modele oranla, 1 Nu'lu palede ortalama +0,0944/-0,0809 mm arasında, 2 Nu'lu palede ortalama +0,1093/-0,0978 mm değişim olduğu belirlenmiştir. Her iki paledeki geometrik değişimin birbiri ile tutarlı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, bir uçar-parçanın uçağa takılmasına yönelik uçuşa elverişlilik çalışmaları konusuna girmeden, bir gaz türbin motoru kompresör palelerinin Ti6Al4V alaşımından EÜ yöntemi ile üretilebileceği ortaya konulmuştur.

Dergimize www.mmo.org.tr/muhendismakina ve <https://dergipark.org.tr> adresinden ulaşabilir; makale ve görüşleriniz ile destek olabilirsiniz.

Bir sonraki sayımızda buluşmak üzere...

**TMMOB Makina Mühendisleri Odası
Yönetim Kurulu**

PRESENTATION

Dear Colleagues,

*The first article published in this Issue is titled “Metal Additive Manufactured Functionally Graded Structures” by **Orhan Gülcan, Uğur Şimşek, Barış Kavas**. Functionally graded structure (FGS) is a type of material where microstructure, porosity or chemical composition is gradually changing across the volume of the material so that multiple physical properties not possible within the same part made by conventional material processing techniques can be achieved. Metal FGSs can be produced with different conventional manufacturing processes but recent advances in Additive Manufacturing (AM) enable the production of different type of FGSs with the possibility of production of complex shapes, low cost for prototyping, minimum tooling, high accuracy, and high repeatability. The present paper focuses on the recent advances in metal AM of FGSs. A detailed review of research on metal AM of FGSs and their usage in different industries will be presented in this paper.*

*The second article is titled “Investigation of “Evaporative Pad” Application on the Condenser Side of Rooftop Type Air Conditioner Devices” by **Nisa Özçakır, Hüseyin Günerhan**. In this study, performance, energy efficiencies of widely used conventional roof type packaged air conditioners and condenser side evaporative cooling roof type packaged air conditioners are compared. Evaporative cooling is provided by high efficient direct evaporative cooling pad. The main purpose of this application is to increase energy efficiency. The study was carried out for 50 kW cooling capacity unit considering working conditions of EUROVENT and tropical region. Pad usage, the same cooling capacity is achieved while the condenser air inlet temperature decreased and the compressor size reduced. COP, EER values increased by approximately 30%. In tropic region, the increment in COP, EER is much larger (50%). As a result, it is revealed that compressors and condensers can be downsized and energy efficient roof type air conditioners can be built by using pads.*

*The third article is titled “Stress Relaxation Behavior of Double Network Hydrogels under Compressive Loading” by **Necmi Düşünceli**. Because of moderate stretchable properties of acrylamide (AAM), it is used as double network hydrogel with alginates (AAL). We prepared AAM-ALG hydrogels containing various amount of crosslinker (BIS) and concentration of calcium chloride (CaCl₂) solution. A series of uniaxial compression loading tests were performed on five different AAM-ALG specimens. The specimens are loaded up to 20% strain and hold at the same strain level for 300 seconds. Concentration of CaCl₂ solution dependency is clear; increasing molarity of CaCl₂ yields an increase in the stress level. On the other hand, effect of amount of BIS is not dominant on mechanical properties.*

*The fourth article is titled “Investigation of the Impact Amount of an Aluminum Sheet With TIG Welding” by **Tugay Karagöz**. Welded joints have a wide range of applications in industrial applications. Many different welding methods are used in parts manufactured using welding and all of these methods have a sudden heat input in common. With the sudden heat input, the material is subjected to different stresses and a distortion is seen in the material as these stresses cannot be removed.*

In this study, the relationship between distorted current input and distortion is investigated in an aluminum sheet part welded by TIG-Argon welding method. As a result of the applications, the amount of distortion on the parts was determined and the variation of the distortion amount was examined for the parts with the same dimensions depending on the current amount.

The fifth article is titled “Today, Tomorrow, and the Future of Energy Storage Materials for Solar Energy” by Dawar Ali, Mehmet Fatih Kaya ve Levent Şendoğdular. In this study, increasing global energy demand and environmental concerns due to the emissions of greenhouse gases as by-products of fossil fuel consumption have led to the exploration of the potential of renewable energy sources such as solar, biofuel, hydrothermal energy etc. Among these, solar thermal energy is becoming a highly desirable source of renewable energy because of the widespread availability of solar radiations and the progress achieved in its efficiency and effectiveness. Different forms of thermal storage especially thermochemical storage (TCS), latent heat storage (LHS), and sensible heat storage (SHS) have been reported so far. Likewise, there are studies in the literature which also focus on the main mechanical energy storage systems. In addition, electrochemical energy storage devices like batteries are increasingly gaining popularity due to their highly efficient energy conversion values. Recently investigated materials for various solar storage forms show great potential as the future storage materials since theoretical limits are not reached yet; however, they are still in the experimental stage and this paper presents glimpse of those potential studies.

The sixth article is titled “Function Analysis and Trimming Method in Innovative Product Design” by Ali Kılıç, Orhan Ersürmeli, Bahattin Dabanyastı and Sadettin Kapucu. The ability of companies to compete in the market depends on their innovative product development capabilities. However, there is uncertainty about how they can be innovative. Innovative problem-solving methods, which are frequently mentioned recently, maybe the answer to this question. In this study, function analysis and trimming will be mentioned which will contribute to the ability of firms to develop innovative products. Functional analysis is the visual representation of the interaction between the components of a product. This representation clearly demonstrates the functions and effects between objects. Trimming method is the process of removing, modifying a non-functional element, or creating variations of the original system in the function model. This includes the use of existing or other resources in the system to achieve the ideal final result of the system or product. By applying the function analysis and trimming, it is possible to obtain alternative innovative products to existing ones, but it is also possible to overcome the said patent even if the present product is protected by a patent. In this study, to show the applicability of methods to obtain a new innovative product by applying the function analysis and trimming on a real industrial product has been applied.

The seventh article is titled “Cold Spray Technology and its Applications” by Elif Tekin, Serden Uyum, Buğra Karahan, Kadir Cihan Tekin and Uğur Malayoğlu. Cold spray (CS) is a solid-state deposition process in which solid powders are accelerated towards the substrate via a converging/diverging nozzle. Coating deposition occurs without melting the

sprayed particles. Spray particles adhere to the substrate on impact because of their high kinetic energy. For successful bonding, powder particles have to exceed a critical velocity on impact, which is dependent on the properties of the particular spray material. Different materials such as metals, ceramics, composites and polymers can be deposited using CS. CS is a novel and promising technology to obtain surface coating, offering several technological advantages over thermal spray since it utilizes kinetic energy rather than thermal energy for deposition. As a result, residual stresses, oxidation and undesired chemical reactions can be avoided. Cold spray technology has many applications in the industry. It has been developed for the protection and repair of components used in many industries. In recent years, cold spray process has been used in application fields such as repair of electronic systems, additive manufacturing, welding, brazing, surface protection, medical devices, and medical materials. This study summarizes the cold spray process by briefly reviewing the historical development, basic principles and features, adhesion mechanism and application areas of the cold spray process.

*The eighth and final article title “Manufacture and Dimensional Verification of a Gas Turbine Engine Compressor Blade Produced via Additive Manufacturing Method using Ti6Al4V” by **Tamer Saraçyakupoğlu**. In this study, the production of a compressor blade belonging to a gas turbine engine via Additive Manufacturing (AM) method using Ti6Al4V alloy and dimensional verification measurements were performed. The Direct Metal Laser Sintering (DMLS) method, which is widely used in the aviation industry was chosen. After manufacturing, a total of 174 surface measurements were made, 87 on each blade. In the measurement, it was determined that there is an average deviation of +0.0944/-0.0809 mm in the 1st blade and +0.1093/-0.0978 mm in the 2nd blade compared to the 3D solid model. It was observed that the geometric deviation of the two blades is consistent with each other. As a result, it has been demonstrated, that compressor blades of a gas turbine engine can be produced via AM method using Ti6Al4V without dealing with the airworthiness studies for manufacturing the airborne part.*

You can also view the journal on the web page www.mmo.org.tr/muhendismakina and support us with your articles and comments.

Best regards until our next issue...

UCTEA CHAMBER OF MECHANICAL ENGINEERS
Board of Directors



Ekllemeli İmalatla Üretilen İşlevsel Olarak Derecelendirilmiş Metal Yapılar

Orhan Gülcan^{1*}, Uğur Şimşek², Barış Kavas³

ÖZ

İşlevsel olarak derecelendirilmiş yapılar (İDY), konvansiyonel malzeme işleme yöntemleri ile elde edilemeyen, aynı parça içerisinde birden çok fiziksel özelliğin elde edilebilmesi için mikroyapı, gözeneklilik veya kimyasal kompozisyonun, malzemenin hacmi boyunca kademeli olarak değiştiği bir malzeme çeşididir. Metal İDY, farklı konvansiyonel üretim yöntemleri ile üretilebilmektedir fakat Ekllemeli İmalat (Eİ) konusunda son zamanlarda elde edilen gelişmeler, karmaşık şekillerin üretilebilme ihtimali, düşük prototipleme maliyetleri, asgari kalıp üretimi, yüksek hassasiyet ve işlemin yüksek tekrar edilebilme özelliklerinden dolayı, farklı türlerde İDY'lerin üretilebilmesine olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada, Eİ ile üretilen metal İDY'ler konusunda son yıllarda elde edilen gelişmelere odaklanılmıştır. Eİ ile üretilen metal İDY'lerin detaylı literatür taraması ve farklı endüstrilerde kullanımı bu çalışmada anlatılacaktır.

Anahtar Kelimeler: İşlevsel olarak derecelendirilmiş yapılar, ekllemeli imalat, seçmeli lazer ergitme, enerji absorbe edebilme, topoloji optimizasyonu

Metal Additive Manufactured Functionally Graded Structures

ABSTRACT

Functionally graded structure (FGS) is a type of material where microstructure, porosity or chemical composition is gradually changing across the volume of the material so that multiple physical properties not possible within the same part made by conventional material processing techniques can be achieved. Metal FGSs can be produced with different conventional manufacturing processes but recent advances in Additive Manufacturing (AM) enable the production of different type of FGSs with the possibility of production of complex shapes, low cost for prototyping, minimum tooling, high accuracy and high repeatability. The present paper focuses on the recent advances in metal AM of FGSs. A detailed review of researches on metal AM of FGSs and their usage in different industries will be presented in this paper.

Keywords: Functionally graded structure, additive manufacturing, selective laser melting, energy absorption, topology optimization

* İletişim Yazarı

Geliş/Received : 29.01.2021

Kabul/Accepted : 04.02.2021

¹ Dr., General Electric Aviation, Gebze, ogulcan1981@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6688-2662

² General Electric Aviation, Gebze, ugur.simsek.16339@ozu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-4405-5420

³ General Electric Aviation, Gebze, baris.kavas@ge.com, ORCID: 0000-0002-7230-3129



EXTENDED ABSTRACT

Functionally graded structure (FGS) is a type of material where microstructure, porosity or chemical composition is gradually changing across the volume of the material. FGS was first proposed in 1984 in Japan where an engineering application required that there must be a temperature gradient of approximately 1000 K, between inside and outside of space plane. Since then, these types of materials have been used in aerospace, automobile, biomedical, defense, energy, electrical/electronics, marine, opto-electronics and sport industries so far to meet related requirements by changing tensile strength and Young modulus of the material.

FGSs can be used to access unique mechanical properties that are unachievable in traditional materials and also allow exhibition of multiple physical properties not possible within the same part made by conventional material processing techniques. By using suitable laser scanning strategy and laser source, FGSs can be produced with different crystallographic textures at different locations within a single component so that user-defined functional performance requirements can be met. Due to the non-homogenous structure of FGSs, macroscopic properties such as hardness, wear resistance, corrosion resistivity, thermal conductivity, specific heat and mass density can be altered by the gradual changes in volume fraction of the constituents.

Vapor deposition, plasma spraying, ion-beam assisted deposition, electrodeposition, powder metallurgy and centrifugal casting are some of the conventional manufacturing processes for FGSs. Today, AM provides novel solutions for production of different types of FGSs. AM or three-dimensional (3D) printing is a layer-by-layer manufacturing process in which a part can be built from a 3D computer-aided design (CAD) file sliced in a virtual environment, and then for each slice a machine-specific tool path is generated. Different from conventional, subtractive manufacturing methods, additive manufacturing (AM) is based on an incremental layer by layer manufacturing. AM gives engineers and researchers new design freedom to produce enhanced components or entire assemblies which were previously impossible or impractical to manufacture.

Possibility of production of complex shapes, low cost for prototyping, minimum tooling, high accuracy and high repeatability are some of the advantages of AM of FGSs. But it has also some disadvantages: requirement of post processing, very high specific energy consumption, huge equipment costs in case of metal products and lower productivity rates.

FGSs can be classified as stepwise graded FGSs or continuous graded FGSs in terms of type of grading. FGSs can also be classified as compositionally graded FGSs (the grading is created by the gradual variation) and structurally graded FGSs (the grading is created from graded spatial structure, such as graded porosity and lattice).

In aviation and biomedical industry, FGSs enable creating more functional parts by changing the porosity, and therefore density, across the bulk volume which will combine variation in mechanical properties and which reduces the stress concentration effects near the interface between different phases.

In biomedical industry, especially in orthopedic regenerative medicine, the approach is to implement bio-inspired metallic bone scaffolds and implants that shows similar biomechanical properties and natural structure with bones. For that purpose, metal FGSs are used in different areas of biomedical industry.

Mechanical performance of metal FGSs produced by AM have been investigated in different researches. In most of the researches, it was shown that metal FGSs are superior in terms of mechanical properties compared with their uniform counterparts. Some researches focused on the effect of processing parameters, type of FGSs, type of lattice structure, volume fraction or scanning strategy on mechanical performance of metal FGSs. Phase transformation and microstructure change in AM of FGSs also affect mechanical properties.

Designing of FGSs and representing the material distribution in a meaningful way are two main challenges researchers have faced with so far. For an effective design of FGSs, topology optimization (TO) approaches can be used. In AM, mainly three types of TO methods are used: Solid Isotropic Material Penalization (SIMP) which is a density based TO method in which material distribution is parametrized by the material density distribution [44], bi-directional evolutionary structural optimization (BESO) method which removes and adds material in different locations of the domain during TO and finally level set method which uses the modification of domain boundary approach.

This paper focuses on the metal FGSs produced by AM. It was stated in this paper that metal FGSs can be used in different industries because of their superior mechanical properties compared with their uniform counterparts. By tailoring processing parameters, type of FGSs, type of lattice structures, volume fraction or scanning strategy, mechanical performance of metal FGSs can be altered as desired. Also, using different TO strategies can enable effective design of FGSs.



1. GİRİŞ

İşlevsel olarak derecelendirilmiş yapılar (İDY), mikroyapı, gözeneklilik veya kimyasal kompozisyonun, malzemenin hacmi boyunca kademeli olarak değiştiği bir malzeme çeşididir. İDY ilk kez 1984 yılında Japonya’da bir mühendislik uygulamasında kullanılan plakanın iç ve dış kısımları arasında 1000 K sıcaklık farkı gereksinimi sonucunda önerilmiştir. Günümüze kadar, İDY, ihtiyaç duyulan malzemenin çekme dayanımı ve Young modül değerlerinin değiştirilmesi ile havacılık, otomobil, biomedikal, savunma, enerji, elektrik/elektronik, deniz sanayi, opto-elektronik ve spor endüstrilerinde kullanılmaktadır [1].

İDY, geleneksel yöntemlerle elde edilebilmesi mümkün olmayan mekanik özelliklerin elde edilmesinde [2] ve aynı malzeme içerisinde birden fazla fiziksel özelliğin elde edilmesinde [3] kullanılabilir. Uygun lazer tarama stratejisi ve lazer kaynağı kullanılarak, tek bir parçanın farklı yerlerinde farklı mikroyapılar elde edilerek, malzemeden istenilen fonksiyonel performans gereksinimlerinin karşılandığı İDY’ler üretilmektedir [4]. İDY’lerin homojen olmayan yapılarından dolayı, sertlik, aşınma direnci, paslanma direnci, ısı iletimi, yoğunluk gibi makroskobik özellikler, malzeme içerisindeki bileşenlerin hacim boyunca kademeli olarak değiştirilmesi ile değiştirilebilir [5].

2. METAL İDY’LERİN EKLEMELİ İMALAT (Eİ) İLE ÜRETİLMESİ

Geleneksel olarak İDY’lerin üretiminde buhar biriktirme, plazma püskürtme, iyon ışını destekli biriktirme, elektro biriktirme ve toz metalurjisi gibi yöntemler kullanılabilir [6]. Günümüzde, Eİ, farklı İDY türlerinin üretimi için yenilikçi çözümler sunmaktadır. Eİ, bilgisayar ortamında oluşturulmuş bir tasarım dosyasının sanal olarak dilimlenmesi ve her bir dilimde / katmanda makineye özgü takım yolunun oluşturulması ile, parçanın katman katman üretilmesi prensibine dayanır [7]. Malzeme çıkarma esasına dayanan geleneksel yöntemlerden farklı olarak, Eİ malzeme biriktirme esasına dayanır [8]. Eİ, mühendislere ve araştırmacılara, daha önce üretilmesi pratik ya da mümkün olmayan karmaşık parçaları tasarlamalarına olanak sağlamaktadır [9].

Metal İDY’lerin Eİ ile üretilmesinde, toz yatağı füzyonu (seçmeli lazer ergitme (SLE), seçmeli lazer sinterleme (SLS), elektron ışınıyla ergitme (EIE)), metal ekstrüzyonu, tabaka laminasyonu, bağlayıcı jeli ile birleştirme ve direk enerji biriktirme (DEB) yöntemleri kullanılabilir [10]. Örneğin, dikey ve radyal yönde gözenekliliğin kademeli olarak değiştiği Ti6Al4V İDY, bağlayıcı jeli ile birleştirme yöntemiyle başarılı bir şekilde üretilmiş ve elastisite modülünün gözenekliliğin homojen olduğu parçanınkinden daha yüksek çıktığı belirtilmiştir [11].

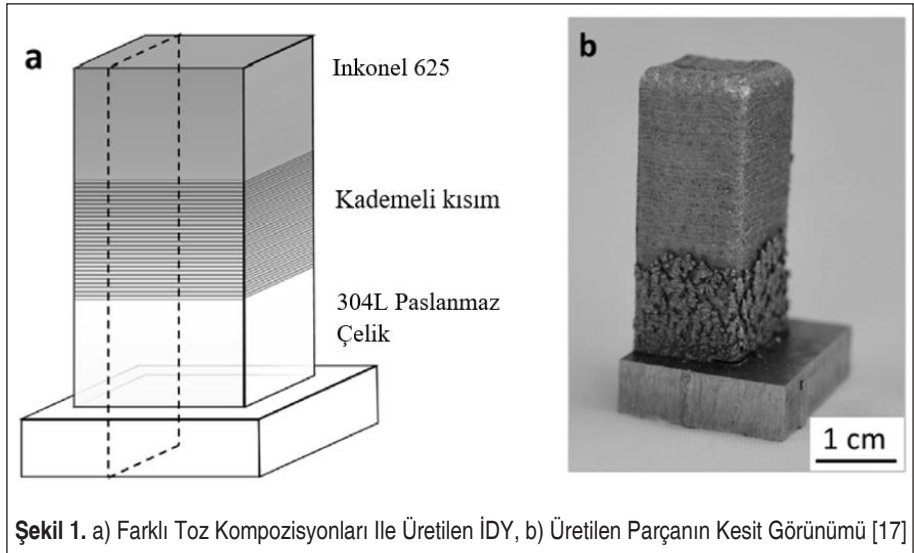
Karmaşık şekillerin üretilebilme ihtimali, düşük prototipleme maliyetleri, asgari kalıp üretimi, yüksek hassasiyet ve işlemin yüksek tekrar edilebilme özellikleri Eİ ile üretilen İDY'lerin bazı avantajlarıdır. Bunun yanında, üretimden sonra ilave bir işleme ihtiyaç duyması, yüksek enerji tüketimi, yüksek ekipman maliyeti ve düşük üretim oranları gibi bazı dezavantajları da vardır [12].

3. METAL İDY'LERİN SINIFLANDIRILMASI

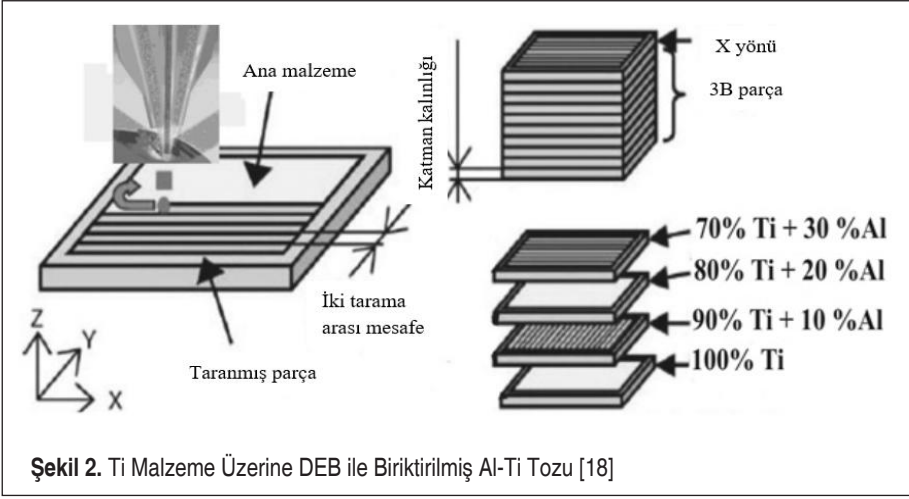
İDY'ler, derecelendirme tipine göre adım adım derecelendirilmiş İDY'ler ve sürekli derecelendirilmiş İDY'ler olmak üzere iki farklı sınıfa ayrılabilir. İDY'ler aynı zamanda, derecelendirmenin kademeli olarak değiştiği kompozisyonel olarak derecelendirilmiş İDY'ler ve kademeli gözeneklilik ya da kademeli kafes yapılar gibi yapısal olarak derecelendirilmiş İDY'ler olarak ta sınıflandırılabilir [13].

İDY'ler tek bir malzemedan ya da birden fazla malzemedan oluşabilmektedir [14]. Birden fazla malzemedan oluşan İDY'lere örnek olarak, uçak motorlarının türbin kanatlarında ve türbin disklerinde kullanılan malzemelere alternatif olarak geliştirilen ve lazer ergitme biriktirme yöntemiyle üretilen Ti-47Al-2.5V-Cr / Ti-6Al-2Zr-Mo-V İDY'ler verilebilir [15]. Diğer bir örnek olarak, kumlama yapılmış bakır parçaya SLE yöntemi ile tungsten tozunun biriktirilmesi ile oluşan İDY verilebilir [16].

İDY'lerin üretiminde farklı toz türlerinin karışımının farklı kompozisyonları kullanılabilir. Bu tür bir İDY'ye Şekil 1'de gösterilen ve DEB yöntemi ile üretilmiş parça örnek verilebilir. Bu parçada kademeli kısım 24 tabakadan oluşmakta ve her



Şekil 1. a) Farklı Toz Kompozisyonları ile Üretilen İDY, b) Üretilen Parçanın Kesit Görünümü [17]



Şekil 2. Ti Malzeme Üzerine DEB ile Biriktirilmiş Al-Ti Tozu [18]

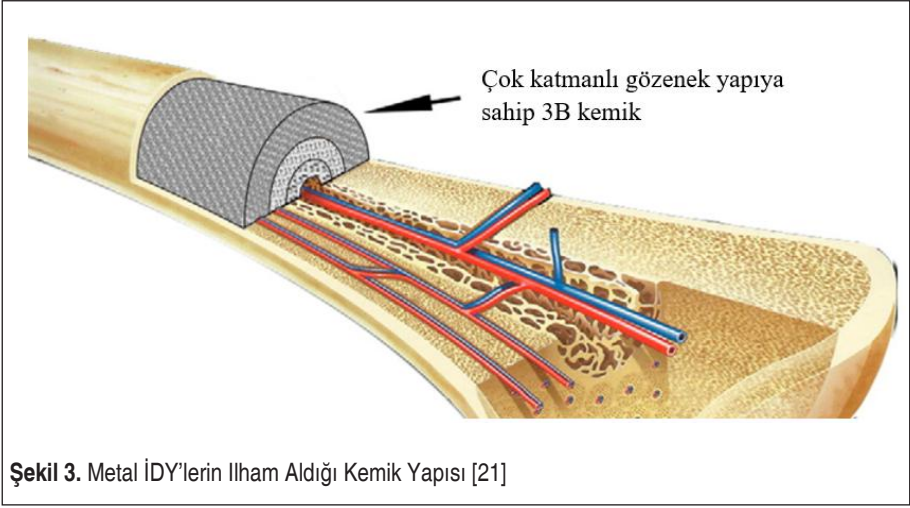
bir tabakada SS304L tozu % 4 azaltılmış ve IN625 tozu aynı miktarda arttırılmıştır [17]. Diğer bir örnek ise Şekil 2’de gösterilen ve yine DEB yöntemi ile üretilmiş, Ti malzeme üzerine farklı kompozisyonlarda Ti-Al tozlarının biriktirilmesi ile oluşan İDY’dir [18]. Genel olarak bu tür İDY’ler, alaşımların uyumluluğu, ara metal fazları oluşumu, çözünürlük sınırlılıkları ve ısıl özelliklerin uyumsuzluğu gibi problemlere sahiptir [19].

4. Eİ İLE ÜRETİLEN METAL İDY’LERİN ENDÜSTRİ UYGULAMALARI

İDY sayesinde, özellikle havacılık ve biomedikal sanayide, kullanılan malzemenin hacmi boyunca gözenekliliğin ve dolayısıyla yoğunluğun değişmesiyle mekanik özellikler değiştirilebilmekte ve bu sayede malzeme üzerinde gerilimin yoğunlaştığı bölgelerin daha az deformasyona uğraması sağlanabilmektedir [20].

Biomedikal sanayide, özellikle ortopedik rejeneratif tıpta, kemik yapısı ile benzer biomekanik ve yapısal özellikler gösteren metal kemik yapılarının ya da implantların kullanılması hedeflenmektedir (Şekil 3)[21]. Bu amaçla, İDY’ler biomedikal endüstrinin farklı kollarında kullanılmaktadır.

Ortopedide, implantların Young Modülünün insan kemiğinininki ile benzer olması gerekmektedir (3–20 GPa). Geleneksel yöntemlere göre üretilen implantların Young Modülünün çok yüksek olmasından dolayı (110–210 GPa), bu implantların Eİ ile üretilmesi ve bu sayede daha düşük Young Modülü değerlerinin elde edilme-



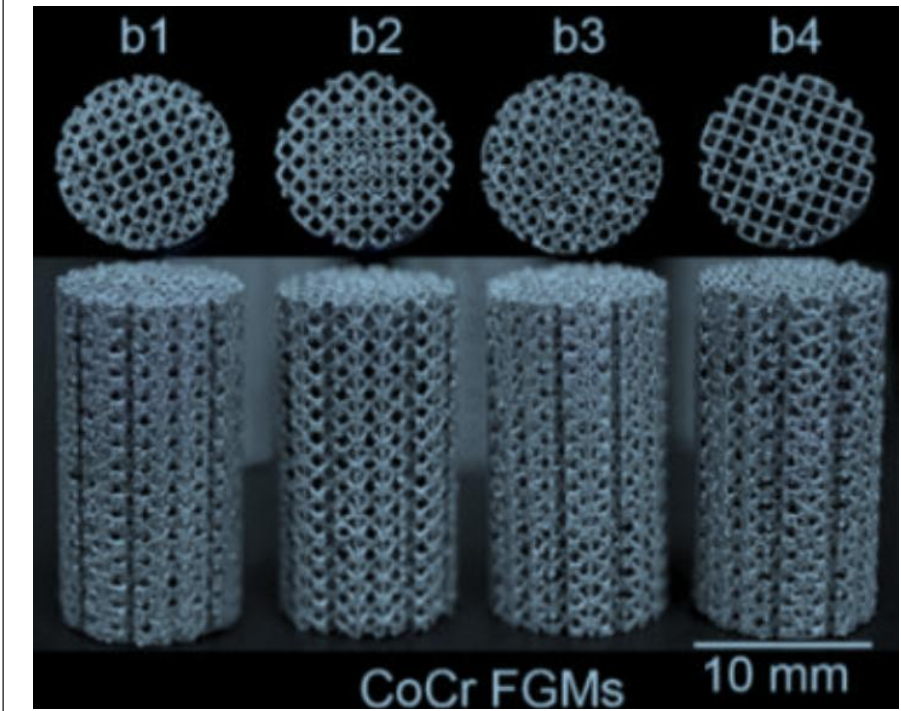
si önem arz etmektedir [22]. Fousová ve arkadaşları, %61 gözenekliliğe ve eşkenar dörtgen yüzeyli on iki yüzlü şekilli kafes yapısına sahip Ti6Al4V İDY'yi SLE yöntemiyle üretmişler ve insan kemiğinin Young Modülüne yakın değerler elde etmişlerdir (30.5 ± 2.0 GPa) [23]. Ortopedide, mevcut kemiğin implant uygulanmış yapıya nüfuz etmesi için bazı gereksinimlere ihtiyaç vardır, örneğin, gözenek boyutu 50-800 μm aralığında olmalı ve gözeneklilik % 50'den fazla olmalıdır. Kemik yapısı, gözenekliliğin ve dolayısıyla yoğunluğun kademeli olarak değiştiği bir yapı olduğu için, İDY'ler implant uygulamaları için geleneksel yöntemlere göre daha uygun özellikte malzeme sağlayabilmektedir [25]. Sudarmadji ve arkadaşlarının yaptığı çalışmaya göre yoğunluğun kademeli olarak değiştiği İDY'lerin SLE yöntemiyle üretilmesi neticesinde elde edilen implantların gözeneklilik, basma ve akma dayanımları, süngerimsi yapıdaki kemiklerinkiyle uyum halindedir [25]. Benzer şekilde, yoğunluğun kademeli olarak değiştiği İDY kalça implantları, SLE yöntemiyle literatürde üretilmiş ve daha yüksek eğilme özellikleri ve daha az ağırlık değerleri elde edilmiştir [26]. İDY'ler, implantın kemiğe osseo-entegrasyonu için elastik özelliklerin ve yüzey pürüzlülüğünün çok önemli olduğu diş implantlarında da kullanılmaktadır [27].

Yapılan araştırmalar, İDY'lerin enerji harcayan yapılar için de çok uygun bir malzeme olduğunu göstermiştir. Hou ve arkadaşlarının bu kapsamda yaptığı bir çalışmaya göre negatif Poisson oranlı kafes yapısına sahip İDY'ler, kafes yapısının düzgün bir şekilde olduğu ve yoğunluğun kademeli olarak değişmediği yapılara göre daha düşük reaksiyon kuvveti göstermekte ve daha yüksek enerji absorbe edebilme özelliği göstermektedir [28].

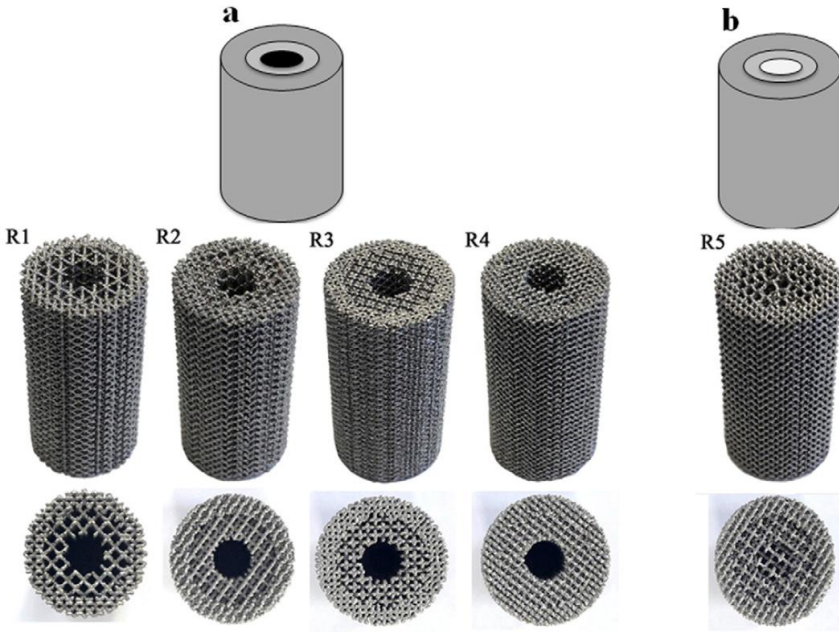
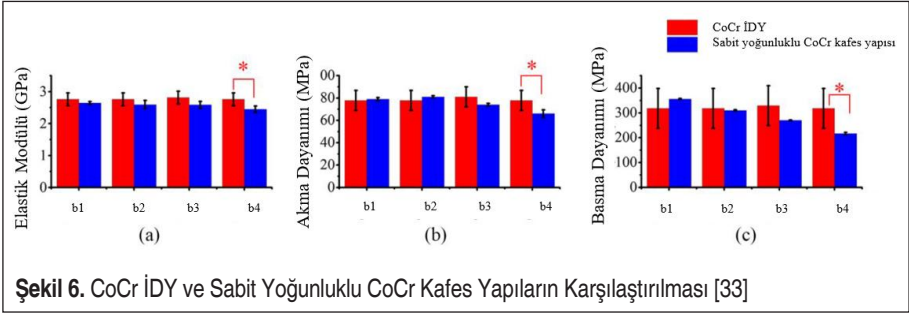


5. Eİ İLE ÜRETİLEN METAL İDY'LERİN MEKANİK KARAKTERİZASYONU

Literatürde birçok farklı çalışmada Eİ ile üretilen İDY'lerin mekanik özellikleri araştırılmıştır. Çoğu çalışmada, İDY'lerin yoğunluğun hacim boyunca sabit olduğu yapılaraya göre daha üstün mekanik özelliklere sahip olduğu belirtilmiştir. Xiao ve Song'un SLE yöntemiyle ürettikleri eşkenar dörtgen yüzeyli on iki yüzlü kafes yapısına sahip



Şekil 5. CoCr İDY'ler (Merkezi Boş, Merkezi Dolu, Yoğunluğun Merkezden Dışarıya Doğru Arttığı ve Azaldığı, b1-b4) [33]



Ti6Al4V parçalar, statik ve dinamik yüklemeler sonucunda, yoğunluğun hacme göre değişmediği yapıya göre daha yüksek dayanım ve enerji absorbe edebilme özelliği (% 28 daha fazla) göstermiştir [29]. Choy ve arkadaşları da SLE yöntemiyle üretilen Ti6Al4V İDY'lerin basma sırasında, en az yoğun olan yerden başlayarak deforme olduğunu ve plato stresi ve enerji absorbe edebilme özelliği açısından yoğunluğun hacme göre değişmediği yapıya göre daha üstün olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 4) [30]. Benzer bir yorum SLE yöntemiyle üretilen hacim merkezli kübik kafes yapısına



sahip AlSi10Mg yapılar için de yapılmıştır [31]. Al-Saedi ve arkadaşları da SLE yöntemiyle üretilen yüzey merkezli kübik kafes yapısına sahip AlSi-12 yapıların enerji absorbe edebilme özelliklerinin, yoğunluğun hacme göre değişmediği yapılara göre daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir [32]. Literatürde farklı sonuçlar elde edildiği durumlar da görülmüştür. Limmahakhun ve arkadaşları SLE yöntemiyle farklı kafes yapılarında (merkezi boş, merkezi dolu, yoğunluğun merkezden dışarıya doğru arttığı ve azaldığı) CoCr İDY'ler üretmişlerdir (Şekil 5). Yazarlar, mekanik özellikler bağlamında, İDY'lerin, yoğunluğun hacme göre değişmediği kafes yapılara göre ciddi bir değişim göstermediği (Şekil 6) ama İDY'lerin daha dengeli mekanik özellikler gösterdiğini belirtmişlerdir [33].

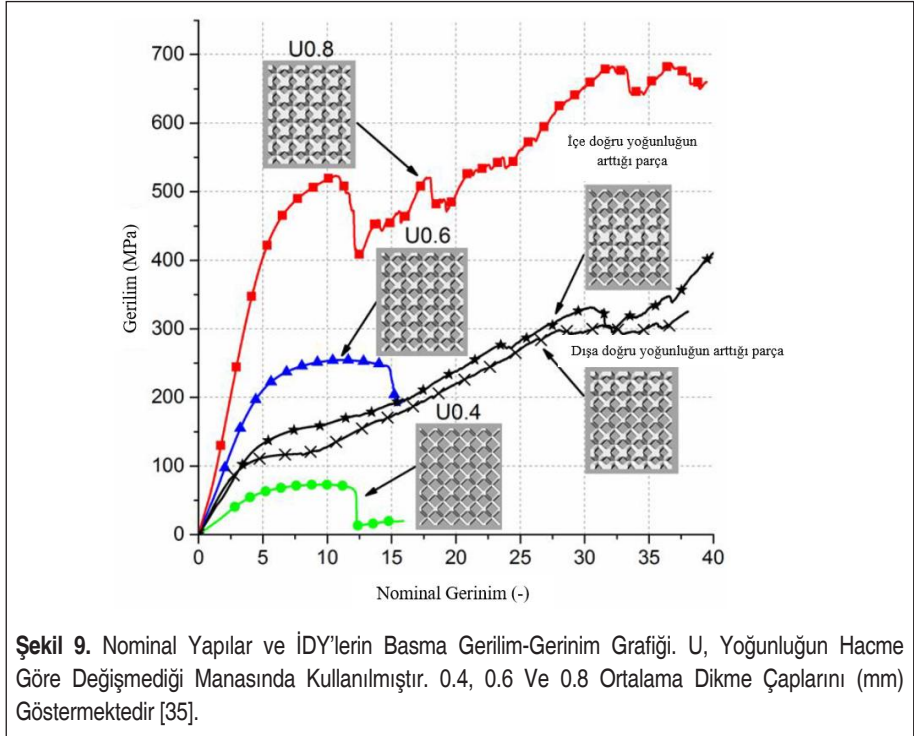
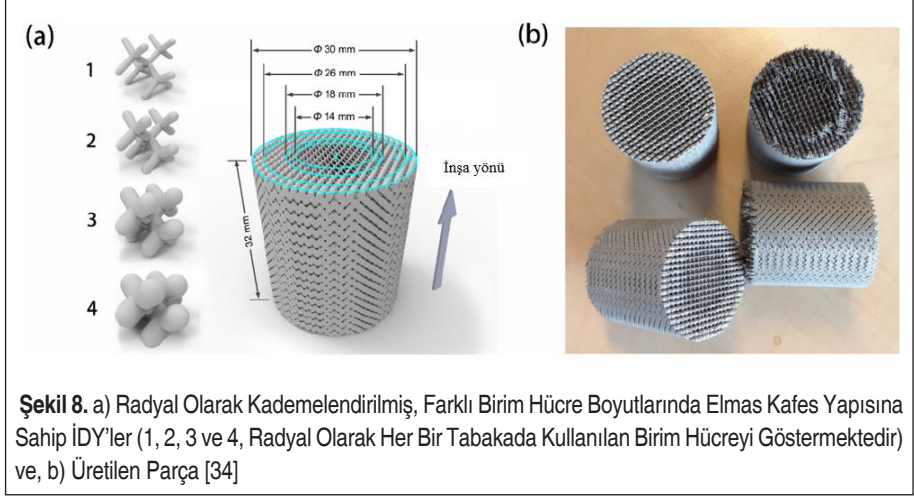
Surmeneva ve arkadaşları, EIE yöntemiyle iki ve üç aşamalı, Ti6Al4V kafes yapılı (hacim merkezli kübik ve elmas) İDY'ler üretmişlerdir (Şekil 7). Yazarlar, basma testleri sonucunda (Tablo 1), İDY'lerin yoğun yapılara göre daha düşük Young Modülü değerleri gösterdiklerini belirtmişlerdir [21].

Zhang ve arkadaşları, SLE yöntemiyle radyal olarak kademelendirilmiş elmas kafes yapısına sahip Ti6Al4V İDY üretmişlerdir (Şekil 8). Yoğunluğun hacme göre değişmediği gözenekli yapılara göre, üretilen İDY'nin daha düşük yoğunluğa (1.9 g/cm^3), ortalama Young Modülüne (10.44 GPa), yüksek akma dayanımına (170.6 MPa), yüksek azami gerilime (201 MPa) ve kabul edilebilir sünekliliğe sahip olduğunu belirt-

Tablo 1. EIE Yöntemiyle Üretilen Beş Farklı İDY'nin Basma Test Sonuçları [21]

Parametre	Tasarım				
	R1	R2	R3	R4	R5
Ağırlık (g)	5.69 ± 0.06	5.53 ± 0.02	12.25 ± 0.39	12.44 ± 0.28	9.52 ± 0.41
Hacim (cm ³)	2.51	2.51	2.51	2.51	6.04
Yoğunluk, ρ (g/ cm ³)	1.61	1.57	3.48	3.53	1.59
Göreceli Yoğunluk, ρ/ρ_0 ($\rho_0 = 4.43 \text{ g/ cm}^3$)	0.36	0.35	0.78	0.79	0.35
Gözeneklilik (%)	64	65	22	21	65
Basma Dayanımı (MPa)	48 ± 1	31 ± 1	212 ± 1	162 ± 24	49 ± 19
Elastik Modülü (GPa)	1.25 ± 0.47	0.87 ± 0.08	2.26 ± 0.07	3.09 ± 0.55	1.28 ± 0.35
Akma Dayanımı (MPa)	37 ± 1	32 ± 1	-	130 ± 5	47 ± 4
Basma Gerinimi (%)	8	7	-	9	5

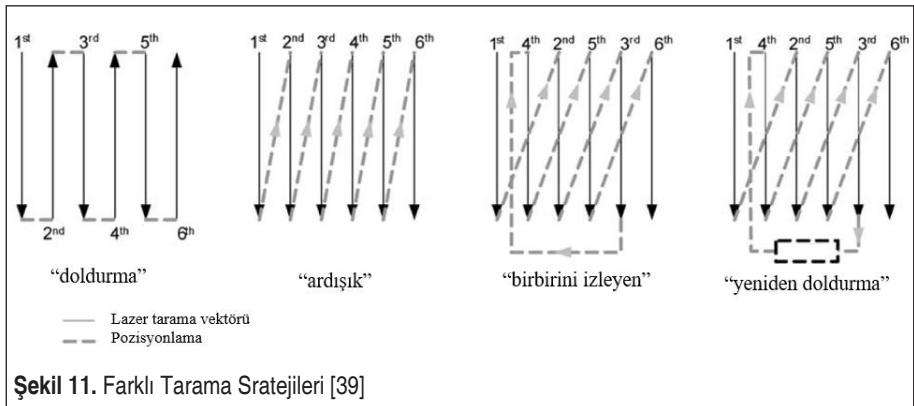
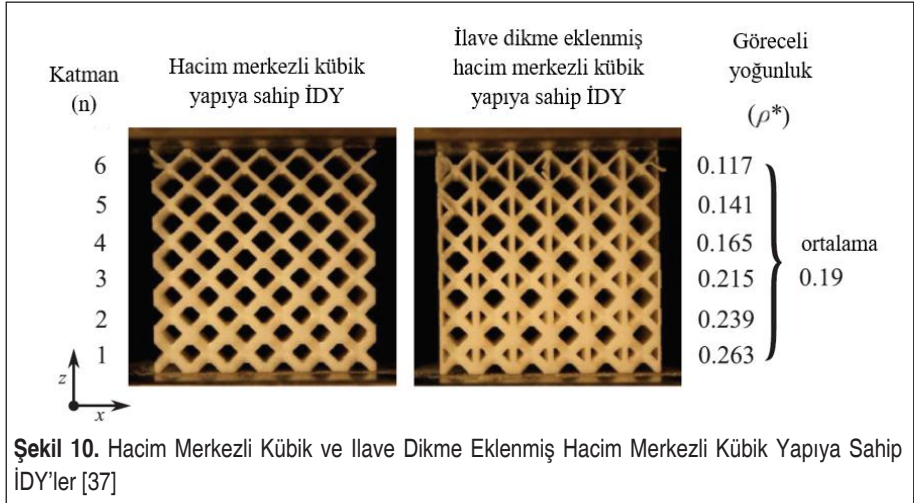
mişlerdir [34]. SLE yöntemiyle üretilen Ti6Al4V İDY'lerin, yoğunluğun hacme göre değişmediği yapılarla basma durumunda aynı davranışı gösterdiği ama plastik bölgeye geçildikten sonra, yoğunluğun hacme göre değişmediği yapıların aniden deforme





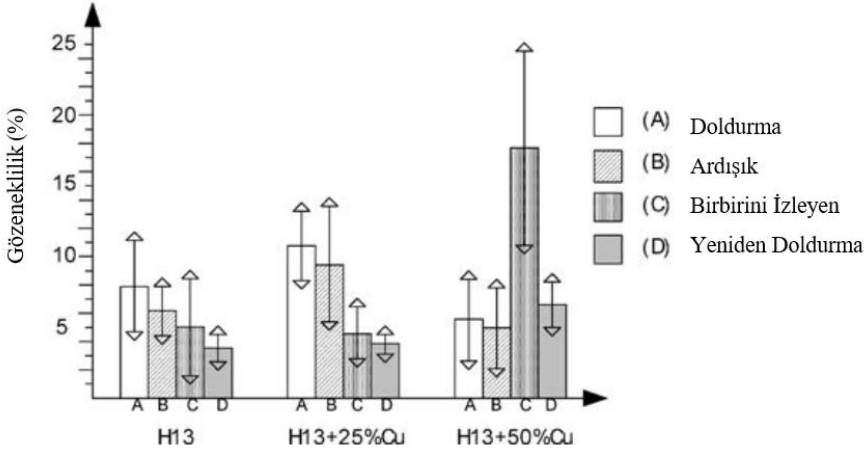
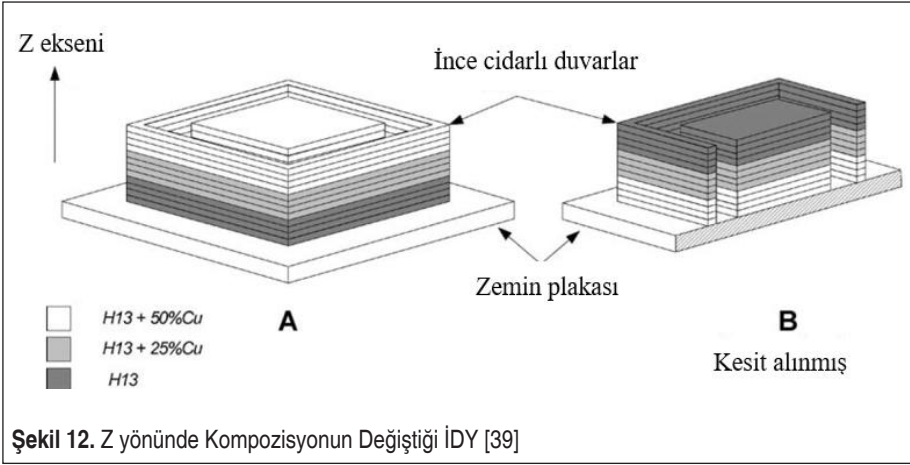
olmasına rağmen İDY'lerde bu sürenin uzadığı belirtilmiştir (Şekil 9) [35]. Zhao ve arkadaşları, EIE yöntemiyle farklı dikme açılarında eşkenar dörtgen yüzeyli on iki yüzü kafes yapısına sahip İDY'ler üretmişlerdir. Yoğunluğun hacme göre değişmediği yapılarla kıyaslandığında, üretilen İDY'lerin düşük yoğunluk ($0.5\text{-}2\text{g/cm}^3$), yüksek yorulma dayanımı ($\sim 70\text{ MPa}$) ve yüksek enerji absorbe edebilme özelliği ($\sim 50\text{ MJ/mg}$) gösterdiği belirtilmiştir [36].

Bazı yazarlar, İDY'lerin mekanik performansları üzerinde işleme parametrelerinin, İDY tipinin, kafes yapısı tipinin, hacim oranının ve tarama stratejisinin etkisini incelemişlerdir. Maskery ve arkadaşları, bu amaçla SLS yöntemiyle hacim merkezli kübik ve ortasında ilave dikme bulunan hacim merkezli kübik İDY'ler üretmişlerdir (Şekil 10). Yazarlar, hacim merkezli kübik İDY yapının izotropik olmasına rağmen, ilave dikme eklenmesinin yapıyı anizotropik hale getirdiğini ve hacim merkezli kübik

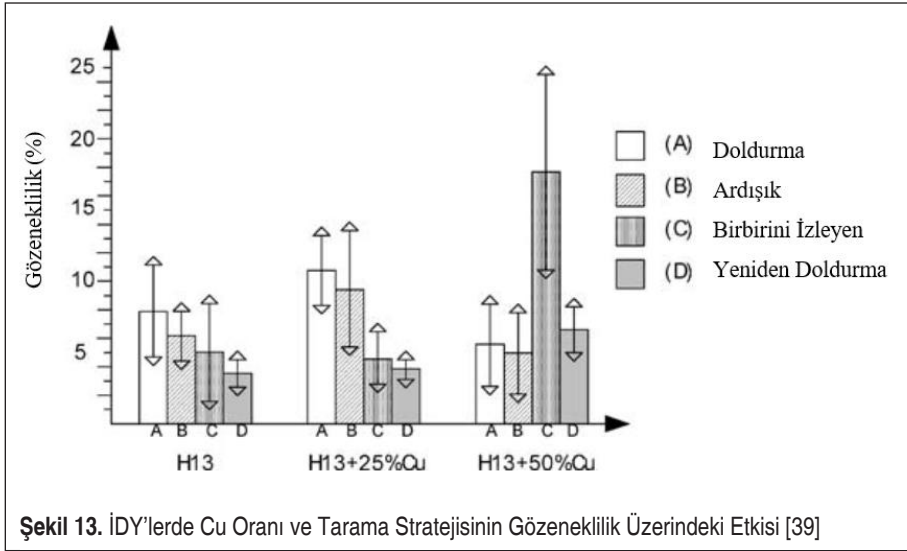


yapılara göre, ilave dikme eklenmesinin, ilave dikme boyunca yapılan yüklemelerde, Young Modülü ve plato dayanımını arttırdığını ama ilave dikmeye dik yönde yapılan yüklemelerde dayanımını azalttığını belirtmişlerdir. Yoğunluğun hacme göre artmadığı yapılar göre, ilave dikmeli hacim merkezli kübik İDY'ler, %114 daha fazla enerji absorbe edebilme özelliği göstermiştir [37].

Han ve arkadaşları ise, farklı hacim oranlarındaki Ti elmas İDY'leri SLE yöntemiyle üretmiş ve hacim oranının artması ve dolayısıyla toplam yoğunluğun azalması ile elastik modülü ve akma dayanımının arttığını belirtmişlerdir [38]. Daha yoğun İDY elde etmek için, Bael ve arkadaşları farklı tarama stratejileri denemişlerdir (Şekil 11). İDY'lerin üretiminde farklı kompozisyonlarda H13-Cu tozlarının kullanıldığı çalış-



Şekil 13. İDY'lerde Cu Oranı ve Tarama Stratejisinin Gözeneklilik Üzerindeki Etkisi [39]



Şekil 13. İDY'lerde Cu Oranı ve Tarama Stratejisinin Gözeneklilik Üzerindeki Etkisi [39]

mada (%100 H13, %75 H13 - %25 Cu, %50 H13 - %50 Cu) (Şekil 12), daha yoğun İDY'lerin elde edilebilmesi için en uygun tarama stratejisinin “yeniden doldurma” stratejisinin olduğu belirtilmiştir (Şekil 13). Yapılan istatistiksel analizler, gözeneklilik üzerinde en etkili faktörün Cu oranı, ikincisinin ise tarama stratejisi olduğunu göstermiştir [39].

Kafes yapıya sahip İDY'lerin mekanik özellikleri üzerinde dikme boyutlarının da ciddi etkisi vardır. Parthasarathy ve arkadaşlarının, EIE yöntemiyle ürettikleri kafes yapıya sahip İDY'lerde, dikme boyutlarının azalması ile tasarlanan ve üretilen İDY arasındaki mekanik özellik farklarının azaldığı görülmüştür. Ayrıca, hemen hemen aynı gözenekliliğe (%49.75 and %50.75) sahip kafes yapıya sahip İDY'lerde, dikme boyutlarındaki azalma ile basma dayanımının 2.92 GPa'dan 0.57 GPa'a, basma geriliminin ise 163.02 MPa'dan 7.28 MPa'a düştüğü belirtilmiştir [40].

Mekanik özellikler üzerinde farklı kafes yapı tiplerinin de etkisi vardır. Liu ve arkadaşlarının SLE yöntemiyle ürettikleri Ti6Al4V gyroid ve elmas kafes yapıları İDY'lerde, elmas kafes yapıları İDY'nin daha fazla yüzey alanına ve daha küçük gözeneklere sahip olduğu, gyroid kafes yapıları İDY'lerin ise daha fazla sünekliliğe ve azami dayanıma sahip olduğu belirtilmiştir [41].

Faz değişimi ve mikroyapı değişiminin de Eİ ile üretilen metal İDY'lerin mekanik özellikleri üzerinde etkili olduğu literatürde belirtilmiştir. Zhang ve arkadaşları, SLE yöntemiyle hacim merkezli kübik yapıya sahip Ti6Al4V İDY'ler üretmişlerdir. Yazarlar, üretilen parçanın daha çok α' martenzit mikroyapıya sahip olduğu ama ısı işleminden sonra mikroyapının $\alpha+\beta$ yapısına dönüştüğü ve bu mikroyapı dönüşümün-



den dolayı, kırılğan olan üretilmiş parçanın ısıl işlemden sonra sünek hale geldiğini belirtmişlerdir [42]. Wei ve arkadaşları da SLE yöntemiyle farklı kompozisyonlarda 316L/Cu10Sn toz karışımını kullanarak (% 100 316L, %75 316L, %50 316L, %25 316L ve %100 Cu10Sn) İDY parçalar üretmişler ve üretim sırasında oluşan ikinci faz Cu₉NiSn₃'ün üretilen 316L/Cu10Sn parçanın sertliğini arttırdığını ve en yüksek değerine (213.24 HV) %50 316L kompozisyonunda ulaştığını belirtmişlerdir [43].

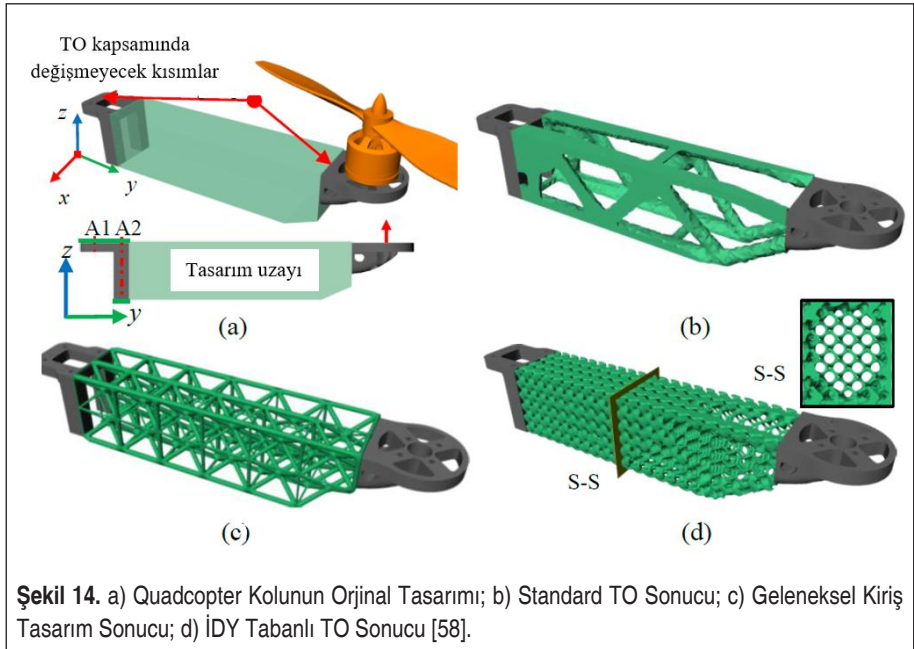
6. METAL İDY'LERİN TASARIMI İÇİN TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU

İDY'lerin tasarlanması ve malzeme dağılımının parça üzerinde anlamlı bir şekilde gösterilmesi uzun süredir araştırmacıların karşılaştığı iki büyük problemdir [3]. İDY'lerin verimli bir şekilde tasarlanması için, topoloji optimizasyon (TO) yöntemleri kullanılabilir. Eİ' de, üç farklı TO yöntemi kullanılmaktadır: malzeme dağılımının, malzeme yoğunluk dağılımına göre parametrelendirildiği, yoğunluk tabanlı TO metodu olan Katı İzotropik Malzeme Penalizasyonu (KİMP) [44], parçanın farklı yerlerinde ve bölgelerinde malzeme ekleme veya çıkarma yöntemine dayanan iki yönlü evrimsel yapısal optimizasyonu yöntemi (İEYO) [45] ve son olarak alan sınırı değişimi yaklaşımını kullanan seviye ayarlama metodu [46].

İDY tasarımı için literatürde bu temel yöntemler farklı şekillerde kullanılmıştır. Bu kısımda çok farklı özellikler içeren ve karmaşık olan bu TO yöntemlerinin uygulanma biçimlerinden kısaca bahsedilecektir. Paulino ve arkadaşları, kademeli sonlu eleman kavramının kullanılarak malzeme özelliklerinin tasarım alanı içinde sürekli değiştiği KİMP tabanlı "sürekli topoloji optimizasyonu" formülasyonu kullanmışlardır [47]. Zhang ve arkadaşları, hücresel yapının önce mikroyapı karakterizasyon parametreleri ile temsil edildiği ve daha sonra sürekli karakterizasyon parametrelerinin tek tek hücrelere eşleştirilmesiyle açık bir hücresel yapının oluşturulduğu bir yöntem önermişlerdir [48]. Daynes ve arkadaşları, kafes hücrelerinin, yük taşıyan kafes giriş elemanlarını ana gerilmelerle hizalamak için boyut, en boy oranı ve yönelim açısından fonksiyonel olarak derecelendirildiği izostatik çizgi yöntemini kullanmışlardır. Optimizasyon için mevcut olan bu ek tasarım değişkenleri nedeniyle, sertlik ve mukavemette iyileşmenin sağlandığını belirtmişlerdir [49]. Cheng ve arkadaşları, kafes yapıların etkili mekanik özelliklerinin, mikroyapıları detaylı bir şekilde modellemeden anizotropik kurucu yasalarla tarif edildiği homojenizasyon tabanlı topoloji optimizasyonunu (HMTO) kullanmışlardır. Topolojik olarak optimize edilmiş bir parçanın sertliğinin ve mukavemetinin sırasıyla % 110 ve % 75'ten fazla arttığını bulmuşlardır [50]. Jin ve arkadaşları, etkili mekanik özelliklerin göreceli yoğunluğun fonksiyonları olarak kullanıldığı TO ile birleştirilmiş bir yoğunluk-değişken kafes yapı tasarım yöntemi önermişlerdir [51]. Liu ve arkadaşları, birim hücredeki bileşenlerin / boşlukların



geometrisini karakterize eden topoloji tasarım fonksiyonlarına göre bir dizi koordinat pertürbasyon fonksiyonunun (CPF) pertürbasyon katsayılarını optimize ederek açık topoloji optimizasyonunu kullanmışlardır. Her ne kadar yazarların önerdiği yöntem, karmaşık ve optimize edilmiş kademeli kafes/gözenekli yapılarla sonuçlansa da, özellik boyutu kısıtlamalarının problem formülasyonuna dahil edilmemesinden dolayı optimize edilmiş sonuçlarda hala bazı yetersiz bileşenlerin olduğu belirtilmiştir [52]. Panesar ve arkadaşları, farklı TO tasarım stratejileri (yani Kesişen/Kademeli/Ölçekli kafesler) kullanmışlar ve bu tasarım stratejilerinin, homojen kafeslere kıyasla sertlikte %40-50 artışa neden olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca, kademeli kafes stratejisinin, yüklemeye değişkenlerine karşı yüksek dayanıklılığı nedeniyle mekanik performans açısından en sağlam strateji olduğunu belirtmişlerdir [53]. Gyroid ve elmas gibi üçlü periyodik minimum yüzey olarak adlandırılan kafes yapıları oluşturmak için Li ve arkadaşları, bir tasarım alanında ve verilen sınır koşulları altında kafes yapıların göreceli yoğunluğunun yeniden dağıtılmasının mekanik sertlik veya ısı iletim optimizasyonu ile sonuçlandığı üretken bir tasarım ve optimizasyon yaklaşımı kullanmışlardır [54]. Yi ve arkadaşları, KİMP yöntemindeki yoğunluk alanında, değişken yarıçaplı Helmholtz PDE-filtresi uygulamışlardır. Burkulma kısıtlamaları olarak, doğrusal burkulma analizinden elde ettikleri burkulma yük faktörlerini kullanmışlar ve bu yöntemin KİMP'tekilerle karşılaştırılabilir katı yapılar üretebileceği sonucuna varmışlardır [55]. Cheng ve arkadaşları, kafes malzemesinin elastik özelliklerini göreceli yoğun-





luk açısından hesaplamak için bir asimtotik homojenizasyon yöntemi kullanmışlar ve kafes yapısının plastik performansını tahmin etmek için hidrostatik yükleme dikkate alınarak modifiye edilmiş Hill akma kriteri uygulamışlardır. Gerilim temelli kafes tasarımının yapının hem elastik hem de plastik özelliklerini önemli ölçüde artırabileceği sonucuna varmışlardır [56]. Goel ve Anand, hacim merkezli kübik birim hücresi ile düzgün şekilde bağlanmış İDY'leri geliştirmek için B-spline yüzey tabanlı metodolojiyi kullanmışlardır. Yazarlar, Eİ'de İDY'leri üretebilmek için, bu yöntemin telafi değerleri uygulanmış dikme çapları, gözenek boyutu ve küçük açıklıklar gibi bazı tasarım parametrelerine ihtiyaç duyduğunu belirtmişlerdir [57].

İDY'lerin TO'suna örnek olarak, bir quadcopter kol tasarımı (Şekil 14) verilebilir. Optimize edilmiş İDY quadcopter kolunun yer değiştirmesinin, aynı sınır ve yükleme koşulları için geleneksel tasarımından %44.7 daha az olduğu gösterilmiştir [58].

7. SONUÇ VE İLERİKİ ÇALIŞMALAR

Bu makalede Eİ yöntemiyle üretilen metal İDY'lerden bahsedilmiştir. Metal İDY'lerin, üstün mekanik özelliklerinden dolayı, sabit yoğunluklu muadillerine göre farklı endüstrilerde kullanılabileceği belirtilmiştir. İşleme parametrelerini, İDY'lerin tipini, kafes yapılarının tipini, hacim oranını veya tarama stratejisini değiştirerek, metal İDY'lerin mekanik performansı istenildiği gibi değiştirilebilir. Ayrıca, farklı TO stratejilerinin kullanılması İDY'lerin etkili tasarımını mümkün kılabilir. Literatürün ayrıntılı araştırılması, Eİ yöntemiyle üretilen metal İDY'lerin gelecekteki çalışmalarda araştırılması ve çözülmesi gereken bazı zorlukları ve sorunları olduğunu göstermektedir. Araştırmacılara, gelecekteki çalışmalar için yön verebilecek bu zorluk ve sorunlardan bazıları şu şekilde belirtilebilir;

- Eİ ile üretilen metal İDY uygulamaları için “malzeme-ürün-üretim” ilkeleri, yöntemleri ve standartları halen araştırılmaktadır [14].
- Parametreler ve testler açısından uygun bir İDY veri tabanı mevcut değildir. Bu nedenle, araştırmalar gelişmiş test yöntemleri geliştirmeye odaklanabilir [59].
- İDY tasarımı, bilgisayar destekli tasarım yazılımının kullanımını içerir. Ancak, düşük yoğunluktan yüksek yoğunluklu alanlara geçiş bölgelerinin modellenmesi hala bazı geometrik problemlerle karşı karşıyadır ve çok fazla zaman gerektirir. Bu sürenin kısaltılması için yöntemler geliştirilmesi konusunda yapılan çalışmalar çok yetersizdir [60].
- Metal İDY üretiminin çoğu SLE, DEB veya EIE yöntemleriyle yapılmaktadır. Diğer Eİ yöntemleri, örneğin SLS, İDY'lerin üretiminde kullanılabilir.
- Bilgisayar destekli tasarım teknolojisi ve optimizasyon araçlarındaki ilerlemelerle, kademeli parça tasarımları için farklı kafes yapıları kullanılabilir. Literatürde kafes yapıları olan birkaç İDY vardır.



- Literatürde işleme parametrelerinin İDY'lerin mekanik performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır, ancak metal İDY'lerin yorulma davranışı ve işleme parametrelerinin bu yorulma davranışı üzerindeki etkisi hala ayrıntılı araştırmaya ihtiyaç duymaktadır [13].

TEŞEKKÜR

Bu makale, TÜBİTAK Teknoloji ve Yenilik Destek Programı kapsamında desteklenmiştir (Proje No: 5158001)

KAYNAKÇA

1. **Mahamood, R. M., Akinlabi, E. T.** 2017. *Functionally graded materials*, ISBN: 978-3-319-85236-2 Springer International Publishing, Switzerland.
2. **Sha, Y., Jiani, L., Haoyu, C., Ritchie, R. O., Jun, X.** 2018. "Design and strengthening mechanisms in hierarchical architected materials processed using additive manufacturing". *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 149, p. 150-163. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.09.038>.
3. **Stoner, B., Bartolai, J., Kaweesa, D. V., Meisel, N. A., Simpson, T. W.** 2018. "Achieving functionally graded material composition through bicontinuous mesostructural geometry in material extrusion additive manufacturing", *JOM*, vol. 70, p. 413-418. <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2669-z>.
4. **Popovich, V. A., Borisov, E. V., Popovich, A. A., Sufiarov, V. S., Masaylo, D. V., Alzina, L.** 2017. "Functionally graded Inconel 718 processed by additive manufacturing: Crystallographic texture, anisotropy of microstructure and mechanical properties", *Materials & Design*, vol. 114, p. 441-449. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.10.075>.
5. **Naebe, M., Shirvanimoghaddam, K.** 2016. "Functionally graded materials: A review of fabrication and properties", *Applied Materials Today*, vol. 5, p. 223-245. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2016.10.001>.
6. **Popoola, P., Farotade, G., Fatoba, O., Popoola, O.** 2016. "Laser engineering net shaping method in the area of development of functionally graded materials (FGSs) for aero engine applications - a review", <https://www.intechopen.com/books/fiber-laser/laser-engineering-net-shaping-method-in-the-area-of-development-of-functionally-graded-materials-fgm>, son erişim tarihi: 21.08.2020.
7. **Avila, J. D., Bose, S., Bandyopadhyay, A.** 2018. *Additive manufacturing of titanium and titanium alloys for biomedical applications*, Titanium in Medical and Dental Applications, Woodhead Publishing Series in Biomaterials, ISBN: 978-3-319-91713-9, Springer International Publishing, Switzerland.
8. **Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., Emmelmann, C.** 2016. "Additive manufacturing of metals", *Acta Materialia*, vol. 117, p. 371-392. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019>.
9. **Flores, I., Kretschmar, N., Azman, A. H., Chekurov, S., Pedersen, D. B., Chaudhuri,**



- A. 2020. "Implications of lattice structures on economics and productivity of metal powder bed fusion", *Additive Manufacturing*, vol. 31, p. 100947. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100947>.
10. **Kieback, B., Neubrand, A., Riedel, H.** 2003. "Processing techniques for functionally graded materials", *Materials Science and Engineering A*, vol. 362, p. 81-105. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(03\)00578-1](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(03)00578-1).
 11. **Barui, S., Chatterjee, S., Mandal, S., Kumar, A., Basu, B.** 2017. "Microstructure and compression properties of 3D powder printed Ti-6Al-4V scaffolds with designed porosity: Experimental and computational analysis", *Materials Science and Engineering: C*, vol. 70, p. 812-823. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.09.040>.
 12. **El-Galy, I. M., Saleh, B. I., Ahmed, M. H.** 2019. "Functionally graded materials classifications and development trends from industrial point of view", *SN Applied Sciences*, vol. 1, p. 1378. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1413-4>.
 13. **Chen, Y., Liou, F.** 2018. "Additive manufacturing of metal functionally graded materials: a review", *Proceedings of the 29th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, The University of Texas at Austin, Austin, Texas, USA.
 14. **Loh, G. H., Pei, E., Harrison, D., Monzon, M. D.** 2018. "An overview of functionally graded additive manufacturing", *Additive Manufacturing*, vol. 23, p. 34-44. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.023>.
 15. **Qu, H. P., Li, P., Zhang, S. Q., Li, A., Wang, H. M.** 2010. "Microstructure and mechanical property of laser melting deposition (LMD) Ti/TiAl structural gradient material", *Materials and Design*, vol. 31, p. 574-582. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.07.004>.
 16. **Tan, C., Zhou, K., Kuang, T.** 2019. "Selective laser melting of tungsten-copper functionally graded material", *Materials Letters*, vol. 237, p. 328-331. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.11.127>.
 17. **Carroll, B. E., Otis, R. A., Borgonia, J. P., Suh, J., Dillon, R. P., Shapiro, A. A., Hofmann, D. C., Liu, Z-K., Beese, A. M.** 2016. "Functionally graded material of 304L stainless steel and inconel 625 fabricated by directed energy deposition: Characterization and thermodynamic modeling", *Acta Materialia*, vol. 108, p. 46-54. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.02.019>.
 18. **Shishkovsky, I., Missemmer, F., Smurov, I.** 2012. "Direct metal deposition of functionally graded structures in Ti-Al system", *Physics Procedia*, vol. 39, p. 382-391. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.10.052>.
 19. **Reichardt, A., Shapiro, A. A., Otis, R., Dillon, R. P., Borgonia, J. P., McEnerney, B. W., Hosemann, P., Beese, A. M.** 2020. "Advances in additive manufacturing of metal-based functionally graded materials", *International Materials Reviews*. <https://doi.org/10.1080/09506608.2019.1709354>.
 20. **Mahmoud, D., Elbestawi, M. A.** 2017. "Lattice structures and functionally graded materials applications in additive manufacturing of orthopedic implants: a review", *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 1, no. 2, p. 13. <https://doi.org/10.3390/jmmp1020013>.



21. **Surmeneva, M. A., Surmenev, R. A., Chudinova, E. A., Koptioug, A., Tkachev, M. S., Gorodzha, S. N., Rännar, L-E.** 2017. "Fabrication of multiple-layered gradient cellular metal scaffold via electron beam melting for segmental bone reconstruction", *Materials & Design*, vol. 133, p. 195-204. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.07.059>.
22. **Zhang, C., Chen, F., Huang, Z., Jia, M., Chen, G., Ye, Y., Lin, Y., Liu, W., Chen, B., Shen, Q., Zhang, L., Lavernia, E. J.** 2019. "Additive manufacturing of functionally graded materials: A review", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 764, p. 138209. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138209>.
23. **Fousová, M., Vojtěch, D., Kubásek, J., Jablonská, E., Fojt, J.** 2017. "Promising characteristics of gradient porosity Ti-6Al-4V alloy prepared by SLM process", *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 69, p. 368-376. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2017.01.043>.
24. **Mahbod, M., Asgari, M.** 2019. "Elastic and plastic characterization of a new developed additively manufactured functionally graded porous lattice structure: Analytical and numerical models", *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 155, p. 248-266. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.02.041>.
25. **Sudarmadji, N., Tan, J. Y., Leong, K. F., Chua, C. K., Loh, Y. T.** 2011. "Investigation of the mechanical properties and porosity relationships in selective laser-sintered polyhedrals for functionally graded scaffolds", *Acta Biomaterialia*, vol. 7, no. 2, p. 530-537. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2010.09.024>.
26. **Hazlehurst, K. B., Wang, C. J., Stanford, M.** 2014. "An investigation into the flexural characteristics of functionally graded cobalt-chrome femoral stems manufactured using selective-laser melting", *Materials and Design*, vol. 60, p. 177-183. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.03.068>.
27. **Trainia, T., Mangano, C., Sammons, R. L., Mangano, F., Macchib, A., Piattelli, A.** 2008. "Direct laser-metal sintering as a new approach to fabrication of an isoelastic functionally graded material for the manufacture of porous titanium dental implants", *Dental Materials*, vol. 24, no. 11, p. 1525-1533. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2008.03.029>.
28. **Hou, W., Yang, X., Zhang, W., Xia, Y.** 2018. "Design of energy-dissipating structure with functionally graded auxetic cellular material", *International Journal of Crashworthiness*, vol. 23, no. 4, p. 366-376. <https://doi.org/10.1080/13588265.2017.1328764>.
29. **Xiao, L., Song, W.** 2018. "Additively-manufactured functionally graded Ti-6Al-4V lattice structures with high strength under static and dynamic loading: Experiments", *International Journal of Impact Engineering*, vol. 111, p. 255-272. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.09.018>.
30. **Choy, S. Y., Sun, C.-N., Leong, K. F., Wei, J.** 2017. "Compressive properties of functionally graded lattice structures manufactured by selective laser melting", *Materials & Design*, vol. 131, p. 112-120. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.06.006>.
31. **Maskery, I., Aboulkhair, N., Aremu, A., Tuck, C., Ashcroft, I., Wildman, R. D., Hague, R. J. M.** 2016. "A mechanical property evaluation of graded density Al-Si10-Mg lattice structures manufactured by selective laser melting", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 670, p. 264-274. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.06.013>.



32. **Al-Saedi, D. S. J., Masood, S. H., Faizan-Ur-Rab, M., Alomarah, A., Ponnusamy, P.** 2018. "Mechanical properties and energy absorption capability of functionally graded F2BCC lattice fabricated by SLM", *Materials & Design*, vol. 144, p. 32-44. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.01.059>.
33. **Limmahakhun, S., Oloyede, A., Sitthiseripratip, K., Xiao, Y., Yan, C.** 2017. "Stiffness and strength tailoring of cobalt chromium graded cellular structures for stress-shielding reduction", *Materials & Design*, vol. 114, p. 633-641. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.11.090>.
34. **Zhang, X.-Y., Fang, G., Leeflang, S., Zadpoor, A. A., Zhou, J.** 2018. "Topological design, permeability and mechanical behavior of additively manufactured functionally graded porous metallic biomaterials", *Acta Biomaterialia*, vol. 84, p. 437-452. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2018.12.013>.
35. **Onal, E., Frith, J. E., Jurg, M., Wu, X., Molotnikov, A.** 2018. "Mechanical properties and in vitro behavior of additively manufactured and functionally graded Ti6Al4V porous scaffolds", *Metals*, vol. 8, p. 200. <https://doi.org/10.3390/met8040200>.
36. **Zhao, S., Li, S., Wang, S., Hou, W., Li, Y., Zhang, L., Hao, Y., Yang, R., Misra, R. D. K., Murr, L. E.** 2018. "Compressive and fatigue behavior of functionally graded Ti-6Al-4V meshes fabricated by electron beam melting", *Acta Materialia*, vol. 150, p. 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.02.060>.
37. **Maskery, I., Hussey, A., Panesar, A., Aremu, A., Tuck, C., Ashcroft, I., Hague, R.** 2016. "An investigation into reinforced and functionally graded lattice structures", *Journal of Cellular Plastics*, vol. 53, no. 2, p. 151-165. <https://doi.org/10.1177/0021955X16639035>.
38. **Han, C., Li, Y., Wang, Q., Wen, S., Wei, Q., Yan, C., Hao, L., Liu, J., Shi, Y.** 2018. "Continuous functionally graded porous titanium scaffolds manufactured by selective laser melting for bone implants", *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 80, p. 119-127. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2018.01.013>.
39. **Beal, V. E., Erasenthiran, P., Hopkinson, N., Dickens, P., Ahrens, C. H.** 2006. "The effect of scanning strategy on laser fusion of functionally graded H13/Cu materials", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 30, no. 9-10, p. 844-852. <https://doi.org/10.1007/s00170-005-0130-x>.
40. **Parthasarathy, J., Starly, B., Raman, S.** 2011. "A design for the additive manufacture of functionally graded porous structures with tailored mechanical properties for biomedical applications", *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 13, no. 2, p. 160-170. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2011.01.004>.
41. **Liu, F., Mao, Z., Zhang, P., Zhang, D. Z., Jiang, J., Ma, Z.** 2018. "Functionally graded porous scaffolds in multiple patterns: New design method, physical and mechanical properties", *Materials & Design*, vol. 160, p. 849-860. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.09.053>.
42. **Zhang, M., Yang, Y., Wang, D., Xiao, Z., Song, C., Weng, C.** 2018. "Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V gradient structures manufactured by selective laser melting", *Materials Science and Engineering A*, vol. 736, p. 288- 297. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.08.084>.



43. **Wei, C., Sun, Z., Chen, Q., Liu, Z., Li, L.** 2019. "Additive manufacturing of horizontal and 3d functionally graded 316L/Cu10Sn components via multiple material selective laser melting", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 141, no. 8, p. 081014. <https://doi.org/10.1115/1.4043983>.
44. **Bendsøe, M. P.** 1989. "Optimal shape design as a material distribution problem", *Structural Optimization*, vol. 1, p. 193-202. <https://doi.org/10.1007/BF01650949>.
45. **Tang, Y., Kurtz, A., Zhao, F. Y.** 2015. "Bidirectional Evolutionary Structural Optimization (BESO) based design method for lattice structure to be fabricated by additive manufacturing", *Computer-Aided Design*, vol. 69, p. 91-101. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.06.001>.
46. **Liu, J., Yu, H., To, A. C.** 2018. "Porous structure design through Blinn transformation-based level set method", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 57, p. 849-864. <https://doi.org/10.1007/s00158-017-1786-1>.
47. **Paulino, G. H., Silva, E. C. N.** 2005. "Design of functionally graded structures using topology optimization", *Materials Science Forum*, vol. 492-493, p. 435-440. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.492-493.435>.
48. **Zhang, P., Toman, J., Yu, Y., Biyikli, E., Kirca, M., Chmielus, M., To, A. C.** 2014. "Efficient design-optimization of variable-density hexagonal cellular structure by additive manufacturing: theory and validation", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 137, no. 2, p. 021004. <https://doi.org/10.1115/1.4028724>.
49. **Daynes, S., Feih, S., Lu, W. F., Wei, J.** 2017. "Optimisation of functionally graded lattice structures using isostatic lines", *Materials & Design*, vol. 127, p. 215-223. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.04.082>.
50. **Cheng, L., Zhang, P., Biyikli, E., Jiayi, B., Robbins, J., Albert, T.** 2017. "Efficient design optimization of variable-density cellular structures for additive manufacturing: Theory and experimental validation", *Rapid Prototyping Journal*, vol. 23, no. 4, p. 660-677. <https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2016-0069>.
51. **Jin, X., Li, G.-X., Zhang, M.** 2017. "Design and optimization of nonuniform cellular structures", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 232, no. 7, p. 1280-1293. <https://doi.org/10.1177/0954406217704677>.
52. **Liu, C., Du, Z., Zhang, W., Zhu, Y., Guo, X.** 2017. "Additive manufacturing-oriented design of graded lattice structures through explicit topology optimization", *Journal of Applied Mechanics*, vol. 84, no. 8, p. 081008. <https://doi.org/10.1115/1.4036941>.
53. **Panesar, A., Abdi, M., Hickman, D., Ashcroft, I.** 2018. "Strategies for functionally graded lattice structures derived using topology optimisation for Additive Manufacturing", *Additive Manufacturing*, vol. 19, p. 81-94. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.11.008>.
54. **Li, D., Dai, N., Tang, Y., Dong, G., Zhao, Y. F.** 2019. "Design and optimization of graded cellular structures with triply periodic level surface-based topological shapes", *Journal of Mechanical Design*, vol. 141, no. 7, p. 071402. <https://doi.org/10.1115/1.4042617>.



55. **Yi, B., Zhou, Y., Yoon, G. H., Saitou, K.** 2019. "Topology optimization of functionally-graded lattice structures with buckling constraints", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 354, p. 593-619. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2019.05.055>.
56. **Cheng, L., Bai, J., To, A. C.** 2019. "Functionally graded lattice structure topology optimization for the design of additive manufactured components with stress constraints", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 344, p. 334-359. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2018.10.010>.
57. **Goel, A., Anand, S.** 2019. "Design of functionally graded lattice structures using B-splines for additive manufacturing", *Procedia Manufacturing*, vol. 34, p. 655-665. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.193>.
58. **Li, D., Liao, W., Dai, N., Dong, G., Tang, Y., Xie, Y. M.** 2018. "Optimal design and modeling of gyroid-based functionally graded cellular structures for additive manufacturing", *Computer-Aided Design*, vol. 104, p. 87-99. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2018.06.003>.
59. **Bhavar, V., Kattire, P., Thakare, S., Patil, S., Singh, R. K. P.** 2017. "A review on functionally gradient materials (FGSs) and their applications, 2nd International Conference on Advanced Materials Research and Manufacturing Technologies (AMRMT 2017), Phuket, Thailand.
60. **Dumas, M., Terriault, P., Brailovski, V.** 2017. "Modelling and characterization of a porosity graded lattice structure for additively manufactured biomaterials", *Materials & Design*, vol. 121, p. 383-392. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.02.021>.

Çatı Tipi Paket Klima Cihazı için Kondenser Tarafında Evaporatif Soğutma Uygulaması

Nisa Özçakır^{*1}, Hüseyin Günerhan²

ÖZ

Bu çalışmada klasik çatı tipi klimalar ile kondenser tarafı evaporatif soğutmalı çatı tipi klimaların performansları ve enerji verimlilikleri karşılaştırılmıştır. Evaporatif soğutma yüksek verimli direkt buharlaşmalı soğutma pedi ile sağlanmıştır. Enerji verimliliğini arttırmak hedeflenmiştir. Çalışma, 50 kW'lık soğutma kapasiteli bir klima cihazının EUROVENT ve tropik bölgede çalışması durumunda pedli ve pedsiz olması göz önüne alınıp karşılaştırılarak gerçekleştirilmiştir.

Ped kullanılması durumunda, kondensere gelen soğutma havasının sıcaklığı düşmüş, kompresör küçülmüş ve aynı soğutma kapasitesi elde edilmiştir. COP, EER değerlerinde yaklaşık %30 artış sağlanmıştır. Tropik bölge için seçilen cihazda ise COP, EER değerindeki artış çok daha büyük orandadır (%50).

Çalışma sonucunda ped kullanılması ile kompresör, kondenserlerde küçülme ve enerji verimli çatı tipi klima cihazlarının yapılabileceği ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Çatı tipi paket klima cihazı, direkt buharlaşmalı soğutma pedi, evaporatif soğutma

Investigation of “Evaporative Pad” Application on the Condenser Side of Rooftop Type Air Conditioner Devices

ABSTRACT

In this study, performance, energy efficiencies of widely used conventional roof type packaged air conditioners and condenser side evaporative cooling roof type packaged air conditioners are compared. Evaporative cooling is provided by high efficient direct evaporative cooling pad. The main purpose of this application is to increase energy efficiency. The study was carried out for 50 kW cooling capacity unit considering working conditions of EUROVENT and tropical region.

Pad usage, the same cooling capacity is achieved while the condenser air inlet temperature decreased and the compressor size reduced. COP, EER values increased by approximately 30%. In tropic region, the increment in COP, EER is much larger (50%).

As a result, it is revealed that compressors and condensers can be downsized and energy efficient roof type air conditioners can be built by using pads.

Keywords: Roof type package air conditioner, direct evaporative cooling pad, evaporative cooling

* İletişim Yazarı

Geliş/Received : 22.08.2020

Kabul/Accepted : 15.10.2020

¹ Doğu İklimlendirme, İTOB Org. Sanayi Bölgesi, Menderes-İzmir
nisa.ozcakir@doguiklimlendirme.com, ORCID: 0000-0002-1519-7956

² Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, Bornova-İzmir
huseyin.gunerhan@ege.edu.tr, ORCID: 0000-0003-4256-2418

EXTENDED ABSTRACT

Rooftop package air handling units are devices that contain evaporator (evaporator) and condenser (condenser) coils, which are among the most important components of the refrigeration cycle, in a single body, and can only operate as cooling or reversible. Since these devices have all the features of heating-cooling and ventilation, they play a big role in the air conditioning of large spaces.

In roof type package air handling units, the part called the indoor unit is the evaporator coil, and the part called the outdoor unit is the condenser coil. These package assemblies, which have classical cooling cycle components, are designed with the principle of maximum energy saving with the developing technology.

Air conditioning is quite difficult in tropical climates with high temperature and humidity. Condenser capacities and energy consumption are relatively large when using rooftop packaged air conditioners, which are generally preferred for large-volume air conditioning under tropical conditions. Different applications have been considered so far to reduce the amount of energy they consume and the space they occupy. The application of an evaporative cooling pad on the condenser side of the rooftop package air conditioners, which is one of these, can be an alternative in terms of performance for operating in tropical climates.

In this study, performance, costs and energy efficiencies of widely used conventional roof type packaged air conditioners and condenser side evaporative cooling roof type packaged air conditioners are compared. Evaporative cooling is provided by high efficient direct evaporative cooling pad. The main purpose of this application is to increase energy efficiency. The study was carried out for 50 kW cooling capacity unit for EUROVENT and tropical region by taking into consideration the comparison of pads and without pads.

High efficiency evaporative pad provides enough water-air contact area to support water evaporation. Thanks to the evaporation process, the Temperature of the air before it reaches the condenser is greatly reduced. This allows the condenser to work more efficiently with less energy. The results are promising and feasible, especially for devices that will operate in high temperature climatic conditions such as the Middle East. 46.1 °C, 28.5% relative humidity, which is Kuwait's summer temperature requirement, was accepted as the design parameter. Although the study is considered for tropical climatic conditions, it has been detailed to see the results under Eurovent conditions. Therefore, the results for pad application can be compared for both Eurovent and tropical regions. In the case of pad application in tropical climate conditions, if the difference between the condenser inlet temperature and the condensation temperature is kept constant, a higher COP value is obtained and if this difference is not kept constant, a smaller condenser is obtained.

In case of pad usage, the temperature of the cooling air coming to the condenser is decreased, the compressor is reduced and the same cooling capacity is achieved. In this case the condensation temperature is also decreased. COP and EER values increased by approximately 30%. For the tropic region, the increment in COP and EER is much larger (around 50%).

In the study, conventional unit's (without pad) compressor and condensation temperature were selected for unit with evaporative cooling (with pad) and the results were compared as well. In this case, the same cooling capacity was reached with a smaller condenser. The COP and EER values are the same as the system without pad.

As a result, it is revealed that downsizing in compressors and condensers and energy efficient roof type air conditioners can be built by using pads. In addition, the use of pads in tropical regions is much more meaningful. In this study, it has been shown that more efficient device can be achieved by selecting small compressor and smaller size device can be obtained by choosing smaller condenser through the evaporative cooling.

Previous studies were designed separately for evaporative pad and roof type air conditioners, and later on the harmonious operation of these two systems. However, this study is the first example of the compact application of the rooftop package air handling unit in a single body with the evaporative pad application. In this way, since the two systems are designed in harmony with each other from the very beginning, the most efficient system possible has been made compact so that no operation is required in the field with the logic of plug and play. This study is a first in nature and in the world at the same time as Turkey prepared TÜBİTAK project and the application is made.



1. GİRİŞ

Yüksek sıcaklık ve nem oranına sahip tropik iklim koşullarında iklimlendirme oldukça zordur. Tropik şartlar altında genellikle büyük hacimli iklimlendirme için tercih edilen çatı tipi paket klimalar kullanıldığında, kondenser kapasiteleri ve enerji tüketimi nispeten büyüktür. Tükettiği enerji miktarını ve işgal ettikleri alanı azaltmak için şimdiye kadar farklı uygulamalar düşünülmüştür. Bunlardan biri olan çatı tipi paket klima cihazlarının kondenser tarafına evaporatif soğutma pedi uygulaması, tropik iklim koşullarında çalışması için performans açısından bir alternatif olabilir.

Yüksek verimli evaporatif ped, suyun buharlaşmasını desteklemek için yeterli su-hava temas alanı sağlar. Buharlaşma işlemi sayesinde, kondensere ulaşmadan önce havanın sıcaklığı büyük ölçüde azalır. Bu, kondenserin daha az enerji ile daha verimli çalışmasını sağlar. Özellikle Orta Doğu gibi yüksek sıcaklıktaki iklim koşullarında çalışacak cihazlar için uygundur.

Yüksek sıcaklığa sahip Kuveyt'in yaz sıcaklık şartı olan $46,1 \text{ }^\circ\text{C}$, %28,5 bağıl nem tasarım parametresi olarak kabul edilmiştir. Her ne kadar çalışma tropikal iklim koşulları için düşünülse de, Eurovent koşullarındaki sonuçları da görmek için çalışma detaylandırılmıştır. Bu nedenle ped uygulaması ile ilgili sonuçlar hem Eurovent hem de tropikal bölgeler için karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

Tropikal iklim koşullarında ped uygulaması durumunda, kondenser giriş sıcaklığı ile kondenzasyon sıcaklığı arasındaki fark sabit tutulursa, daha yüksek bir COP değeri elde edilir ve bu fark sabit tutulmaz ise daha küçük bir kondenser elde edilir.

2. GENEL BİLGİLER

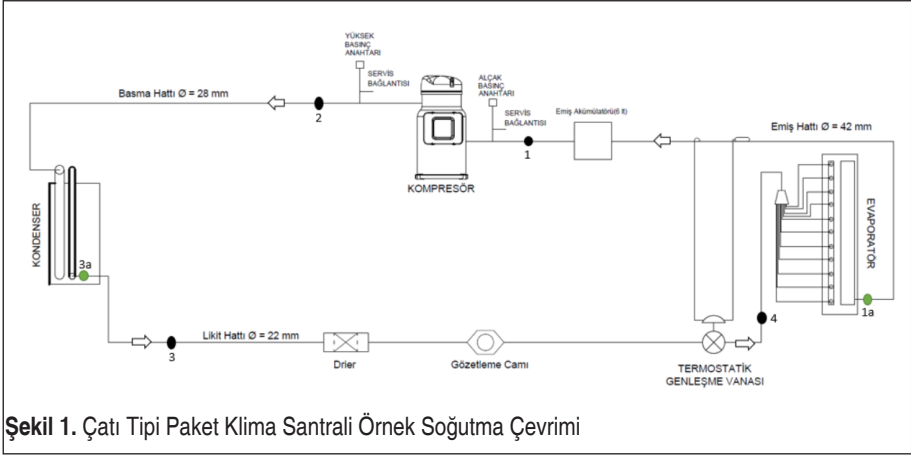
2.1 Çatı Tipi Paket Klima Santrali

Çatı tipi paket klima santralleri soğutma çevriminin en önemli bileşenlerden olan evaporatör (buharlaştırıcı) ve kondenser (yoğuşturucu) bataryalarının tek bir gövdede bulunduğu sadece soğutma veya tersinir olarak çalışabilen düzeneklerdir. Bu düzenekler ısıtma-soğutma ve havalandırma özelliklerinin hepsine sahip olduğundan büyük mahallerin iklimlendirilmesinde büyük bir rol oynamaktadır.

Çatı tipi paket klima santrallerinde iç ünite olarak adlandırılan kısım evaporatör bataryası, dış ünite olarak adlandırılan kısım ise kondenser bataryasıdır. Klasik soğutma çevrimi bileşenlerine sahip olan bu paket düzenekler gelişen teknoloji ile birlikte maksimum enerji tasarrufu ilkesi ile tasarlanmaktadır.

Klasik soğutma çevrimi ile çatı tipi paket klima santralinin çalışma prensibi Şekil 1 ile verilmiştir.

Şekil 1'de sadece soğutma amaçlı çalışan bir çatı tipi klima düzeneğinin soğutma çev-



Şekil 1. Çatı Tipi Paket Klima Santrali Örnek Soğutma Çevrimi

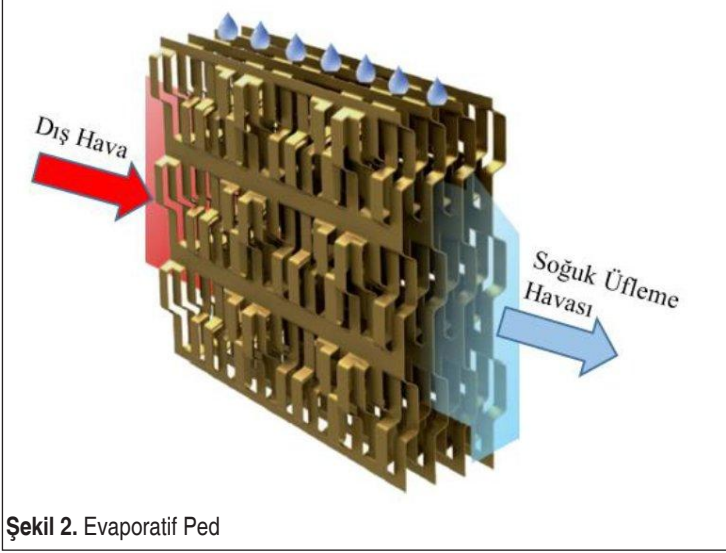
riminin şematik gösterimi verilmiştir. Burada kompresör yardımı ile yüksek basınç hattına gönderilen soğutucu akışkan kondenser yardımı ile yoğunlaştırılır. Daha sonra sıvı halde likit hattına gönderilir. Likit hattında bulunan termostatik genleşme vanası yardımı ile sıvı haldeki gaz entalpisi sabit kalacak şekilde buharlaştırıcı basıncına kadar düşürülür. Basıncı düşürülen soğutucu akışkan evaporatör bataryasında buharlaştırılır. Bu esnada evaporatör üzerinden geçen hava soğutulmuş ve mahale istenen şartlandırılmış soğuk hava basılmaktadır. Evaporatörde buharlaştırılan soğutucu akışkan alçak basınç hattından geçer, soğutma çevrimini tamamlar ve kompresöre geri döner. Böylece soğutma çevrimi tamamlanmakta ve taze hava istenilen seviyeye kadar soğutulmakta, bir fan yardımı ile de şartlandırılan hava mahale basılmaktadır. Dış ünite tarafında yani kondenserde ise; kondenser ısısını atabilmek amacı ile yine bir fan yardımı ile bataryanın üzerinden taze hava sirkülasyonu yapılmaktadır. Çevrim ısının alınması ve geri kazanılması halinde sürekli devam etmektedir [1-2].

2.2 Evaporatif Soğutma ve Ped

Evaporatif soğutma, hava ile temas eden su zerreciklerinin havadan çektiği ısıyı kullanarak buharlaşması sonucu hava sıcaklığında düşüş sağlanması prensibine dayanmaktadır. Bu yöntem genellikle ilk bilinen soğutma yöntemlerinden olmasına rağmen tercih edilen bir yöntem değildir. Son yıllara enerji verimliliğine verilen önem arttığı için bu yönetime başvurulmaktadır.

Evaporatif ped üzerine pompa yardımı ile püskürtülen su sayesinde hava soğutulur. Evaporatif pedlerin özelliği suyu uzun süre üzerinde tutması ve yüksek hava geçirgenliğine sahip olan özel malzemelerden üretilmeleridir (Şekil 2).

Bu yöntemde hava fan yardımıyla evaporatif ped üzerinden geçerken pompa ile püskürtülen su ped üzerinde buharlaşarak havayı soğutmaktadır [3].



Şekil 2. Evaporatif Ped

Tasarımda kullanılan evaporatif ped korozyon önleyici kaplamalı HydroChill [4] kanatlardan yapılmaktadır. HydroChill kanat teknolojisi özel kanat yapıları sayesinde ince su tutucu kaplaması ile %90'ı aşan buharlaşma verimliliği sağlanırken basınç düşümünü de minimumda tutmaktadır.

Kalıcı antibakteriyel kaplama sayesinde ped kullanım ömrü boyunca %99,99 oranında bakteri oluşumunu engeller [4].

Kullanılan evaporatif pedin özellikleri aşağıda verildiği gibidir:

- Korozyon önleyici kaplamalı alüminyum kanatlar
- Hidrofilik ve hidroskopik su tutucu kapama
- Kalıcı antibakteriyel kaplama
- Tamamen modüler ve kendi kendini destekleyen çerçeve
- Entegre su dağıtım sistemi ve drenaj tavası
- Dikey kanat yapısı sayesinde kendi kendini temizleme özelliği

Evaporatif pedin etkinlik değeri (2.1) numaralı denklem ile hesaplanır:

$$\epsilon_c = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_3} \quad (1)$$

(1) numaralı denklem ile verilen ϵ_c , evaporatif soğutma etkinliğini (%); T_1 , ped giriş havasının kuru termometre sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$); T_2 , ped çıkış havasının kuru termometre

sıcaklığını ($^{\circ}\text{C}$); T_3 ve ped giriş havasının yaş termometre sıcaklığını ($^{\circ}\text{C}$) göstermektedir.

İhtiyaç olan evaporatif soğutma kapasitesi (\dot{Q}) ise, (2) numaralı denklem ile hesaplanmaktadır [5-6].

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p(T_1 - T_2)\epsilon_e \quad (2)$$

(2) numaralı denklem ile verilen $^{\circ}\text{C}$, havanın kütleli debisini (kg/s) ve c_p , havanın özgül ısısını ($\text{J/kg}^{\circ}\text{C}$) göstermektedir.

Bu sistem çatı tipi klima santrali ile birleştirilirse %30 oranında enerji kazancı elde edilmektedir. Ek olarak, psikrometrik diyagramda, birinci bölge olarak adlandırılan çok sıcak ve nemli bölgelerin soğutma problemine en aza indirgenerek çözüm sağlanmış olacaktır. Kondenser giriş havası sıcaklığını büyük ölçüde düşürecek olan evaporatif soğutma uygulaması ile, kompresörün çektiği güç azalacak ve kondenserin ısı transfer alanı küçülecektir. Bu sayede, hem daha küçük bir düzenek hem de daha az elektrik enerjisi ile çalışan sistem çok avantajlı olacaktır.

3. MATERYAL VE METOT

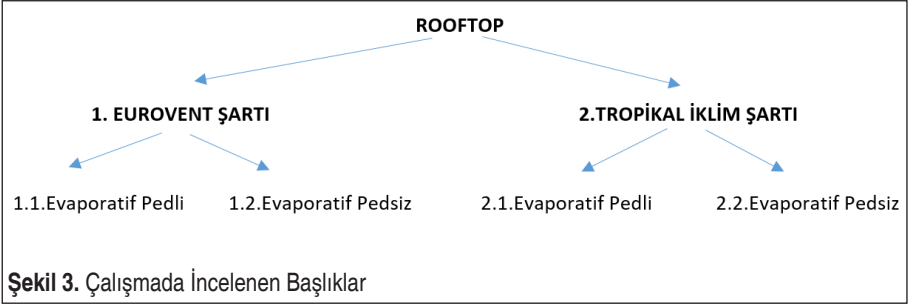
3.1 Düzenegın Ekipman Seçimleri

Evaporatif pedin verimliliği ve enerji tasarrufu üzerine yapılan çalışmada, birçok parametreye göre farklı sonuçlar elde edilmiştir. Tersinir çalışmada ped kullanmak verimli olmadığından, sistem yalnızca soğutma üzere tasarlanmıştır. Sistem tasarımları 50 kW soğutma kapasitesine göre yapılmaktadır. Bu soğutma kapasitesi minimum enerji harcayarak ve ısı transfer alanını olabildiğince azaltıp maliyetler düşürülerek sağlanmaya çalışılmaktadır.

Sistem iki farklı hava koşulunda tasarlanmıştır. İlk olarak EUROVENT standartlarındaki hava koşullarına göre hesaplamalar yapılmış, daha sonra pedin verimliliğini daha net görebilmek için hesaplamalar tropikal iklim koşullarına göre tekrarlanmıştır.

Yüksek sıcaklık ve neme sahip tropik iklim koşullarında soğutma yapmak zordur. Bu nedenle, kullanılan yüksek verimli evaporatif ped sayesinde havanın sıcaklığı büyük ölçüde düşürülmektedir. Bu sayede sistemin daha az enerji ile daha verimli çalışması sağlanmaktadır.

Şekil 3 ile verildiği gibi bu çalışmada çatı tipi paket klima düzenekleri 2 ana başlık altında incelenecektir. Bunlar; Eurovent iklim şartı için tasarlanmış ve tropikal iklim şartı için tasarlanmış rooftop düzenekleridir. Bu ana başlık altında da 2 alt başlıkta konu irdelenmiştir; bunlar da evaporatif ped kullanılarak tasarlanan sistem ve evaporatif ped kullanılmadan tasarlanan sistemlerdir.

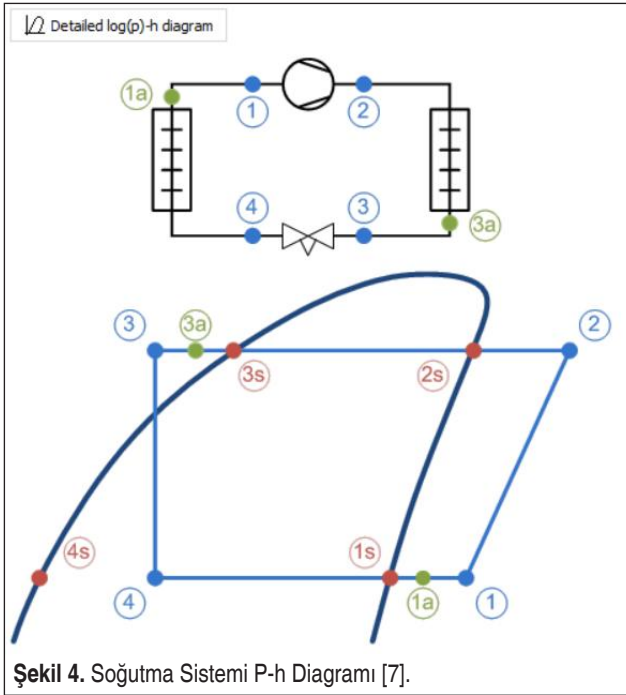


3.1.1 Eurovent İklim Şartında Tasarım

Eurovent standardının çatı tipi paket klimalar için verdiği tasarım koşulu 35°C sıcaklık ve %40 bağıl nem değerleridir [5]. Bu çalışmada ilk başta Eurovent iklim şartı ele alınmakta ve standarda uygun bir düzenek tasarlandığı zaman evaporatif soğutmanın bu sistemin enerji tasarrufuna olan etkisi irdelenmektedir.

3.1.1.1 Evaporatif Ped Uygulaması Olmadan Tasarlanan Sistem

Çatı tipi paket klima cihazını tasarımında ilk olarak EUROVENT şartı olan 35°C , %40 bağıl nemdeki dış hava koşullarına göre; 8°C evaporasyon, 48°C kondenzasyon sıcaklıkları kabul edilmiştir.



Sistemin Soğutma çevrimi için ayrıık devreli 2 kompresör kullanılır. Bunlardan biri sabit hızlı scroll kompresör, diğeri ise hassas kontrol sağlayabilmek için değişken hızlı scroll kompresördür. Bu iki kompresör kullanılarak 48,63 kW evaporatör soğutma kapasitesine ulaşılmasının mümkün olduğu hesaplanmıştır. Kondenser kapasitesi ise 61,58 kW olarak hesaplanmıştır. (Şekil 4, Tablo 1 ve Tablo 2).

Tablo 1. Sabit Hızlı Kompresörün Hesaplanan Şartlardaki Performans Detayı [7]

Evaporatör kütleli debisi: 585,3 kg/h						
Nokta	Açıklama	Sıcaklık [°C]	Basınç [bar]	Yoğunluk [kg/m³]	Entalpi [kJ/kg]	Entropi [kJ/(kg.K)]
1	Kompresör Emiş	13,0	10,20	37,83	428,7	1,813
2	Kompresör Basma	75,6	29,16	97,24	466,4	1,838
2s	Kondenser Çiğ Noktası	48,0	29,16	131,20	423,4	1,709
3s	Kondenser Kaynama Noktası	47,9	29,16	927,60	280,8	1,266
3a	Kondenser Çıkış	44,9	29,16	948,20	274,9	1,248
3	Aşırı Soğutma dahil	44,9	29,16	948,20	274,9	1,248
4	Genleşme Vanası sonrası	7,9	10,20	121,80	274,9	1,267
4s	Evaporatör Kaynama Noktası	7,9	10,20	1138	212,1	1,043
1s	Evaporatör Çiğ Noktası	8,0	10,20	39,25	423,1	1,794
1a	Evaporatör Çıkış	13,0	10,20	37,83	428,7	1,813

Tablo 2. Değişken Hızlı Kompresörün Hesaplanan Şartlardaki Performans Detayı [10]

Evaporatör kütleli debisi: 585,3 kg/h						
Nokta	Açıklama	Sıcaklık [°C]	Basınç [bar]	Yoğunluk [kg/m³]	Entalpi [kJ/kg]	Entropi [kJ/(kg.K)]
1	Kompresör Emiş	13,0	10,20	37,83	428,7	1,813
2	Kompresör Basma	79,4	29,16	94,64	471,3	1,852
2s	Kondenser Çiğ Noktası	48,0	29,16	131,20	423,4	1,709
3s	Kondenser Kaynama Noktası	47,9	29,16	927,60	280,8	1,266
3a	Kondenser Çıkış	44,9	29,16	948,20	274,9	1,248
3	Aşırı Soğutma dahil	44,9	29,16	948,20	274,9	1,248
4	Genleşme Vanası sonrası	7,9	10,20	121,80	274,9	1,267
4s	Evaporatör Kaynama Noktası	7,9	10,20	1138,00	212,1	1,043
1s	Evaporatör Çiğ Noktası	8,0	10,20	39,25	423,1	1,794
1a	Evaporatör Çıkış	13,0	10,20	37,83	428,7	1,813



Tablo 1 ve 2’de sunulan kondenser ve evaporatör giriş ve çıkış özellikleri kullanılarak kondenser ve evaporatör kapasiteleri belirlenmiştir.

Yukarıda verilen seçimler yapıldıktan sonra; kondenser basınç kaybı ve bu basınç kaybına ek %20 kirlilik faktörü hesaplanarak 55,2 Pa toplam statik basınç elde edilmiştir. Hesaplanan kapasiteleri elde etmek için gerekli olan hava debisine göre tasarım yapıldığında ise, 15.000 m³/h debide 55,2 Pa toplam statik basınçta radyal AC fan seçimi yapılabilir.

Bir sonraki adım ise iç ünite fanını belirlemektir. Evaporatör soğutma kapasitesi hesaplandıktan sonra 2,5 m/s hava hızında evaporatör seçimi yapılmıştır. Hesaplanan evaporatör soğutma kapasitesini elde etmek için gerekli debi belirlenmiş ve evaporatör bataryasını korumak için evaporatör debisine göre kaba filtre seçilmiştir. Evaporatör bataryasının basınç kaybı 115 Pa, bataryayı korumak için kullanılan kaba filtre basınç kaybı 80 Pa ve cihaz dışı basınç olarak kabul edilen 300 Pa, fan seçimi için gerekli toplam statik basıncı verecektir. Böylece 495 Pa toplam statik basınçta ve 8500 m³/h hava debisinde radyal EC fan seçimi yapılmıştır.

Tüm bu seçimler sonucunda daha önce üretilmiş cihaz ölçüleri de baz alınarak tasarlanan düzeneğin katı modellemesi ile klima düzeneğinin uzunluğu 2.400 mm, yüksekliği 1.066 mm, genişliği ise 1.785 mm olarak tespit edilmiştir (Şekil 5).

3.1.1.2 Evaporatif Pedsiz Çatı Tipi Paket Klima Düzeneği

Bir önceki alt başlıkta incelenen Eurovent standardı sıcaklık şartları tekrar ele alınarak, evaporatif soğutmanın sağlayacağı enerji tasarrufundan yararlanma yolu ele



Şekil 5. Evaporatif Pedsiz Çatı Tipi Paket Klima Düzeneği

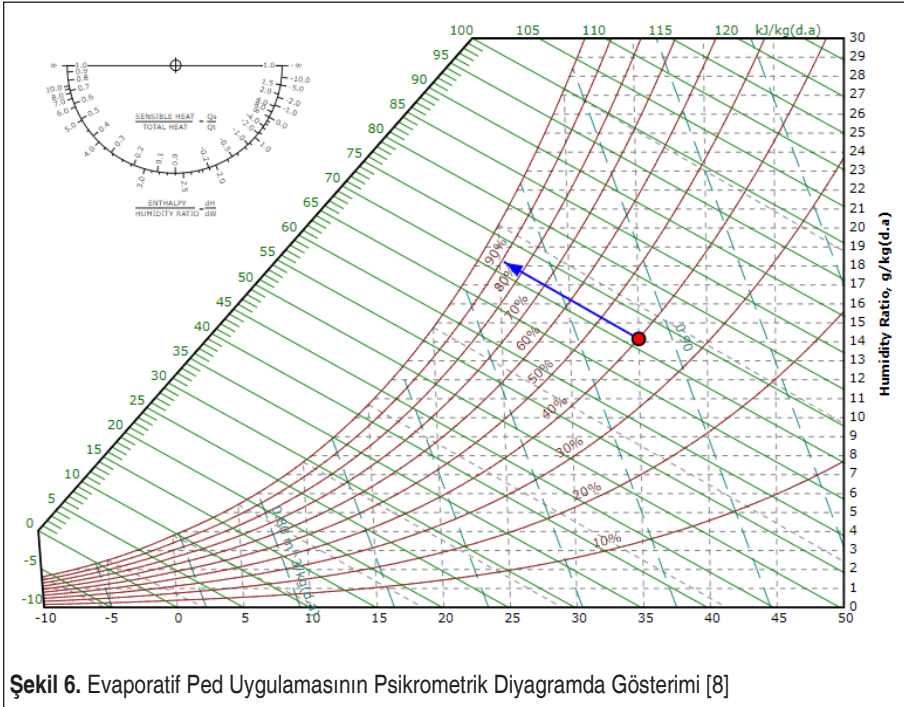
alınmıştır. Bu çalışmada özel malzemeden üretilmiş yüksek verimli evaporatif ped kullanılmıştır.

Kullanılan evaporatif ped sayesinde 35 °C sıcaklık, %40 bağıl nemde olan dış ortam havası 25,3 °C sıcaklık değerine kadar düşürülmektedir. Bununla birlikte ped soğutma işlemini yaparken suyun buharlaşmasından kaynaklı olarak havanın bağıl nemi de artmaktadır.

Böylece kondenser giriş sıcaklığı evaporatif ped sayesinde 25,3 °C değerine ve %89 bağıl nem değerine ulaşmaktadır. Evaporatif ped seçimi yapılırken hava debisi kondenserin kapasitesini de sağlayacak şekilde seçilmektedir. Hava debisi belirlendikten sonra ped üzerindeki hava hızı 2,5 m/s olacak şekilde standart ped ölçülerinden biri seçilir. 2,5 m/s değerinin üzerindeki hava hızlarında ped üzerine püskürtülen suyun yüksek hava hızı nedeniyle sürüklenip düzeneğin içinde su birikmesine neden olur.

Tüm bu kriterler ile birlikte; 2,5 m/s hava hızında 18.000 m³/h hava debisinde evaporatif ped seçimi yapılmaktadır (Şekil 6 ve Tablo 3).

Tablo 3 ile verildiği gibi kondenser giriş sıcaklığını düşürmek için kullanılan evaporatif pedde 85 L/s debide su tüketimi olmaktadır. Ayrıca bu su sirkülasyonunu gerçekleştirmek için de 40 W gücünde bir pompa kullanılmaktadır. Ayrıca evapo-





Tablo 3. Evaporatif Ped Teknik Özellikleri [8]

Uygulama: Kondenser Ön Soğutucu			
Konum		Sonuçlar	
Yer	N/A	Besleme Hava Sıcaklığı [°C]	25,3
Ortam Basıncı[hPa]	1013	Besleme Hava Bağıl Nemi [%]	89
		Ped Verimi [%]	86
Hava Şartı		Basınç Kaybı [Pa]	64
Kuru Termometre Sıcaklığı [°C]	35	Çekilen Güç [W]	644
Yaş Termometre Sıcaklığı [°C]	23,8	Harcanan Su Miktarı [L/h]	85
Çiğ Noktası Sıcaklığı [°C]	19,4	Kompresör Verim Artışı [%]	39,7
Bağıl Nem [%]	39,9	Kondenser Çalışma Maliyetini İndirgeme[%]	28
Mutlak Nem [g/kg]	14,1		
Özellikler			
Ped Yüzey Alanı [m ²]	2.000		
Hava Hızı [m/s]	2,5		
Besleme Hava Debisi [m ³ /h]	18.000		

ratif ped için dış ünite (kondenser tarafı) fan seçimi hesaplamalarında göz önünde bulundurulacak 64 Pa gibi bir hava tarafı basınç kaybı oluşumu hesaplamaya alınmalıdır.

Kondenser giriş sıcaklığına göre yapılan soğutma tasarımında 8 °C evaporasyon 38 °C kondenzasyon sıcaklığı kabul edilmiştir ve 2 adet kompresörlü, ayrı 2 devreli sistem tasarlanmıştır. Ayrı devre olarak seçilen kompresörlerden bir adedi sabit hızlı scroll kompresör, diğeri ise hassas soğutma kontrolü için değişken hızlı scroll kompresördür.

Sistemin toplam soğutma kapasitesi 49,35 kW ve ısıtma kapasitesi ise 59,21 kW değerindedir (Tablo 4 ve Tablo 5).

12.000 m³/h hava debisinde, evaporatif ped basınç kaybı ve kirlilik faktörü hesaplanarak radyal AC kondenser fanı seçimi yapılır. Daha sonra iç ünite fanı 8.500 m³/h hava

Tablo 4. Sabit Hızlı Kompresörün Hesaplanan Şartlardaki Performans Detayı [7]

Evaporatör kütleli debisi: 522,6 kg/h						
Nokta	Açıklama	Sıcaklık [°C]	Basınç [bar]	Yoğunluk [kg/m ³]	Entalpi [kJ/kg]	Entropi [kJ/(kg.K)]
1	Kompresör Emiş	13,0	10,20	37,83	428,7	1,813
2	Kompresör Basma	62,5	22,96	76,90	460,1	1,840
2s	Kondenser Çiğ Noktası	38,0	22,96	96,48	425,8	1,734
3s	Kondenser Kaynama Noktası	37,9	22,96	991,60	261,9	1,207
3a	Kondenser Çıkış	34,9	22,96	1009,00	256,5	1,190
3	Aşırı Soğutma dahil	34,9	22,96	1009,00	256,5	1,190
4	Genleşme Vanası sonrası	7,9	10,20	165,10	256,5	1,201
4s	Evaporatör Kaynama Noktası	7,9	10,20	1138,00	212,1	1,043
1s	Evaporatör Çiğ Noktası	8,0	10,20	39,25	423,1	1,794
1a	Evaporatör Çıkış	13,0	10,20	37,83	428,7	1,813

Tablo 5. Değişken Hızlı Scroll Kompresörün Hesaplanan Şartlardaki Performans Detayı [10]

Evaporatör kütleli debisi: 522,6 kg/h						
Nokta	Açıklama	Sıcaklık [°C]	Basınç [bar]	Yoğunluk [kg/m ³]	Entalpi [kJ/kg]	Entropi [kJ/(kg.K)]
1	Kompresör Emiş	13,0	10,20	37,83	428,7	1,813
2	Kompresör Basma	64,1	22,96	76,09	462,0	1,846
2s	Kondenser Çiğ Noktası	38,0	22,96	96,48	425,8	1,734
3s	Kondenser Kaynama Noktası	37,9	22,96	991,60	261,9	1,207
3a	Kondenser Çıkış	34,9	22,96	1009,00	256,5	1,190
3	Aşırı Soğutma dahil	34,9	22,96	1009,00	256,5	1,190
4	Genleşme Vanası sonrası	7,9	10,20	165,10	256,5	1,201
4s	Evaporatör Kaynama Noktası	7,9	10,20	1138,00	212,1	1,043
1s	Evaporatör Çiğ Noktası	8,0	10,20	39,25	423,1	1,794
1a	Evaporatör Çıkış	13,0	10,20	37,83	428,7	1,813



Şekil 7. Kondenser Tarafı Evaporatif Pedli Çatı Tipi Paket Klima Santrali

debisinde radyal EC fan olarak seçilir. Evaporatif pedli bu sistem için yapılan tüm seçimler sonucunda cihazın ölçüleri aşağıda verildiği gibi belirlenmiştir:

Tüm bu ekipman seçimleri sonucunda katı modellemesi yapılan evaporatif pedli çatı tipi paket klima düzeneğinin uzunluğu 2.210 mm, yüksekliği 965 mm, genişliği ise 1.595 mm olmaktadır (Şekil 7).

Eurovent standardında geçen dış ortam sıcaklığına göre yapılan evaporatif pedli ve evaporatif pedsiz düzeneğe tasarımına göre; kullanılan yüksek verimli ped sayesinde aynı soğutma kapasitesi daha az ısı transfer alanı kullanarak elde edilmiştir. Yani daha küçük kondenser kullanılarak %25,43'lük bir oranda daha küçük hacimde düzeneğe tasarlanmıştır. Bu sayede düzeneğin maliyetinde azalma sağlanmaktadır. Isı transfer alanında azalma görülen 2 durumunu karşılaştırırken kondenser giriş sıcaklığı ile kondenzasyon sıcaklığı arasındaki fark (ΔT) hep sabit tutulmaktadır. Evaporatif ped kullanımı sayesinde bu koşulda kompresörün çektiği güçte bir miktar düşüş olacak ve COP/EER değerlerinde az da olsa artış görülecektir.

Buna ek olarak çalışmada kondenser giriş sıcaklığı ile kondenzasyon sıcaklığı arasındaki farkı (ΔT) sabit tutularak başka bir soğutma tasarımı yapılmıştır ($\Delta T= 13^\circ C$). Evaporatif ped kullanılan sistemde bu sefer ısı transfer alanında bir değişim olmakla birlikte güç tüketimi daha az olan kompresörler ile aynı soğutma kapasitesi elde edilmektedir. Böylece sistemin enerji tasarruflu çalışmasını sağlamak ve COP değeri %21,6, EER değerleri ise %25,8 oranında artmaktadır.

3.1.2 Tropikal İklim Şartında Tasarım

Tropikal iklimdeki soğutmalı cihazlar, yüksek sıcaklık ve nem nedeniyle uygulanması en zor soğutma sistemidir. Soğutma sistemleri bu dış ortam sıcaklık şartında çok fazla enerji kaybına neden olmaktadır. Hesaplamalar sonucunda, bu bölgelerde evaporatif ped uygulandığında enerji verimliliğindeki artış görülebilecektir.

3.1.2.1 Evaporatif Ped Uygulaması Olmadan Tasarlanan Sistem

Tropikal iklim şartında için yapılacak olan çalışmada Kuveyt şehri sıcaklık koşulları baz alınmıştır. 46,1 °C sıcaklık ve %28,5 bağıl neme sahip olan Kuveyt’de çalışacak çatı tipi paket klima tasarımında ilk olarak evaporatif ped uygulanmadan tasarım yapılmıştır. Bu sıcaklık için tasarım şartı olan 50 kW soğutma kapasitesini elde etmek için hesaplamalar yapılmıştır. Kuveyt’in dış hava şartlarına göre paket programlardan yararlanılarak yapılan soğutma optimizasyonunda 10 ° evaporasyon ve 60 °C kondensasyon sıcaklıklarına göre ekipmanlar seçilmiştir.

Toplam soğutma kapasitesi 49,36 kW ve toplam ısıtma kapasitesi (kondenser kapasitesi) ise 68,58 kW değerindedir (Tablo 6 ve Tablo 7).

Tropikal iklim şartında çalışacak olan çatı tipi paket klima düzeneğinin iç ünite ve dış ünite fanları, 3.1.1.1 nuralı başlık altında verilen yöntem ile seçilmektedir. Tüm bu ekipman seçimlerinin sonucunda standartlara uygun olarak yapılan katı modelleme ile birlikte düzeneğin uzunluğu 2.350 mm, yüksekliği 1.200 mm ve genişliği 1.900 mm olmaktadır.

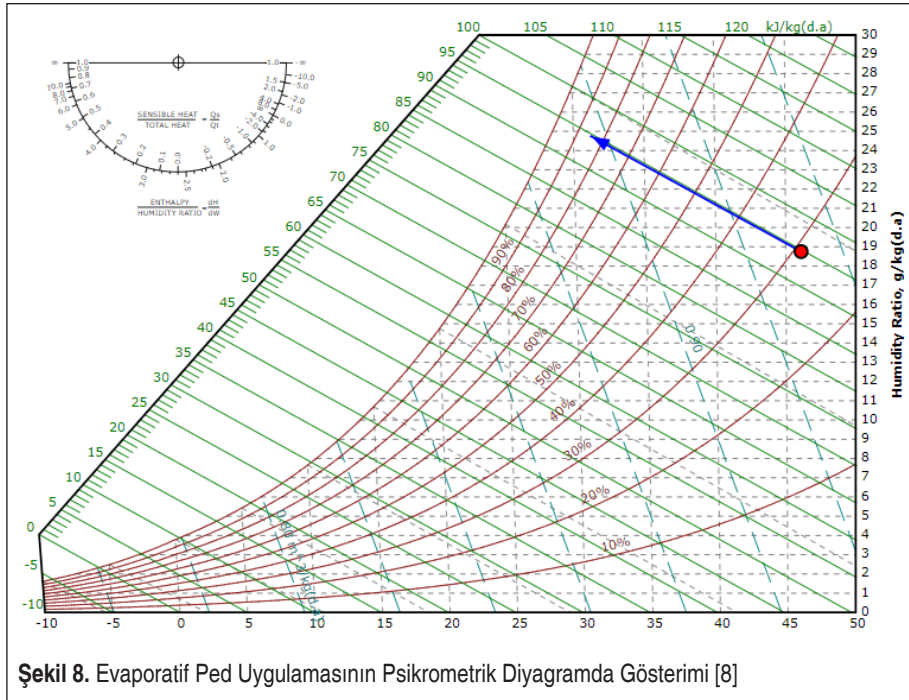
Tablo 6. Sabit Hızlı Kompresörün Hesaplanan Şartlardaki Performans Detayı [7]

Nokta	Açıklama	Sıcaklık [°C]	Basınç [bar]	Yoğunluk [kg/m ³]	Entalpi [kJ/kg]	Entropi [kJ/(kg.K)]
1	Kompresör Emiş	15,0	10,82	40,21	429,3	1,810
2	Kompresör Basma	93,6	38,24	124,90	476,8	1,844
2s	Kondenser Çiğ Noktası	60,0	38,24	198,60	415,5	1,667
3s	Kondenser Kaynama Noktası	59,9	38,24	824,70	307,1	1,342
3a	Kondenser Çıkış	56,9	38,24	854,80	300,0	1,321
3	Aşırı Soğutma dahil	56,9	38,24	854,80	300,0	1,321
4	Genleşme Vanası sonrası	9,9	10,82	97,33	300,0	1,353
4s	Evaporatör Kaynama Noktası	9,9	10,82	1130,00	215,2	1,054
1s	Evaporatör Çiğ Noktası	10,0	10,82	41,75	423,6	1,790
1a	Evaporatör Çıkış	15,0	10,82	40,21	429,3	1,810



Tablo 7. Değişken Hızlı Scroll Kompresörün Hesaplanan Şartlardaki Performans Detayı [10]

Evaporatör kütleli debisi: 696,1 kg/h						
Nokta	Açıklama	Sıcaklık [°C]	Basınç [bar]	Yoğunluk [kg/m ³]	Entalpi [kJ/kg]	Entropi [kJ/(kg.K)]
1	Kompresör Emiş	15,0	10,82	40,21	429,3	1,810
2	Kompresör Basma	98,5	38,24	120,40	483,5	1,862
2s	Kondenser Çiğ Noktası	60,0	38,24	198,60	415,5	1,667
3s	Kondenser Kaynama Noktası	59,9	38,24	824,70	307,1	1,342
3a	Kondenser Çıkış	56,9	38,24	854,80	300,0	1,321
3	Aşırı Soğutma dahil	56,9	38,24	854,80	300,0	1,321
4	Genleşme Vanası sonrası	9,9	10,82	97,33	300,0	1,353
4s	Evaporatör Kaynama Noktası	9,9	10,82	1130,00	215,2	1,054
1s	Evaporatör Çiğ Noktası	10,0	10,82	41,75	423,6	1,790
1a	Evaporatör Çıkış	15,0	10,82	40,21	429,3	1,810



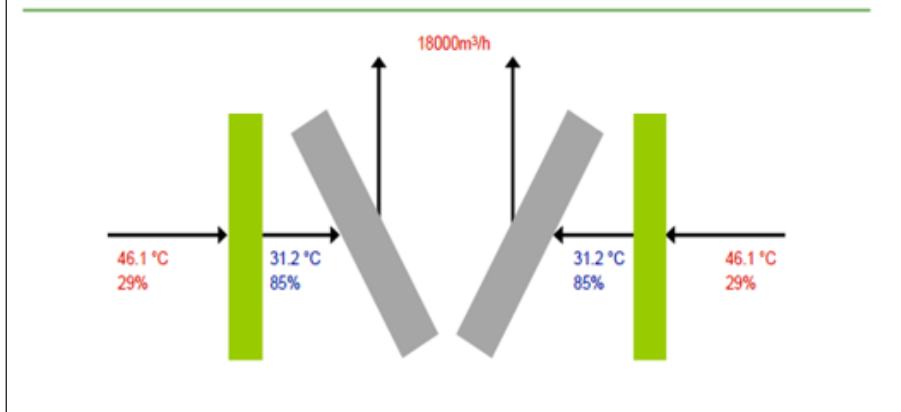
3.1.2.2 Evaporatif Ped Uygulaması ile Tasarlanan Sistem

Tropikal iklim şartlarında incelenen sistemde soğutma kapasitesini daha az enerji harcayarak elde etmek için evaporatif soğutma uygulaması yapılmıştır. Kullanılan yüksek verimli evaporatif ped sayesinde 46,1 °C %28,5 bağıl neme sahip dış hava sıcaklığı 31,2 °C sıcaklığa kadar düşmektedir (Şekil 8).

Tablo 8 ile verildiği gibi gerekli evaporatif soğutmayı yapmak için, evaporatif ped

Tablo 8. Evaporatif Ped Teknik Özellikleri [8]

Uygulama: Kondenser Ön Soğutucu			
Konum		Sonuçlar	
Yer	N/A	Besleme Hava Sıcaklığı [°C]	31,2
Ortam Basıncı [hPa]	1011,1	Besleme Hava Bağıl Nemi [%]	85
		Ped Verimi [%]	87
		Basınç Kaybı [Pa]	64
Hava Şartı			
Kuru Termometre Sıcaklığı [°C]	46,1	Çekilen Güç [W]	644
Yaş Termometre Sıcaklığı [°C]	29	Harcanan Su Miktarı [L/h]	130,8
Çiğ Noktası Sıcaklığı [°C]	23,8	Kompresör Verim Artışı [%]	66,9
Bağıl Nem [%]	29,1	Kondenser Çalışma Maliyetini İndirgeme [%]	40
Mutlak Nem [g/kg]	18,7		
Özellikler			
Ped Yüzey Alanı [m ²]	2.000		
Hava Hızı [m/s]	2,5		
Besleme Hava Debisi [m ³ /h]	18.000		





üzerine püskürtülen su miktarı 130,8 L/s debide olmaktadır. Yine suyu püskürtmek için gerekli olan pompanın çektiği güç 65 W olacaktır. Aynı zamanda, havanın kuru termometre sıcaklığı değerinin yaklaşık olarak 15 °C kadar düşmesini sağlayarak sistemin enerji tüketimini azaltmayı sağlayan evaporatif ped, hava tarafında 64 Pa gibi bir basınç kaybına neden olmaktadır.

Tablo 9. Sabit Hızlı Kompresörün Hesaplanan Şartlardaki Performans Detayı [7]

Evaporatör kütleli debisi: 564,3 kg/h						
Nokta	Açıklama	Sıcaklık [°C]	Basınç [bar]	Yoğunluk [kg/m ³]	Entalpi [kJ/kg]	Entropi [kJ/(kg.K)]
1	Kompresör Emiş	13,0	10,20	37,83	428,7	1,813
2	Kompresör Basma	70,9	27,18	91,23	463,6	1,836
2s	Kondenser Çiğ Noktası	45,0	27,18	119,40	424,4	1,717
3s	Kondenser Kaynama Noktası	44,9	27,18	948,20	274,9	1,248
3a	Kondenser Çıkış	41,9	27,18	967,50	269,2	1,230
3	Aşırı Soğutma dahil	41,9	27,18	967,50	269,2	1,230
4	Genleşme Vanası sonrası	7,9	10,20	132,60	269,2	1,246
4s	Evaporatör Kaynama Noktası	7,9	10,20	1138,00	212,1	1,043
1s	Evaporatör Çiğ Noktası	8,0	10,20	39,25	423,1	1,794
1a	Evaporatör Çıkış	13,0	10,20	37,83	428,7	1,813

Tablo 10. Değişken Hızlı Kompresörün Hesaplanan Şartlardaki Performans Detayı [10]

Evaporatör kütleli debisi: 564,3 kg/h						
Nokta	Açıklama	Sıcaklık [°C]	Basınç [bar]	Yoğunluk [kg/m ³]	Entalpi [kJ/kg]	Entropi [kJ/(kg.K)]
1	Kompresör Emiş	13,0	10,20	37,83	428,7	1,813
2	Kompresör Basma	74,7	27,18	88,78	468,5	1,850
2s	Kondenser Çiğ Noktası	45,0	27,18	119,40	424,4	1,717
3s	Kondenser Kaynama Noktası	44,9	27,18	948,20	274,9	1,248
3a	Kondenser Çıkış	41,9	27,18	967,50	269,2	1,230
3	Aşırı Soğutma dahil	41,9	27,18	967,50	269,2	1,230
4	Genleşme Vanası sonrası	7,9	10,20	132,60	269,2	1,246
4s	Evaporatör Kaynama Noktası	7,9	10,20	1138,00	212,1	1,043
1s	Evaporatör Çiğ Noktası	8,0	10,20	39,25	423,1	1,794
1a	Evaporatör Çıkış	13,0	10,20	37,83	428,7	1,813

Tropikal iklim bölgeleri için tasarlanan evaporatif pedli çatı tipi klima santralinin soğutma paket programlar ile yapılan optimizasyonunda ise; sistem 10 °C evaporasyon, 45 °C kondenzasyon sıcaklığında tasarlanmıştır. Bu değerlere göre tüm soğutma komponent seçimleri yapılmıştır. Ayrık 2 devreli olarak tasarlanan hassas soğutma sisteminin toplam soğutma kapasitesi 50 kW ve kondenser kapasitesi ise 62,03 kW olmaktadır (Tablo 9 ve Tablo 10).

3.1.1.2 nuralı başlık altında verilen Eurovent standardı sıcaklık şartlarında evaporatif pedli tasarlanan sistem başlığı ile değinildiği gibi iç ünite ve dış ünite fan seçimleri, bu başlık altında incelenen sistem için de yapılmıştır.

Tüm bu seçimler sonucunda yüksek verimli evaporatif ped ile tasarlanan tropikal iklim şartlarında çalışacak olan enerji tasarruflu çatı tipi paket klima santralinin tasarımı yapılmıştır. Yapılan 3 boyutlu tasarım çalışması sonucunda düzeneğin uzunluğu 2.290 mm, yüksekliği 915 mm, genişliği ise 1.700 mm olmaktadır (Şekil 9).

Yüksek verimli evaporatif ped kullanıldıktan sonra, düzeneğin boyutlarında %33,6 oranında bir küçülme meydana gelmiştir.

Evaporatif pedli ve evaporatif ped kullanılmadan tasarlanan sistemleri karşılaştırırken; kondenser giriş sıcaklığı ile kondenzasyon sıcaklığı arasındaki fark yani ΔT sabit tutulmaz ise, evaporatif ped kullanıldığında kompresörün çektiği güç az miktarda düşerken kondenser ısı transfer alanı azalmaktadır böylece düzeneğin hacmi %33,6 oranında küçülmektedir. Bu sayede düzeneğin maliyetinde azalma görülmektedir.



Şekil 9. Kondenser Tarafı Evaporatif Pedli Tropikal Çatı Tipi Klima Düzeneği



Eğer kondenser giriş sıcaklığı ile kondenzasyon sıcaklığı arasındaki fark ΔT sabit tutulur ise, kondenser ısı transer alanı sabit kalırken kompresörün çektiği güç ciddi oranda azalmakta ve yüksek oranda enerji tasarrufu sağlanmaktadır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışma 2 farklı iklim şartında, evaporatif ped kullanımının avantajını incelemek üzerine yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda evaporatif pedin her iki iklim şartı için, 2 farklı soğutma çevrimi optimizasyonu koşulunda yani sabit tutulan ΔT (kondenser sıcaklığı ile kondenzasyon sıcaklığı arasındaki fark) ile sabit tutulmayan ΔT arasındaki farka da değinerek detaylı bir enerji tasarrufu analizi yapılmıştır. Eurovent standardı şartı sıcaklık değerlerinde tasarlanan evaporatif pedli ve evaporatif pedsiz sistemin COP, EER, COPçevrim ve EERçevrim değerleri hesaplanmıştır.

EN14511 standardına göre COP ve EER hesabı [9] aşağıda verildiği gibi yapılmıştır. Bu çalışmada incelenen parametrelerin sisteme etkisini görmek ve tasarlanan sistemleri karşılaştırmak için performans katsayıları (COP) denklem (1) ile hesaplanmıştır. Bu hesaplamada sistemin ısıtma performansı da bulunmaktadır.

$$COP = \frac{\text{Toplam Kompresör Isıtma Kapasitesi (kW)}}{\text{İç ünite fan gücü(kW)+Dış ünite fan gücü(kW)+Kompresör Gücü(kW)+Pompa Gücü(kW)}} \quad (1)$$

4.2 numaralı denklem ile verilen eşitlik ile de tasarlanan değişik parametrelerdeki sistemlerin enerji verimlilik oranları (EER) hesaplanmıştır.

$$EER = \frac{\text{Toplam Kompresör Soğutma Kapasitesi(kW)}}{\text{İç ünite fan gücü(kW)+Dış ünite fan gücü(kW)+Kompresör Gücü(kW)+Pompa Gücü(kW)}} \quad (2)$$

Denklem (3) ve denklem (4) ile EN14511 standardında geçen eşitlik dışında, basit EER ve COP hesaplarına da değinilmiştir. Sistemin verimliliği bu eşitliklere göre de değerlendirilmiştir.

$$COP_{\text{çevrim}} = \frac{\text{Toplam Kompresör Isıtma Kapasitesi(kW)}}{\text{Kompresör Gücü (kW)}} \quad (3)$$

$$EER_{\text{çevrim}} = \frac{\text{Toplam Kompresör Soğutma Kapasitesi(kW)}}{\text{Kompresör Gücü(kW)}} \quad (4)$$

Tüm elde edilen sonuçlar Tablo 11 ve Tablo 12 ile verilmiştir.

Tablo 11 ile Eurovent standardındaki sıcaklık için yapılan evaporatif pedli ve evaporatif pedsiz sistemlerin sabit ve sabit olmayan ΔT durumlarındaki mekanik, sıcaklık,

kapasite ve verim karşılaştırmaları yapılmaktadır. Evaporatif ped kullanımı sayesinde meydana gelen verim artışı oldukça net bir şekilde görülmektedir. Ayrıca sabit tutulmayan ΔT ile evaporatif ped uygulamasının kondenser ısı transfer alanını oldukça düşürdüğü görülmüştür. Diğer bir taraftan da evaporatif ped uygulamasında sabit tutulan ΔT 'nin çok daha yüksek enerji verimliliği elde edildiği tespit edilmiştir.

Tablo 12 ile tropikal iklim şartındaki sıcaklık için yapılan evaporatif pedli ve evaporatif pedsiz sistemlerin sabit ve sabit olmayan ΔT durumlarındaki mekanik, sıcaklık, kapasite ve verim karşılaştırmaları yapılmıştır. Evaporatif ped kullanımı sayesinde meydana gelen verim artışı oldukça net bir şekilde görülmektedir. Ayrıca sabit tutulmayan ΔT ile evaporatif ped uygulamasının kondenser ısı transfer alanını oldukça düşürdüğü de görülmektedir. Diğer bir taraftan da evaporatif ped uygulamasında sabit tutulan ΔT 'nin çok daha yüksek enerji verimliliği elde edildiği de tespit edilmiştir.

Tablo 11. Eurovent Sıcaklık Koşulunda ΔT Karşılaştırması

			SABİT ΔT	SABİT TUTULMAYAN ΔT
		EUROVENT ŞARTI EVAPORATİF PEDSİZ	EUROVENT ŞARTI EVAPORATİF PEDLİ	EUROVENT ŞARTI EVAPORATİF PEDLİ
MEKANİK	Evaporatör Isı Transfer Alanı (m ²)	133,76	133,76	133,76
	Kondenser Isı Transfer Alanı (m ²)	83,15	81,59	42,33
SICAKLIK	Evaporasyon Sıcaklığı (°C)	8	8	8
	Kondenzasyon Sıcaklığı (°C)	48	38	48
KAPASİTE	Soğutma Kapasitesi (kW)	48,63	49,85	48,91
	Kondenser Kapasitesi (kW)	61,58	59,21	62,06
VERİM	COP	3,157	3,8	3,29
	EER	2,48	3,2	2,59
	COPçevrim	4,71	6,01	4,71
	EERçevrim	3,72	5,014	3,72

**Tablo 12.** Tropikal İklim Sıcaklık Koşulunda ΔT Karşılaştırması

			SABİT ΔT	SABİT TUTULMAYAN ΔT
		TROPİKAL İKLİM ŞARTI EVAPORATİF PEDSİZ	TROPİKAL İKLİM ŞARTI EVAPORATİF PEDLİ	TROPİKAL İKLİM ŞARTI EVAPORATİF PEDLİ
MEKANİK	Evaporatör Isı Transfer Alanı (m ²)	159,49	159,49	159,49
	Kondenser Isı Transfer Alanı (m ²)	78,11	78,74	32,27
SICAKLIK	Evaporasyon Sıcaklığı (°C)	10	10	10
	Kondenzasyon Sıcaklığı (°C)	60	45	60
KAPASİTE	Soğutma Kapasitesi (kW)	49,36	49,11	49,36
	Kondenser Kapasitesi (kW)	68,58	60,06	68,58
VERİM	COP	2,4	2,93	2,53
	EER	1,72	2,39	1,82
	COPçevrim	3,43	5,21	3,43
	EERçevrim	2,47	4,26	2,47

Sonuç olarak, Tablo 11 ve Tablo 12'den anlaşılacağı gibi yüksek sıcaklıktaki iklim şartlarında evaporatif ped uygulaması daha avantajlı olmaktadır.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, yüksek verimli evaporatif ped ile elde edilen enerji verimliliği ele alınmıştır. İki farklı iklim şartı ve iki farklı soğutma sistemi parametrelerinde çatı tipi paket klima düzeneğinde evaporatif ped etkisi analiz edilmiştir.

Eurovent standardındaki sıcaklık şartında, evaporatif pedin uygulanması ile birlikte, ΔT yani kondenser giriş sıcaklığı ile kondenzasyon sıcaklığı arasındaki fark sabit tutulduğunda, sistemin COP değeri %21,6 ve EER değeri %25,8 oranında artmaktadır. Eğer ΔT sabit tutulmaz ise, evaporatif ped uygulaması ile COP ve EER değerlerindeki artış çok az miktarda olurken kondenser ısı transfer alanında %48 oranında ciddi bir küçülme meydana gelmektedir. Bu durum da göstermektedir ki ilk incelenen şartta bir enerji tasarrufu sağlanmış ve maliyette de azalma görülmüştür. 2. şartta ise enerji

tasarrufu 1. şarta göre daha azken, düzeneğin maliyeti boyuttan yani malzeme maliyetinden dolayı oldukça azalmaktadır.

Tropikal iklim şartları için yapılan evaporatif ped uygulaması ile birlikte, ΔT sabit tutulduğu zaman sistemin COP değeri %40, EER değeri ise %42 oranında artmaktadır. Eğer ΔT sabit tutulmaz ise COP ve EER değerlerinde az miktarda artış görülmekle birlikte, kondenser ısı transfer alanı %59 oranında azalmaktadır. ΔT sabit tutulduğu durumda da kayda değer bir enerji tasarrufu olduğu görülmüştür ve ΔT sabit tutulmadığında ise belli bir oranda düzenek boyutlarında küçülme meydana gelmekte ve maliyet azalmaktadır.

Bu çalışmanın sonucunda, evaporatif ped uygulanmasının özellikle yüksek sıcaklığa sahip bölgelerin soğutma sistemi tasarımlarında büyük bir önem taşıdığı görülmektedir. Yüksek sıcaklığa sahip bölgelerde tasarlanan çatı tipi paket klima düzeneklerinde evaporatif ped uygulanması, hedeflenen soğutma kapasitesini evaporatif soğutmadan destek almadan yapan bir sisteme göre daha az enerji harcayarak sağladığı görülmektedir.

Günümüzde de tükenen kaynaklarımız ve enerji tasarrufunun önemi göz önünde bulundurulduğunda, soğutmalı paket klima düzeneklerinde yüksek verimli evaporatif ped uygulamasının oldukça önemli olduğu tespit edilmiştir.

KAYNAKÇA

1. Çatı tipi paket klima çalışma prensibi: <https://www.tesisat.org/cati-tipi-klima-calisma-prensibi.html>, son erişim tarihi: 22 Nisan 2020.
2. Wang W., Katipamula S., Ngo H., Underhill N. 2019. Energy Performance Evaluation of Variable-Speed Packaged Rooftop Units Using Field Measurements And Building Energy Simulation, Energy and Buildings, United States, p.
3. Oxyvap brochure: <https://cdn2.hubspot.net/hubfs/5065855/Downloads/EN/28660-Oxyvap-A4-Folder-LR.pdf>, son erişim tarihi: 5Ekim 2020.
4. EUROVENT, Raiting Standart for the certification of rooftop, 2018, Paris, 28p.
5. Çengel A. Y., Dr. Boles A. M. 1999. Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik, İstanbul, 867.
6. Özkol N. 2004. Uygulamalı soğutma tekniği, TMMOB, Ankara: 49-87s.
7. Danfoss Coolselector, 2020 (updated), Selection Software, Global, for Fixed Speed Compressor
8. Oxyvap Selection Software, 2020(updated), Selection software, Global.
9. EUROVENT, TS EN14511 Mekân Isıtma ve Soğutma İçin, Elektrikle Tahrik Edilen Kompresör İle Çalışan İklimlendirme Cihazları, Sıvı Soğutma Paketleri Ve Isı Pompaları, 2014, Ankara, 14p.
10. Danfoss Coolselector, 2020(updated), Selection software, Global, for Variable Speed Compressor

Çift Ağlı Hidrojellerin Basma Yükü Altında Gerilme Gevşemesi Davranışı

Necmi Düşünceli¹

Bu çalışma, Ağam Mehmet Düşünceli (Makina Mühendisi, Oda No: 11627)'nin eşsiz hatırasına adanmıştır.

ÖZ

Akrilamid (AAM) zayıf mekanik özellikleri dolayı, biyodoku iskeleleri ve yumuşak doku aktüatörleri gibi biyomedikal uygulamalarda istenilen özellikleri sergileyememektedir. Bu nedenle Aljinat (ALG) kullanılarak çift ağa sahip hidrojel şeklinde kullanılmaktadır. Bu çalışmada AAM-ALG hidrojelindeki kovalent çapraz bağlayıcı (BIS) ve iyonik çapraz bağlayıcı (CaCl₂) miktarının mekanik özellikler etkisini araştırmak üzere beş farklı hidrojel üretilmiştir. Silindirik basma numuneleri %20 gerinim seviyesine kadar yüklenmiş, daha sonra 300 saniye süre ile gevşeme testi yapılmıştır. Sonuçlar iyonik çapraz bağlayıcı miktarının mekanik özelliklere etkisinin çok güçlü olduğunu göstermiştir. Kovalent çapraz bağlayıcı miktarının ise belli bir kritik seviyenin üzerinde etkili olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çift ağlı hidrojel, poliakrilamid, aljinat, mekanik özellikler, gevşeme

Stress Relaxation Behavior of Double Network Hydrogels under Compressive Loading

ABSTRACT

Because of moderate stretchable properties of acrylamide (AAM), it is used as double network hydrogel with alginates (AAL). We prepared AAM-ALG hydrogels containing various amount of crosslinker (BIS) and concentration of calcium chloride (CaCl₂) solution. A series of uniaxial compression loading tests were performed on five different AAM-ALG specimens. The specimens are loaded up to 20% strain and hold at the same strain level for 300 seconds. Concentration of CaCl₂ solution dependency is clear; increasing molarity of CaCl₂ yields an increase in the stress level. On the other hand, effect of amount of BIS is not dominant on mechanical properties.

Keywords: Double network hydrogel, polyacrylamide, alginate, mechanical properties, relaxation

Geliş/Received : 28.08.2020
Kabul/Accepted : 03.11.2020

¹ Prof. Dr., Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Aksaray
ndusunceli@aksaray.edu.tr, ORCID: 0000-0002-2841-7882

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Hydrogels are three-dimensional polymeric networks that include porous, hydrophilic, physical and chemical crosslinking. Hydrogels swell thousands time of their dry weight in water bath and any solution. Hydrogels are influenced changes of environmental conditions such as temperature, pH, magnetic field, and the electric field. These changes are important for their application in the fields of drug delivery, tissue repairing, wound dressing, biosensors, pharmaceutical, agriculture and adsorbent [1-6].

Hydrogels were initially used for production of contact lenses, and then hydrogels were intensively applied for the controlled delivery of biologically active agents. Recently, different biomedical applications have been progressed with using hydrogels such as biomedical devices, scaffolds or tissue engineering, sensors, and soft actuators. Because of these, the mechanical response of gels under swelling has recently attracted substantial attention. The mechanical properties of the hydrogels depend on their ionic, hydrogen and Van der Waals bonding forces. These forces related to the three dimensional network structure and cohesive forces which base on hydrophobic interaction[7-10].

During the past decades, intense investigations have been done to develop high strength, stretchable, tough hydrogels and nanocomposite hydrogels [11-17]. Because of moderate stretchable properties of AAM-ALG, some studies have been focused on synthesis of AAM-ALG and its mechanical properties [18-22]. Alginates are defined as a group of polysaccharides that are produced from a mixture of brown algae and bacteria. Alginates are widely used across many areas of production and biomechanics. Alginates have a wide variety of properties depend on the type and parts of algae that they are cultivated form. Typically, alginates are used for their viscosifying properties for which they are used in the textile food and biotechnological industries [23]. AAM is the one of the common materials that are used in variety of tissue engineering areas, but the pure AAM have extremely poor mechanical properties and biocompatibility [24]. Because of these shortcomings, the mechanical properties of AAM should be increased. One option is combining with other biomaterials such as alginate. Previous investigations have been indicated that the mechanical properties of pure AAM should be improved by synthesizing as double network with ALG [11, 12, 22, 25-31].

Objectives

We prepared AAM-ALG hydrogels containing various amount of crosslinker (BIS) and concentration of calcium chloride solution. Covalently crosslinked AAM and ionically crosslinked ALG contribute for extremely stretchable and tough properties on the hydrogels.

The aim of the study associate with mechanical behavior of alginate-acrylamide double network hydrogels (AAM-ALG). This study focuses on the relaxation behavior of AAM-ALG hydrogels. The objective of this study is to present experimental data related relaxation behavior of AAM-ALG specimen is loaded to various maximum strains (ϵ_{max}) and hold 300 s at fixed strain level.

Results

Operation and Maintenance costs are a large part of the annual total cost of a wind turbine. For a new turbine, operating and maintenance costs can reach 20-25% of the total cost per kWh generated over the lifetime of the turbine. If the turbine is new, the share may only be 10-15%, but this turbine may increase to 20-35% towards the end of its life. Therefore, operating and maintenance costs are getting more attention, as manufacturers try to significantly reduce these costs by developing new turbine designs that require fewer regular service visits and less turbine downtime.

3. Methods

We prepared AAM-ALG hydrogels containing various amount of crosslinker (BIS) and molarity of calcium chloride solution. Covalently crosslinked AAM and ionically crosslinked ALG contribute for extremely stretchable and tough properties on the hydrogels (Fig.1).

The uniaxial compression loading behavior of AAM-ALG were determined by using DMA Q800 (TA Instruments). Compression tests were carried out for different stress/strain levels. AAM-ALG gels with 0.05, 0.1 and 0.3 M CaCl₂ solution and 50, 75 and 100 μ L BIS crosslinker were used for these tests.

4. Test Results

A series of uniaxial compression loading tests were performed on three different AAM-ALG specimens that were prepared in 0.05, 0.1 and 0.3 M CaCl₂ solution at room temperature. The specimens are loaded up to 20% strain and hold at the same strain level for 5 minutes. Uniaxial stress-strain behaviors of AAM-ALG at room temperature on 0.05, 0.1 and 0.3 M CaCl₂ specimens are depicted in Fig. 2. Concentration of CaCl₂ solution dependency is clear; increasing molarity of CaCl₂ yields an increase in the stress level. Trends of these stress-strain curves are approximately the same. All specimens demonstrated hyperplastic behavior.

Relaxations at the strain levels of 20% were performed for 300 s to investigate the influences of concentration of CaCl₂ on the relaxation behavior. Stress versus time curves during relaxation tests at the strain levels of 20% are depicted in Figs. 3.

A series of uniaxial compression loading tests were performed on three different AAM-ALG specimens that were prepared with 50, 75 and 100 μ L BIS at room temperature. The specimens are loaded up to 20% strain and hold at the same strain level for 5 minutes. Uniaxial stress-strain behaviors of AAM-ALG at room temperature on 50, 75 and 100 μ L BIS specimens are depicted in Fig. 4. Amount of crosslinker dependency is clear for high degree; increasing amount of crosslinker yields an increase in the stress level. On the other hand, effect of crosslinker for lower amount of BIS is debatable. Trends of these stress-strain curves are approximately the same. All specimens demonstrated hyperplastic behavior.

Relaxations at the strain levels of 20% were performed for 300 s to investigate the influences of amount of crosslinker on the relaxation behavior. Stress versus time curves during relaxation tests at the strain levels of 20% are depicted in Figs. 5.

5. Conclusions

Observations are reported on AAM-ALG hydrogels in uniaxial compression loading tests with mixed program (loading a maximum strain 20% and hold for 300 s) at room temperatures. We used five different AAM-ALG that are 0.05, 0.1 (75 μ L BIS) and 0.3 M concentration of CaCl₂ and 50, 75 (0.1 M CaCl₂) and 100 μ L BIS. Concentration of CaCl₂ solution dependency is clear; increasing molarity of CaCl₂ yields an increase in the stress level. Amount of crosslinker dependency is clear for high degree; increasing amount of crosslinker yields an increase in the stress level. On the other hand, effect of crosslinker for lower amount of BIS is not pronounced. The amounts of ionic and covalent crosslinker do not influence relaxation behavior of AAM-ALG.



1. GİRİŞ

Hidrojeller, gözenekli, hidrofilik, fiziksel ve kimyasal çapraz bağlamayı içeren üç boyutlu polimerik ağlardır. Hidrojeller, su banyosunda kuru ağırlıklarının binlerce katına kadar şişebilir. Hidrojeller, sıcaklık, pH, manyetik alan ve elektrik alanı gibi çevre koşullarındaki değişikliklerden etkilenir. Bu özellikler ilaç salınımı, doku onarımı, yara sargısı, biyosensörler, eczacılık, tarım alanlarındaki uygulamaları açısından önemlidir [1-6].

Hidrojeller başlangıçta kontak lens üretiminde kullanıldı ve daha sonra biyolojik olarak aktif ajanların kontrollü verilmesi işleminde yoğun bir şekilde uygulandı. Son zamanlarda, biyomedikal cihazlarda, biyo doku iskelelerinde, doku mühendisliğinde, sensörler ve yumuşak aktüatörler uygulamalarında hidrojellerin farklı türleri geliştirildi. Hidrojellerin mekanik özellikleri iyonik, hidrojen ve Van der Waals bağ kuvvetlerine bağlıdır. Bu kuvvetler, üç boyutlu ağ yapısı ve hidrofobik etkileşime dayanan kohezif kuvvetlerle ilgilidir [7-10].

Yakın geçmişte, yüksek mukavemetli, gerilebilir, sert hidrojeller ve nanokompozit hidrojeller geliştirmek için yoğun araştırmalar yapılmıştır [11-17]. AAM-ALG'nin orta derecede gerilebilir özelliklerinden dolayı, bazı çalışmalar AAM-ALG'nin sentezine ve mekanik özelliklerine odaklanmıştır [18-22]. Aljinatlar, kahverengi alg ve bakteri karışımından üretilen bir polisakkarit grubu olarak tanımlanır. Aljinatlar, başta biyomekanik olmak üzere birçok üretim alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Aljinatlar, yetiştirildikleri alglerin türüne ve kısımlarına bağlı olarak çok çeşitli özelliklere sahiptir. Aljinatlar, genel olarak tekstil, gıda ve biyoteknoloji endüstrilerinde viskozite ayarlayıcı özelliklerinden dolayı kullanılır [23]. AAM, çeşitli doku mühendisliği alanlarında yaygın kullanılan malzemelerdendir, ancak saf AAM, son derece zayıf mekanik özelliklere ve biyoyumluluğa sahiptir [24]. Bu gibi dezavantajlarından dolayı, AAM'nin mekanik özelliklerinin ve biyoyumluluğunun artırılması güncel konulardandır. Bu amaca yönelik bir seçenek, AAM'nin ALG gibi diğer doğal biyomalzemeler kullanarak kompozit hale getirmektir. Bu çalışmalarda genel olarak saf AAM, ALG ile çift ağ olarak sentezlenerek mekanik özelliklerde iyileştirilmeler gerçekleştirilir [11, 12, 22, 25-31].

Bu çalışmada, çeşitli miktarlarda çapraz bağlayıcı (BIS) içeren ve değişik molarite kalsiyum klorür çözeltisi içerisinde bekletilmiş AAM-ALG hidrojelleri hazırladık. Kovalent olarak çapraz bağlı AAM'in ALG ile iyonik olarak çapraz bağlanması ile elde edilen hidrojeller son derece yüksek oranlarda gerilebilir ve tok özelliklere sahiptir.

Bu çalışma, yükleme ve gevşeme testlerine tabi tutulan farklı miktarda iyonik ve kovalent çapraz bağlayıcı içeren AAM-ALG hidrojellerinin mekanik tepkisinin belirlenmesi ile ilgilidir.

2. MALZEME VE TESTLER

2.1 Poliakrilamid-Aljinat Hidrojel Sentezi

Poliakrilamid (PAAM) aljinat (ALG) hidrojenlerinin hazırlanması iki aşamalı bir yöntemden oluşur: ilk etapta serbest radikal kopolimerizasyonu ile akrilamidin (AAM) çapraz bağlanması ikinci etapta aljinatın çapraz bağlanması. Yarı iç içe geçmiş bir ağ oluşturmak için, akrilamid polimerize edildi ve aljinat dahil edilerek çapraz bağlandı. AAM çapraz bağlayıcısı olarak N, N-metilenbisakrilamid (BIS), amonyum persülfat (APS) ve polimerizasyonu başlatmak için tetrametiletilediamin (TEMED) kullanıldı. İkinci adım, aljinatın CaCl_2 tuz kullanılarak fiziksel olarak çapraz bağlanmasını içerir, böylece polimer zincirleri arasında iyonik bağlar oluşturulmuştur.

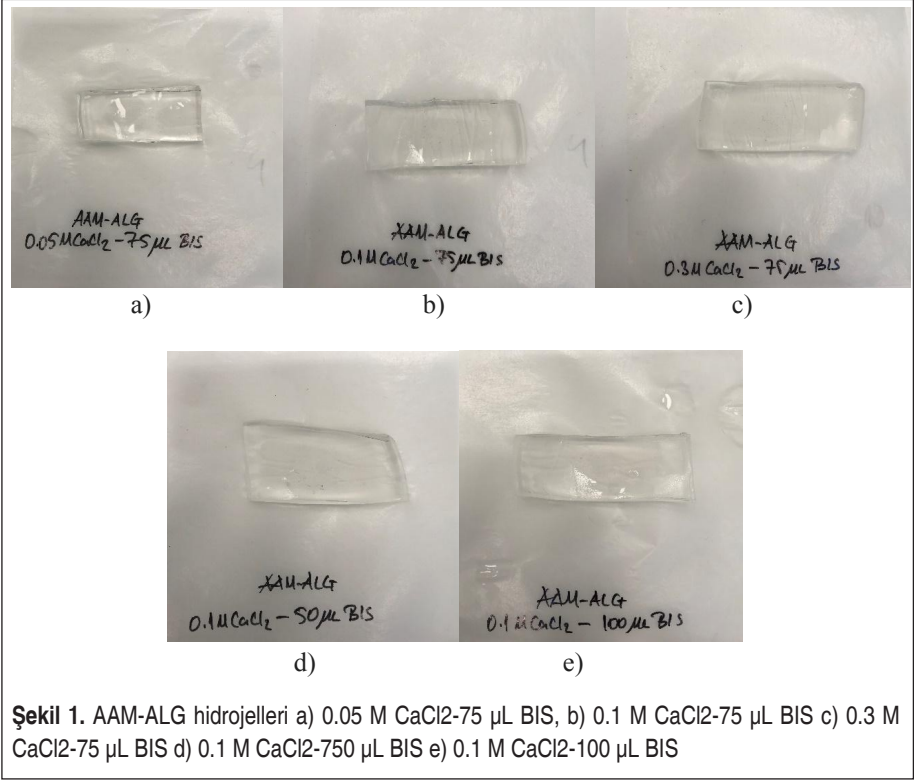
Ağdaki çapraz bağlama ajanlarının etkisini anlamak için farklı konsantrasyonlarda CaCl_2 ve BIS kullanıldı. Hidrojeller, 1: 8 ağırlık oranında aljinat/akrilamid sahip bir aljinat ve akrilamid solüsyonu yapılarak sentezlendi. Çözeltideki nihai ALG ve AAM konsantrasyonu ağırlıkça %14'dir. Aljinat çözeltisi vakum fırınında 121°C 'de bir saat süreyle bekletildi ve daha sonra oda sıcaklığında soğutuldu. Bu aşamadan sonra çözeltinin hacminin azaldığı gözlemlendi.

AAM ve ALG çözeltileri birlikte karıştırıldı. Akrilamid monomerinin miktarına oranla % 0,018 mol,% 0,028 mol ve% 0,037 mol olmak üzere üç farklı molar oranda BIS ve % 0,917 mol TEMED eklenmiştir. AAM oranına göre % 0,123 mol APS içeren taze APS çözeltisi hazırlandı. Solüsyon hemen bir plastik kalıba aktarıldı ve işlem sırasında oluşan oksijen ve serbest radikaller arasındaki etkileşimleri önlemek için nitrojen gazı ile 15 dakika süre arındırma yapıldı. Bir saat sonra polimerizasyon işlemi tamamlanarak, malzeme dikkatlice kalıptan çıkartıldı ve AAM'nin çapraz bağlama işlemi için CaCl_2 çözeltisine (0.05M, 0.1M ve 0.3M) daldırıldı. AAM-ALG hidrojenlerine ait görüntüler Şekil 1'de verilmiştir.

2.2 Mekanik Testler

Bu çalışma, AAM-ALG hidrojenlerinin gevşeme davranışına odaklanmaktadır. Bir AAM-ALG numunesi çeşitli maksimum gerinim seviyesine (ϵ_{max}) yüklendikten sonra, bu gerinim seviyesinde 300 saniye sabit tutularak gerilme seviyesindeki azalış gözlemlenmiştir.

Oda sıcaklığında kuasi-statik basma testleri, bir Dinamik Mekanik Analizör DMA Q800 (maksimum yük kapasitesi 18 N ile TA Instruments) kullanılmıştır, cihazın maksimum ölçme uzunluğu 24 mm'dir. Testler kuvvet kontrol modunda gerçekleştirilmiş ve dinamik etkileri yok edebilmek için gerilme ve gerinimin dinamik bileşenleri mümkün olan minimum değere ayarlanmıştır. Her test en az üç kez tekrarlanmıştır.



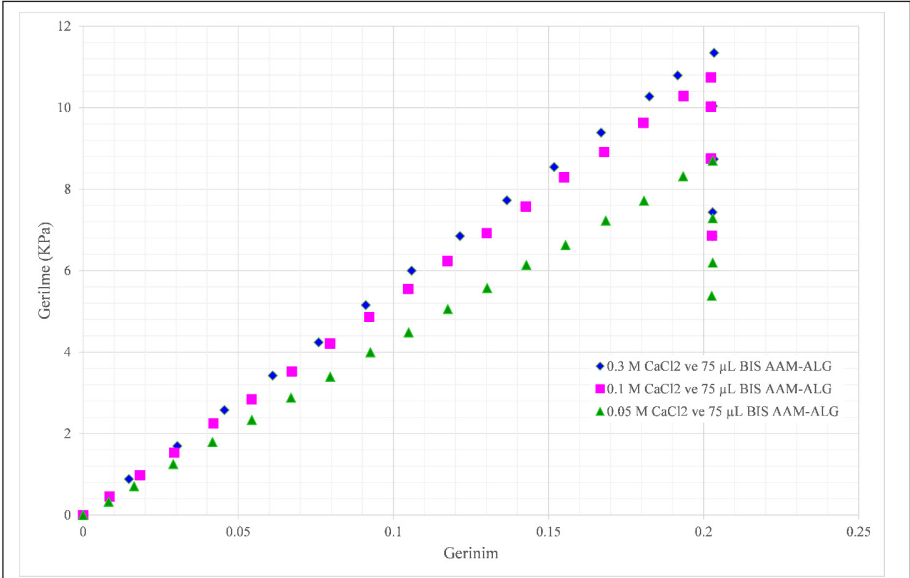
Şekil 1. AAM-ALG hidrojenleri a) 0.05 M CaCl_2 -75 μL BIS b) 0.1 M CaCl_2 -75 μL BIS c) 0.3 M CaCl_2 -75 μL BIS d) 0.1 M CaCl_2 -50 μL BIS e) 0.1 M CaCl_2 -100 μL BIS

Bu test için 0.05, 0.1 ve 0.3 M CaCl_2 solüsyonlu AAM-ALG hidrojenler ve 50, 75 ve 100 μL BIS çapraz bağlayıcı kullanılmıştır.

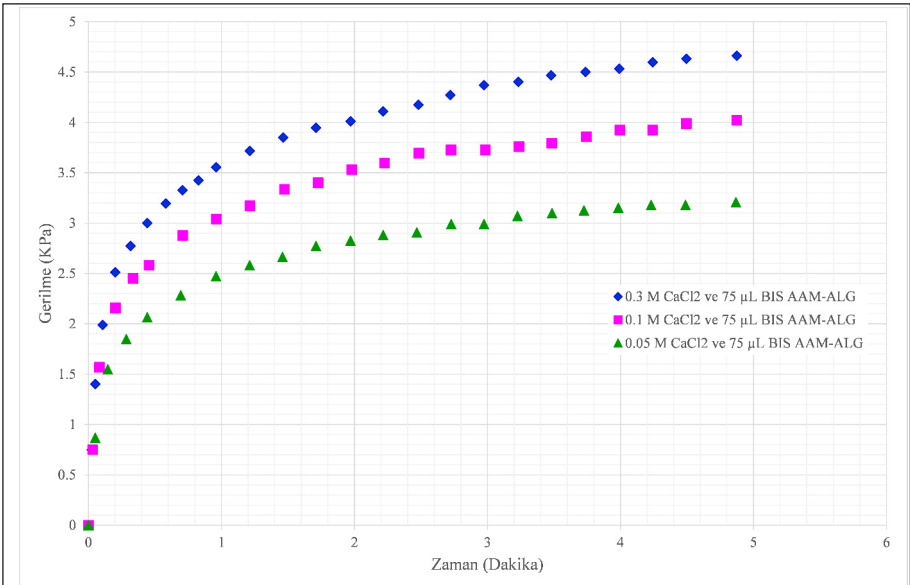
3. TEST SONUÇLARI

Numuneler oda sıcaklığında, % 20 gerinim seviyesine kadar sabit bir basma hızında yüklenmiş ve 5 dakika boyunca aynı gerinim seviyesinde tutularak gevşeme davranışı incelenmiştir. 0.05, 0.1 ve 0.3 M CaCl_2 çözeltisi içerisinde çapraz bağlanmış ve 75 μL BIS içeren AAM-ALG numunelerine ait tek eksenli gerilim-gerinim davranışları Şekil 2’de gösterilmektedir. CaCl_2 solüsyon molaritesi bağımlılığı açıktır; artan konsantrasyon miktarı ile dayanım artmaktadır. Bu gerilme-gerinim eğrilerinin eğilimleri yaklaşık olarak birbirinin aynıdır. Tüm örnekler viskoelastik davranış göstermektedir.

CaCl_2 molaritesinin gevşeme davranışı üzerindeki etkilerini araştırmak için % 20 gerinim seviyesinde 300 saniye süreyle gevşeme testleri gerçekleştirildi. % 20 gerinim seviyesindeki gevşeme eğrileri gerilime-zaman olarak Şekil 3’te verilmiştir. Gevşeme deneylerinde, gerilim azalışı trendi her üç numune tipinde de hemen hemen aynı-



Şekil 2. Farklı Molarite CaCl₂ ve 75 µL BIS Çapraz Bağlayıcısına Sahip AAM-ALG Hidrojellerinin Basma Yükü Altındaki Davranışının Gerilme (KPa)-Gerinim Grafiği



Şekil 3. Farklı Molarite CaCl₂ ve 75 µL BIS Çapraz Bağlayıcısına Sahip AAM-ALG Hidrojellerinin Gevşeme Davranışının Gerilme (KPa)-Zaman (Dakika) Grafiği

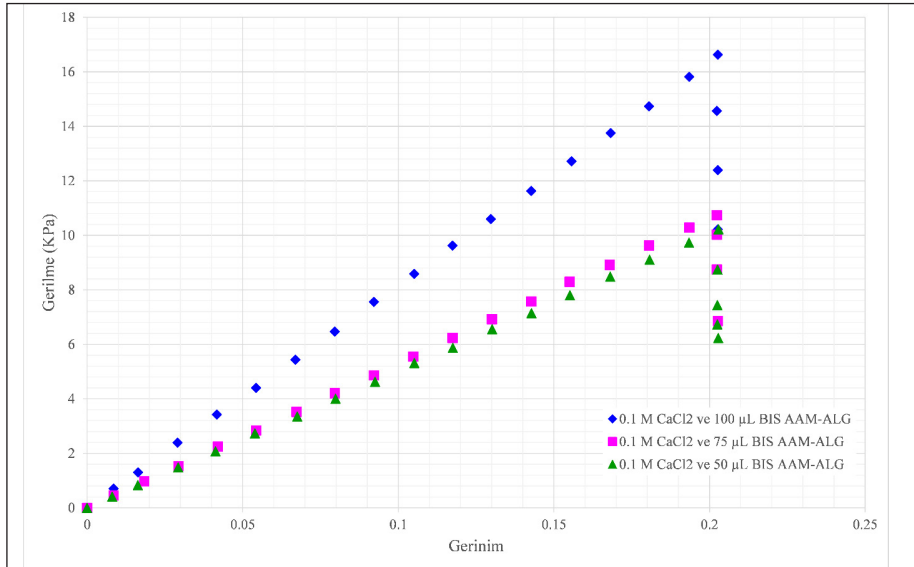


dır (0.05, 0.1 ve 0.3 M). Bu sonuçlar, iyonik çapraz bağlayıcı miktarlarının AAM-ALG'nin gevşeme davranışını üzerinde güçlü bir etki olduğunu göstermektedir.

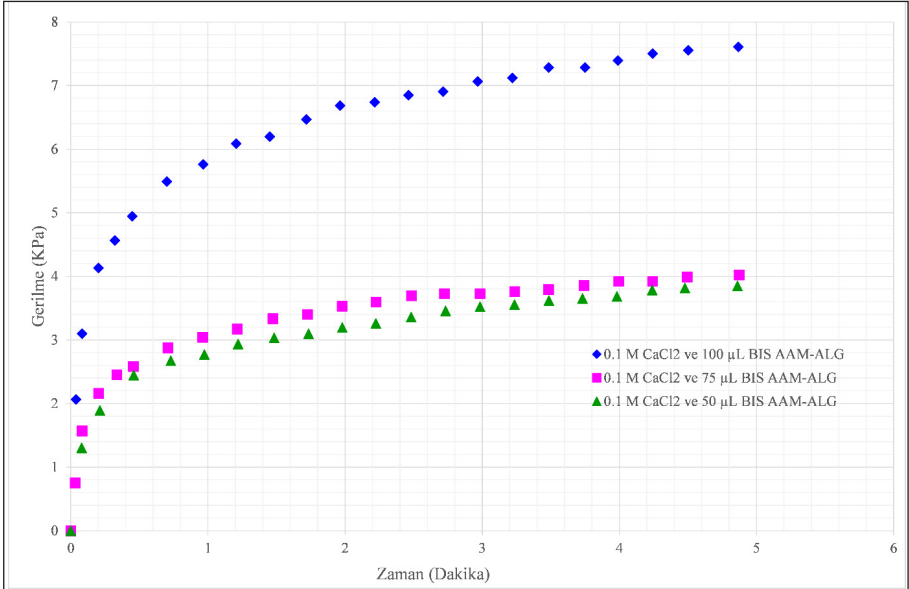
50, 75 ve 100 μL BIS içeren üç farklı AAM-ALG numunesi üzerinde bir dizi tek eksenli basma yüklemesi testi gerçekleştirilmiştir. Numuneler, oda sıcaklığında % 20 gerinim seviyesine kadar sabit bir yüklemeye hızında yüklenmiş ve daha sonra 300 saniye boyunca aynı gerinim seviyesinde tutularak gerilme seviyesinde zamanla oluşan azalma miktarı gözlemlenmiştir. Üç tip AAM-ALG numuneye ait tek eksenli gerilme-gerinim eğrileri Şekil 4'te gösterilmektedir. Çapraz bağlayıcı ajan miktarının dayanım üzerindeki etkisi 75 μL miktarından sonra daha etkindir; artan çapraz bağlayıcı miktarı, gerilme seviyesinde bir artış sağlamaktadır. Öte yandan, daha düşük BIS miktarı için çapraz bağlayıcının etkisi çok açık değildir. Şekildeki gerilme-zaman eğrilerinin eğilimleri yaklaşık olarak aynıdır. Tüm numuneler viskoelastik davranış göstermiştir.

Çapraz bağlayıcının miktarının gevşeme davranışı üzerindeki etkilerini araştırmak için % 20 gerilme seviyesinde 300 saniye süreyle gevşeme testleri gerçekleştirildi. Bu testlere ait gerilmedeki azalma miktarını gösteren eğriler gerilme-zaman ölçeğinde Şekil 5'te verilmiştir.

Gevşeme deneylerinde, gerilim düşüşü yüksek oranda çapraz bağlayıcı içeren numune için daha yüksektir, diğer iki numune tipinde ise hemen hemen aynıdır (50, 75 ve



Şekil 4. 0.1 Molarite CaCl_2 ve Farklı Miktarında BIS Çapraz Bağlayıcısına Sahip AAM-ALG Hidrojellerinin Basma Yükü Altındaki Davranışının Gerilme (KPa)-Gerinim Grafiği



Şekil 5. 0.1 Molarite CaCl₂ ve Farklı Miktarda BIS Çapraz Bağlayıcısına Sahip AAM-ALG Hidrojellerinin Gevşeme Davranışının Gerilme (KPa)-Zaman (Dakika) Grafiği

100 µL BIS). Bu sonuçlar, kovalent çapraz bağlayıcı miktarlarının AAM-ALG'nin gevşeme davranışını üzerinde kritik bir seviyeden sonra daha etkili olduğunu göstermektedir.

4. YORUMLAR

Bu çalışmada, bir dizi test programı ile (% 20 maksimum gerinim seviyesine kadar yükleme ve 300 saniye süreyle sabit gerinim seviyesinde tutma) AAM-ALG hidrojel-lerinin oda sıcaklığında tek eksenli basma yüklemesi davranışı incelenmiştir. Sırasıyla iyonik ve kovalent çapraz bağlayıcı oranları: 0.05, 0.1 ve 0.3 M (75 µL BIS) konsantrasyon CaCl₂ ve 50, 75 ve 100 µL BIS (0.1 M CaCl₂) olan beş farklı AAM-ALG kullanılmıştır. CaCl₂ iyonik bağlayıcı çözelti konsantrasyonu bağımlılığı açıktır; CaCl₂'nin artan molaritesi, gerilme seviyesinde bir artışa neden olmaktadır. Kovalent çapraz bağlayıcı miktarı bağımlılığı yüksek oranlar için daha açıktır; artan çapraz bağlayıcı miktarı, gerilme seviyesinde bir artış sağlamaktadır. Öte yandan, daha düşük BIS miktarı için çapraz bağlayıcının mekanik özellikler üzerindeki etkisi zayıftır. İyonik ve kovalent çapraz bağlayıcı miktarlarının AAM-ALG'nin gevşeme davranışını etkisi benzer şekilde gözlemlenmiştir.



KAYNAKÇA

1. **Buwalda SJ, Boere KWM, Dijkstra PJ, et al.** (2014) Hydrogels in a historical perspective: From simple networks to smart materials. *Journal of Controlled Release*. DOI: 10.1016/j.jconrel.2014.03.052.
2. **Darnell MC, Sun JY, Mehta M, et al.** 2013. Performance and biocompatibility of extremely tough alginate/polyacrylamide hydrogels. *Biomaterials* 34(33). DOI: 10.1016/j.biomaterials.2013.06.061.
3. **Donati I and Paoletti S.** 2009. Material Properties of Alginates. DOI: 10.1007/978-3-540-92679-5_1.
4. **Drozdov AD and Sommer-Larsen P.** 2016. Swelling of thermo-responsive gels under hydrostatic pressure. *Meccanica* 51(6). DOI: 10.1007/s11012-015-0300-3.
5. **Fei X, Lin Jiangli, Wang J, et al.** 2012. Synthesis and mechanical strength of a novel double network nanocomposite hydrogel with core-shell structure. *Polymers for Advanced Technologies* 23(4). DOI: 10.1002/pat.1948.
6. **Golafshan N, Kharaziha M and Fathi M.** 2017. Tough and conductive hybrid graphene-PVA: Alginate fibrous scaffolds for engineering neural construct. *Carbon* 111. DOI: 10.1016/j.carbon.2016.10.042.
7. **Gong JP, Katsuyama Y, Kurokawa T, et al.** 2003. Double-network hydrogels with extremely high mechanical strength. *Advanced Materials* 15(14). DOI: 10.1002/adma.200304907.
8. **Gorin PAJ and Spencer JFT.** 1966. Exocellular Alginic Acid From *Azotobacter Vinelandii*. *Canadian Journal of Chemistry* 44(9). DOI: 10.1139/v66-147.
9. **Govan JRW, Fyfe JAM and Jarman TR.** 1981. Isolation of alginate-producing mutants of *Pseudomonas fluorescens*, *Pseudomonas putida* and *Pseudomonas mendocina*. *Journal of General Microbiology* 125(1). DOI: 10.1099/00221287-125-1-217.
10. **Haraguchi, K.** 2007. Nanocomposite hydrogels. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. DOI: 10.1016/j.cossms.2008.05.001.
11. **Haraguchi, K, Farnworth, R., Ohbayashi, A, et al.** 2003. Compositional effects on mechanical properties of nanocomposite hydrogels composed of poly(N,N-dimethylacrylamide) and clay. *Macromolecules*. DOI: 10.1021/ma034366i.
12. **Hoffman. AS.** 2012. Hydrogels for biomedical applications. *Advanced Drug Delivery Reviews*. DOI: 10.1016/j.addr.2012.09.010.
13. **Ito, K.** 2007. Novel cross-linking concept of polymer network: Synthesis, structure, and properties of slide-ring gels with freely movable junctions. *Polymer Journal* 39(6). DOI: 10.1295/polymj.PJ2006239.
14. **Morelle, XP, Illeperuma, WR, Tian, K, et al.** 2018. Highly Stretchable and Tough Hydrogels below Water Freezing Temperature. *Advanced Materials* 30(35). DOI: 10.1002/adma.201801541.
15. **Okumura Y and Ito K.** 2001 The polyrotaxane gel: A topological gel by figure-of-eight cross-links. *Advanced Materials* 13(7). DOI: 10.1002/1521-4095(200104)13:7<485::AID-ADMA485>3.0.CO;2-T.
16. **Oyen ML** 2014. Mechanical characterisation of hydrogel materials. *International Materials Reviews* 59(1). DOI: 10.1179/1743280413Y.0000000022.

17. **Pensalfini M, Ehret AE, Stüdeli S, et al.** 2017. Factors Affecting The Mechanical Behavior Of Collagen Hydrogels For Skin Tissue Engineering. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 69. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2016.12.004.
18. **Qiao Z, Parks J, Choi P, et al.** 2019. Applications of Highly Stretchable and Tough Hydrogels. *Polymers* 11(11). DOI: 10.3390/polym11111773.
19. **Qiao Z, Cao M, Michels K, et al.** 2020. Design and Fabrication of Highly Stretchable and Tough Hydrogels. *Polymer Reviews*. DOI: 10.1080/15583724.2019.1691590.
20. **Rakhshaei, R., Namazi, H.** 2017. A Potential Bioactive Wound Dressing Based on Carboxymethyl Cellulose/ZnO impregnated MCM-41 nanocomposite hydrogel. *Materials Science and Engineering C* 73. DOI: 10.1016/j.msec.2016.12.097.
21. **Rathjen, C.M., Park CH, Goodrich PR, et al.** 1995. The Effect of Preparation Temperature On Some Properties of a Temperature-Sensitive Hydrogel. *Polymer Gels and Networks* 3(2). DOI: 10.1016/0966-7822(94)00030-B.
22. **Rehm, BHA** 2015. *Alginates: Biology and Applications: Biology and Applications*. Microbiology Monographs .
23. **Shams Es-haghi S, Offenbach I, Debnath D, et al.** 2017. Mechano-Optical Behavior of Loosely Crosslinked Double-Network Hydrogels: Modeling and Real-Time Birefringence Measurement During Uniaxial Extension. *Polymer (United Kingdom)* 115. Elsevier Ltd: 239–245. DOI: 10.1016/j.polymer.2017.03.047.
24. **Sugawara, E., Nikaido, H.** 2009. *Alginates: Biology and Applications*. Antimicrobial agents and chemotherapy 13(12). DOI: 10.1007/978-3-540-92679-5.
25. **Sun, J.Y., Zhao, X., Illeperuma, WRK, et al.** 2012. Highly Stretchable and Tough Hydrogels. *Nature* 489(7414). DOI: 10.1038/nature11409.
26. **Suzuki, A, Sanda, K., Omori, Y.** 1997. Phase Transition in Strongly Stretched Polymer gels. *Journal of Chemical Physics* 107(13). DOI: 10.1063/1.474880.
27. **Treenate P and Monvisade P.** 2017. In vitro drug release profiles of pH-sensitive hydroxyethylacryl chitosan/sodium alginate hydrogels using paracetamol as a soluble model drug. *International Journal of Biological Macromolecules* 99. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2017.02.061.
28. **Varaprasad K, Raghavendra GM, Jayaramudu T, et al.** 2017. A Mini Review on Hydrogels Classification And Recent Developments In Miscellaneous Applications. *Materials Science and Engineering C*. DOI: 10.1016/j.msec.2017.05.096.
29. **Webber RE, Creton C, Brown HR, et al.** 2007. Large Strain Hysteresis And Mullins Effect of Tough Double-Network Hydrogels. *Macromolecules* 40(8). DOI: 10.1021/ma062924y.
30. **Yang CH, Wang MX, Haider H, et al.** 2013. Strengthening Alginate/polyacrylamide hydrogels using various multivalent cations. *ACS Applied Materials and Interfaces* 5(21). DOI: 10.1021/am403966x.
31. **Zhao Y, Wang Y, Niu C, et al.** 2018. Construction of polyacrylamide/graphene oxide/gelatin/sodium alginate composite hydrogel with bioactivity for promoting Schwann cells growth. *Journal of Biomedical Materials Research - Part A* 106(7). DOI: 10.1002/jbm.a.36393.

TIG Kaynağı Yapılan Alüminyum Bir Sac Parçanın Çarpılma Miktarının İncelenmesi

Tugay Karagöz¹

ÖZ

Kaynaklı birleştirmeler sanayi uygulamalarında oldukça fazla uygulama alanlarına sahiptir. Kaynak kullanılarak imal edilen parçalarda birçok farklı kaynak yöntemi kullanılmaktadır ve bu yöntemlerin hepsinde ortak olarak ani bir ısı girdisi olmaktadır. Ani ısı girdisiyle beraber malzeme farklı gerilmelere maruz kalır ve bu gerilmelerin giderilememesi sebebiyle malzemede bir çarpılma (distorsiyon) görülür.

Bu çalışmada TIG-Argon kaynak yöntemiyle alın kaynağı yapılan bir alüminyum sac parçada değişen akım girdisi ile çarpılma arasındaki ilişki incelenmiştir. Yapılan uygulamalar sonucunda parçalar üzerindeki çarpılma miktarları tespit edilerek aynı boyutlardaki parçalar için akım miktarına bağlı olarak çarpılma miktarının değişimi incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum kaynak, TIG, çarpılma, distorsiyon

Investigation of the Impact Amount of an Aluminum Sheet With TIG Welding

ABSTRACT

Welded joints have a wide range of applications in industrial applications. Many different welding methods are used in parts manufactured using welding and all of these methods have a sudden heat input in common. With the sudden heat input, the material is subjected to different stresses and a distortion is seen in the material as these stresses cannot be removed.

In this study, the relationship between distorted current input and distortion is investigated in an aluminum sheet part welded by TIG-Argon welding method. As a result of the applications, the amount of distortion on the parts was determined and the variation of the distortion amount was examined for the parts with the same dimensions depending on the current amount.

Keywords: Aluminum welding, TIG distortion, metal

Geliş/Received : 15.09.2020

Kabul/Accepted : 24.11.2020

¹ Oyak Renault Otomobil Fabrikaları Nilüfer/Bursa

Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Bursa

tugay.karagoz@renault.com, ORCID: 0000-0003-2775-8543

EXTENDED ABSTRACT

Introduction/Background

Welding is the non-removable joining process of two metals that are the same or different from each other, using heat, pressure and, in some cases, both heat and pressure together. After the welding process, when the combined material is allowed to cool, various residual stresses and distortion begin to occur. These residual internal stresses affect the production capability, safety and design of the part.

Objectives/ Research Purpose

In this study, the relationship between distorted current input and distortion is investigated in an aluminum sheet part welded by TIG-Argon welding method. As a result of the applications, the amount of distortion on the parts was determined and the variation of the distortion amount was examined for the parts with the same dimensions depending on the current amount.

Methods/ Methodology

5083 series Aluminum (AlMg4.5Mn0.7) was chosen as the test pieces used in the study. As shown in Figure 9, 5 samples were arranged with dimensions of 300x290x6mm. The parts were cleaned by grinding along the weld seam so as to be welded and short spot welding was made on one side of the parts to be joined before welding. Similar to the industrial applications in butt welding, first one pass was welded on both sides without additional material, then the process was completed by welding with additional wire on one side. 1.2mm AlMg5 was used as additional wire material. 5 different welding currents between 130-160A have been selected as welding current.

Results/ Findings

As can be seen in the graph, the part numbered 5 showed a deviation. Although the current value is the highest, it has been exposed to the least distortion. The reason for this is that during the experiment, the welding operator started the welding application by making the tailstock on both sides of the part numbered 5, unlike the other parts, at the spot stage. In this way, the operator prevented the part from crashing as it attaches the part from both sides before high heat input.

Discussion and Conclusions

As a result of the sources, the distortion amounts caused by the heat input have been tried to be determined by various simulations mentioned in the introduction, but the desired results were not achieved. Both the insufficient stability of the welding process and the high variations in distortion rates even in small heat input differences of the part made it difficult to predict the distortions caused by the welding. As a result of the experiments, it is seen that with a stable welding process and with a large number of samples, it will be possible to reach the distortion values achieved in the simulation.

In this study, the amount of distortion has been revealed as a result of combining 5 pieces with butt welding. The results show that the current has a direct relationship with the amount of distortion, the greater the current, the greater the distortion amount. Of course, 5 pieces are not enough to obtain clearer results, the higher the number of pieces, the more clearly the current-distortion ratio can be determined.



1. GİRİŞ

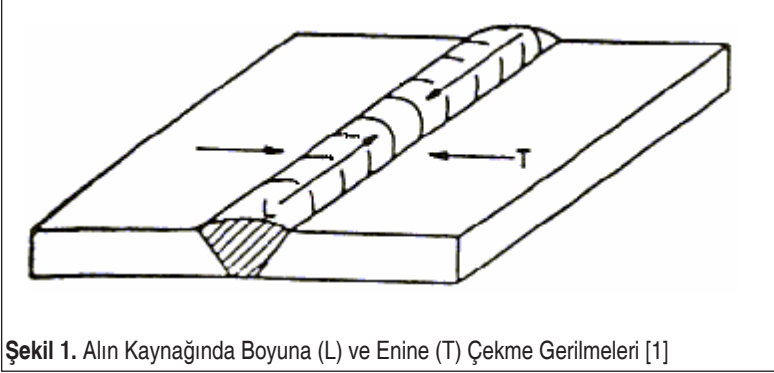
Kaynak, aynı veya birbirinden farklı iki metalin ısı, basınç ve bazı durumlarda hem ısı hem de basınç birlikte kullanılarak yapılan sökülemeyen birleştirme işlemidir.

Kaynak işlemi sonrasında birleştirilen malzeme soğumaya bırakıldığında çeşitli kalıntı gerilmeler ve çarpılma (distorsiyon) oluşmaya başlar. Oluşan bu kalıntı iç gerilmeler parçanın üretim kabiliyetini, güvenliğini ve tasarımını etkiler.

Kaynak işlemi sanayide çokça kullanılan ve vazgeçilmez bir yere sahip birleştirme yöntemidir. Ancak parçanın istenilen kalitede ve güvenilirlikte üretilmesi için kaynak ile yapılan üretimlerde artık gerilmeler ve çarpılmalar dikkate alınmalıdır. Kaynaklı birleştirmelerde oluşan kalıntı gerilmelerin konstrüksiyona iki önemli etkisi vardır; bunlardan birincisi, gerilmeler elastik ve plastik sınırı geçerse distorsiyona sebep olurlar. İkincisi ise sürekli gerilim halinde olan kaynağın erken kırılmasına sebep olabilirler.

Konstrüksiyonlarda oluşan distorsiyonlar, kaynak işlemi sırasında yüksek ısıyla maruz kalan bölgenin, düzensiz olarak gerilmelere sebep olması ve kaynağın dik kesit yüzeyinde merkezden kaçık kuvvetlerin oluşması sonucu meydana gelir. Kaynak metalinin bu gerilmeler karşısında elastik olarak gerilir ve bu düzensiz gerilmeler sonuçta makroskopik distorsiyon olarak görülür. Oluşan şekil değişiklikleri, alın kaynaklarında boylamasına veya enlemesine çekme olarak kendini gösterir. Açısal distorsiyon ise kaynak metalinin yüzey kısmının kök kısmına nazaran daha fazla çekilmesi ve büzülmesi sonucu meydana gelir. Bunun sonucunda kaynatılan parçaların kaynak dikişi boyunca çaprazlama eğilmesine yol açar. Enine ve boyuna çekmede olduğu gibi açısal distorsiyonda da meydana gelen gerilmelerin düzensiz ve dengesiz olmasının bir ürünüdür. İç köşe kaynaklarında ve alın kaynaklarında meydana gelen şekil değişiklikleri hemen hemen aynıdır.

Oluşan şekil değişikliklerin kontrolünde en çok kullanılan yöntem, kaynak öncesinde ve kaynak esnasında birleşme şeklini kontrol edebilmektir. Bu yöntemlerin kısaca şu şekilde sıralayabiliriz. Birincisi, parçaları ilk pozisyonlarını uygun bir biçimde tasarlayarak kaynaktan etkilenmelerini önlemek, diğeri ise kaynatılan gereçleri sabitleyerek kaynak esnasında hareket etmelerine müsaade etmemek ve bu sayede çarpılmaları önlemek, bir diğeri ise kaynak esnasında ergiyik kaynak metalinin birleşme eksenine eşit oranda dağılımını sağlayacak şekilde yapmak. Ayrıca seçilen kaynak yöntemi ve kaynak sırası, paso sayısı gibi unsurlar da distorsiyon ve kalıntı gerilmelerin oluşumunu etkilemektedir. Oluşan distorsiyonu kaynaktan sonra gidermek için çok pahalı olmasına rağmen ısıl yöntemlerle veya mekaniksel bazı yöntemlerle gidermek mümkündür. Ancak en iyisi ve ekonomik olanı kaynak öncesinde gerekli tedbirleri alarak distorsiyonu ve kalıntı gerilmeyi önleme girişimlerinde bulunmaktır. Bu tür



Şekil 1. Alın Kaynağında Boyuna (L) ve Enine (T) Çekme Gerilmeleri [1]

düzeltilme işlemleri sadece maddi olarak külfet getirmekle kalmayıp aynı zamanda çok fazla iş gücü ve zamanın israf olmasına neden olmaktadır.

Kaynaklı parçalarda oluşan kalıntı gerilme ve distorsiyon dış kuvvetlerin etkisiyle düşüğe olsa bir kuvvete maruz kalırlarsa malzemelerde çatlaklara, kırılma hareketlerine, gevrek kırılmalara ve şekil değişikliklerine neden olurlar. Hatta şekil değişiklikleri düşük kuvvetler maruz kalırsa bile görülebilir. Herhangi bir kuvvet karşısında malzemede oluşan kalıntı gerilmeler, düşük mukavemetli olan ve lokal gerilmelerin biriktiği kaynak bölgesine yönelirler. Sonuçta, malzemede gevrek kırılmayı başlatarak kırığın yayılmasına sebep olurlar. Ayrıca oluşan kalıntı gerilmeler, kaynatılan malzemenin yorulmasını ve korozyon direncini kötü yönde etkiler.

Sonuç olarak diyebiliriz ki kalıntı gerilme ve distorsiyon hakkında yeterli bilgiye sahip olmak ve bunların konstrüksiyon üzerindeki olumsuz etkilerini bilmek bu olumsuzluklara karşı tedbir alabilmek için çok önemlidir. Fakat bu bilgiler de yalnız başına olumsuz etkileri azaltmak için yeterli olmayabilir. Bu ancak farklı uygulama ve tekniklerin düşünülüp göz önüne alınmasıyla gerçekleşir. Ele alınan bu teknikleri; Uygun yöntem ve işlem basamakları seçilerek kalıntı gerilme ve distorsiyonun en aza indirgenmesi, distorsiyonu ortadan kaldırmak ve kalıntı gerilmeyi minimum seviyede tutmak için yeni yöntem ve tekniklerin geliştirilmesi ve üretimde tasarım veya malzemeyi değiştirerek kalıntı gerilme ve distorsiyonun en aza indirilmesini sağlamak sayılabilir. Yapılacak çalışmalarda kullanılan teknikler malzeme üzerinde en az hasara sebep olacak ve en ucuz yöntemler tercih edilmelidir [2].

Güneyli Ş., yaptığı çalışmada dünyada ilk defa kaynak işlemi ile oluşan kalıntı gerilmeler, bir ardışık simülasyon ile talaş kaldırma simülasyonuna taşınmış ve talaş kaldırma işlemi esnasında kaynak iç gerilmelerinin etkisinin neden olduğu distorsiyon değişimi araştırılmıştır. Sonuçlarda kullanılan ölçüm metoduyla gerilmelerin, simülasyonlar ile büyük oranda benzerlik gösterdiğini doğrulamıştır. Kaynak işlemi uygulandıktan sonra malzemenin kaynak bölgesi çevresinde termal kaynaklı basma



kalıntı gerilmesi oluşturmaktadır ve C 1040 malzemesinin yüzeyinde deney sonrası en yüksek basma kalıntı gerilmesi -293,90 Mpa ve simülasyon sonrası bu değer -254,05 Mpa olduğu görülmüştür [3].

Wang R. ve arkadaşları TIG kaynak yöntemi ile birleştirilmiş alüminyum ve titanyum malzemelerin açısız distorsiyon miktarının dinamik sürecini yaptıkları çalışmada incelemişlerdir. İki alaşımın dinamik distorsiyon karakterinin farklı olduğu ancak iki alaşım da ısı girdisinden sonra dinamik distorsiyon aşamalarının aynı olduğu görülmüştür (yuvarlama, burkulma ve kamburlaşma). Buna rağmen ısı girdisi miktarı 0.3kJ/mm'den 0.4kJ/mm'ye çıktığında iki alaşımın dinamik distorsiyonu birbirinden farklılaştığı ve dinamik distorsiyon aşamalarının sıralarının değiştiği gözlenmiştir. Alüminyum alaşımının (5A12) titanyum alaşımına (B120) göre distorsiyonunun daha fazla olduğu yapılan deneylerden anlaşılmıştır [4].

Serdaroğlu F. ve arkadaşları yaptıkları çalışmada TIG kaynak yöntemi kullanılarak birleştirilen paslanmaz çelik boru-flanşlarında kaynak akımının distorsiyona olan etkisini araştırmışlardır. Deneysel çalışmalarında kaynak malzemesi olarak AISI 304 Östenitik paslanmaz çelik sac seçmişlerdir. Seçilen sac ile dış çapı 139,7mm olan 400mm uzunlukta ve 2mm kalınlıkta boru imal edilmiştir. Flanşlar ise 240mm dış çap ve 141mm iç çap ölçülerinde ve üzerinde 8 adet 18mm çaplı delik olacak şekilde imal edilmiştir. Deneyler 70A, 80A, 90A, 100A, 110A kaynak akım değerleriyle gerçekleştirilmiş olup her kaynak akımı için 3 adet uygulama yapılmıştır. Parçalar torna aynasına bağlanmış ve çevrilerek komparatör yardımıyla açısız distorsiyonu ölçülmüştür. 70A için %6, 80A için %7, 90A de %4, 100 A'de %7 ve 110A'de %25 olduğu görülmüştür. Kaynak akımı değerleri artışı ile açısız distorsiyonun 70 A'den 90 A değerine kadar doğrusal arttığı ve artışın yaklaşık olarak %10 oranında olduğu, 100 A %65 artış ve 110A değerlerinden ise 90A koşullarından yaklaşık %41 artış gösterdiği sonucunu elde etmişlerdir [5].

2. BİLİMSEL YAZIN TARAMASI

2.1 Kaynak Yöntemleri

Aynı veya benzer alaşımlı metallerin, ısı etkisi altında birleştirilme işlemine kaynak adı verilir (Şekil 2). Kaynakla birleştirmenin bazı türlerinde, benzer alaşımlı bir ilave metal de kullanılır (elektrod veya tel); bazı türlerinde ise kullanılmaz. Isı derecesinin, metallerin ergime noktasına kadar yükseltilmesiyle kaynak işlemi gerçekleşiyorsa bu tür kaynaklara ergitme kaynakları adı verilir. Isı metallerde plastik kıvam oluşturacak mertebede kalmışsa, bu durumda kaynak türü basınç kaynağıdır. Normal çelik yapılarında daha çok ergitme kaynağı kullanılmaktadır. Ergitme kaynağı lehimleme ile karıştırılmamalıdır. Lehimde de ısıtma vardır, fakat birleştirilen metaller erimez. Ayrıca ilave metal birleştirdiği metallere tamamiyle farklı cinstendir. Kaynakta ise çelik



malzemenin birleşim yerine ait kenarları ve elektrot, ergime sıcaklığına kadar ısıtılarak kaynaşmaları sağlanır. Kaynaklı birleşimler çözülemeyen, estetik sağlayan, ancak kalifiye işçilik ve kontrol hizmeti gerektiren birleşimlerdir [6].

Başlıca kullanılan kaynak çeşitleri;

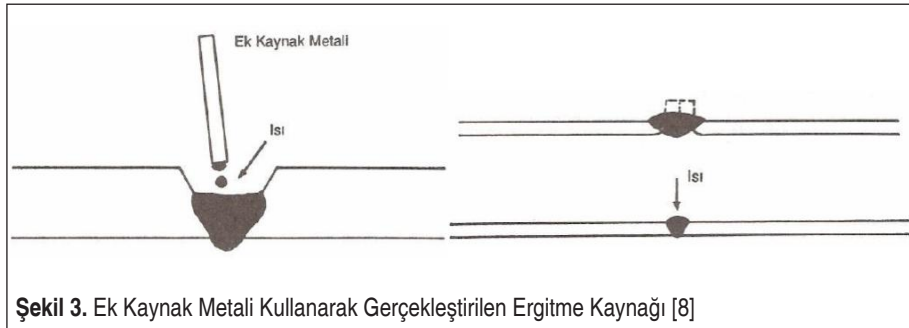
- 1- Ergitme kaynakları: Elektrik Arkı Kaynağı, Gaz Kaynağı
- 2- Basınç Kaynakları: Direnç Kaynağı, Ateş Kaynağı, Su Gazı Kaynağı
- 3-Lazer Kaynağı: Katı Hal Lazer Sistemleri, Gaz Lazer Sistemleri

2.1.1 Ergitme Kaynakları

Ergitme kaynağında, birleştirilecek parçaların birbirlerine kaynaklanacak kısımları ile ilave metal ergime derecesine kadar ($30000C \sim 50000C$) ısıtılır ve ergiyerek birleşen kısımların soğuması sonucunda birleşim sağlanmış olur. Kullanılan ısı kaynağına bağlı olarak başlıca iki gruba ayrılır; elektrik arkı kaynakları ve gaz kaynakları. Şekil 2 ve Şekil 3’de ergitmeli bir kaynak yönteminde, ilave tel kullanarak ve ilave tel kullanmadan birleştirme yöntemi sırasıyla gösterilmiştir [8].

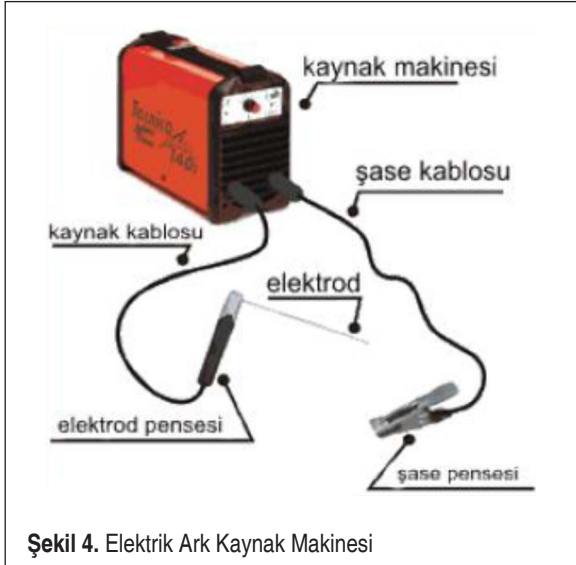
2.1.1.a Elektrik Arkı Kaynakları

Günümüzde çelik yapılarda en çok tatbik edilen yöntemdir. Kaynak için gerekli ısı

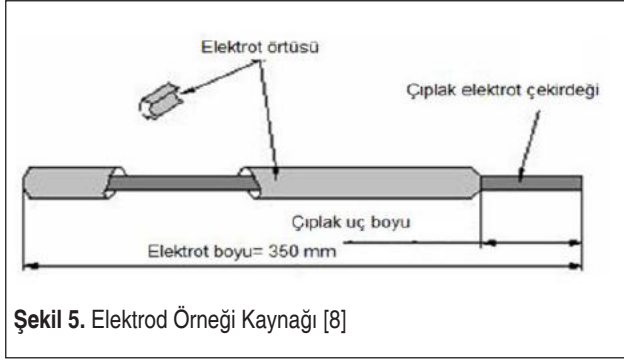




elektrik arkı ile sağlanır. Elektrik arkı, birleştirilecek parçaların oluşturduğu esas malzeme ile elektrot adını alan kaynak teli arasında meydana gelir. Şekil 2’de görüldüğü üzere kaynakçı ustası bir eliyle ve kaynakçı maşası yardımıyla elektrodu tutar. Elektrod, maşa ve bir kablo ile kaynak makinesinin (-) kutbuna bağlıdır. Kaynaklanacak parçalar ise bir kablo ile kaynak makinesinin (+) kutbuna bağlıdır. Elektrodun ucu kaynaklanacak bölgeye yaklaştırılıncaya kaynaklanacak parçalar ile arasında bir elektrik arkı meydana gelir. Arkın doğurduğu yüksek ısı (~40000C) etkisiyle gerek parçaların kenarları, gerekse elektrodun ucu ergime durumuna gelir. Elektrodun ucunda oluşan metal damlaları, yer çekimi ve (-) kutuptan (+) kutba doğru meydana gelen elektron akımı sayesinde kaynak derzini doldurur. Kaynak için elektrik akımının 10~60 V’ luk gerilim ve 60~600 A’lık akım şiddeti özelliklerini sağlaması gerekmektedir. Alternatif şehir akımını kaynağa elverişli (genellikle doğru) akıma çevirmek amacıyla kaynak makineleri kullanılır (Şekil 4).



Elektrodlar 2~8 mm çapındadır ve kaynakla birleştirilecek parçaların malzemesine uygun alaşımında bir metalden üretilmişlerdir (Şekil 5). Çıplak ve sıvalı olmak üzere iki çeşit elektrod mevcuttur. Çıplak elektrodlar ile kaynak çekilmesi sırasında kaynak bölgesi havadan oksijen ve azot aldığından ve çabuk soğuma meydana geldiğinden kaynak dikişlerinin kalitesi ve mukavemeti düşük olur. Kuvvet aktaran dikişlerin çekilmesinde çıplak elektrot kullanılmamalıdır. Sıvalı elektrodlarda elektrodun yüzeyi sıvayla kaplanmıştır. Elektrodu kaplayan sıvanın pek çok faydaları vardır. Örneğin sıva maddesinin yanmasından oluşan koruyucu gazlar kaynak bölgesinden havayı uzaklaştırır.



Şekil 5. Elektrod Örneği Kaynağı [8]

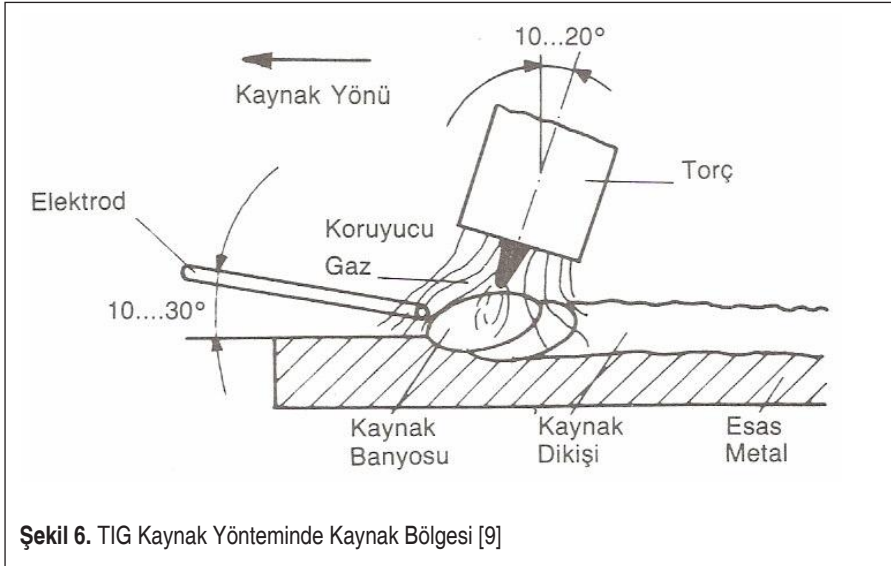
Ayrıca sıva malzemesi kaynak dikişinin üzerinde cüruf tabakası oluşturarak ergimiş haldeki malzemenin çabuk soğumasını ve bu nedenle dikiş içinde gaz habbeciklerinin kalmasını ve kaynak dikişinde ilave gerilmelerin olmasını önler. Üstelik ergimiş haldeki kaynak malzemesi ile cüruf malzemesi arasında meydana gelen kimyasal reaksiyon sonucu kaynak mukavemeti artar. Sıvalı elektrodlar da üzerlerini kaplayan sıva malzemesinin kalınlığına bağlı olarak ince ve kalın sıvalı olmak üzere iki türdür.

Elektrik arkı kaynağı elektrod yerine özlü tellerle de yapılabilir. Özlü teller, sıvalı elektrodun tersiyüz edilmiş halidir. Bunlarda, sıva tabakası malzemesi telin çekirdeğinde yer alır. Ark ve kaynak bölgesini koruma işlevi özlü tel çekirdeğinin yanması ve ayrışması sonucunda oluşan gazlar tarafından veya gazaltı kaynağındaki gibi dıştan beslenen bir koruyucu gaz tarafından gerçekleştirilir. Sıvalı elektrodların üzerindeki örtü maddesi elektrodların düz çubuklar olarak üretilmesine ve boy kısıtlamasına neden olur. Özlü tellerde ise bu örtü maddesi boru şeklindeki tel elektrodun içinde olduğu için makaralara sarıltı tel şeklinde üretilir ve kesintisiz kaynak bölgesine sürülebilir.

Gazaltı Elektrik Arkı Kaynağı: bölgesine sürekli şekilde sürülen, masif haldeki tel elektrod ergiyerek tükendikçe kaynak metalini oluşturur. Kaynak işlemi sırasında elektrod, kaynak banyosu, ark ve iş parçasının kaynağa yakın bölgeleri, atmosferin zararlı etkilerinden kaynak torcundan gelen gaz veya gaz karışımı tarafından korunur. Koruyucu gaz olarak Argon, Helyum veya Karbon Dioksit kullanılır. Kaynak işlemi sonucunda düzgün ve yüksek nüfuziyetli kaynak dikişleri elde etmek mümkündür. Atölye koşullarında uygulanabilen bu yöntem temiz malzemenin kaynaklanmasına uygundur.

Koruyucu gaz, kaynak bölgesini tam olarak koruyabilmelidir, aksi takdirde çok küçük bir hava girişi dahi kaynak metalinde hataya neden olur. Sıcak hadde ürünlerine uygulanacağı zaman bu malzemelerin kumlanarak temizlenmesinde fayda vardır (Şekil 6).

Tozaltı Kaynak Yöntemi: Sabit veya geçici atölyelerde imal edilen yapı ve köprü sistemlerinin, tam otomatik yöntemle yapılan kaynağıdır. Bu yöntemde kaynak tozu,



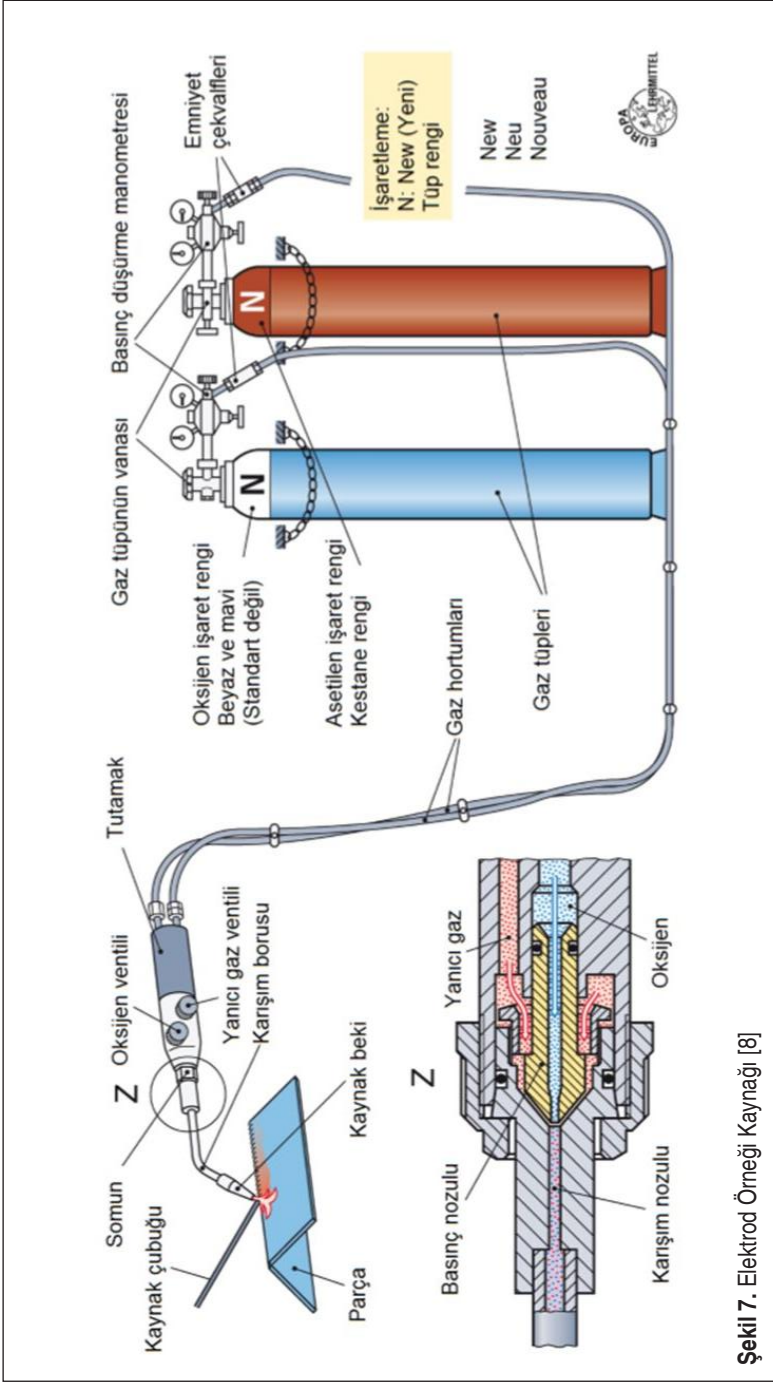
elektrotdan önce kaynak derzine yerleştirilir. Koruyucu görevi yapan kaynak tozu ayrıca kaynak banyosu ile reaksiyona girerek kaynak metalini deokside eder. Alaşımli çelikleri kaynak yaparken kullanılan kaynak tozlarında, kaynak metalinin kimyasal kompozisyonunu dengeleyen alaşım elementleri bulunabilir. Özellikle uzun kaynak boyu uygulamaları (90 cm veya daha uzun) için uygundur. İnce ve kalın et kalınlıklı çelik profiller için kullanılabilir ve yüksek kaliteli köşe, kısmi ve tam nüfuziyetli küt kaynak işlemine uygundur, ayrıca kapalı ve açık alanlarda uygulanabilir. Ancak, yöntem yatay kaynak pozisyonları için uygundur.

2.1.1.b Gaz Kaynağı

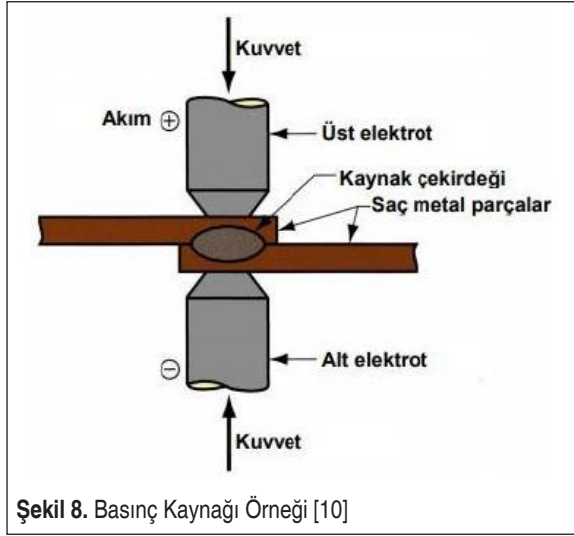
Yüksek sıcaklık gaz alevi ile sağlanır. Gaz alevi şalümo denen bir aletin ucunda yakılır ve kaynakçı bir elinde şalümo diğer elinde ise kaynak telini tutarak kaynağı gerçekleştirir. Bu yöntemle elde edilen dikişlerin mukavemeti düşük olduğundan çelik yapılarda kuvvet aktaran dikişler için bu yöntem kullanılmaz. Öte yandan çelik atölyelerinde gaz alevi, özellikle levha ve profillerin kesilmesi işinde kullanılır. Buna otojen kesme denir (Şekil 7).

2.1.2 Basınç Kaynakları

Hafif çelik yapılarda bir basınç kaynağı metodu olan elektrik direnç kaynağı uygulanır. Birleştirilecek parçaları oluşturan metal elektrik akımına gösterdiği dirençle kızıl dereceye kadar ısınarak plastik kıvama gelir ve ısınan parçalar uygulanan basınçla birbirine kaynar (Şekil 8). Nokta veya kordon kaynağı tarzı uygulamaları vardır. Nokta kaynakların hesabı perçin hesabına benzer.



Şekil 7. Elektrod Örneği Kaynağı [8]



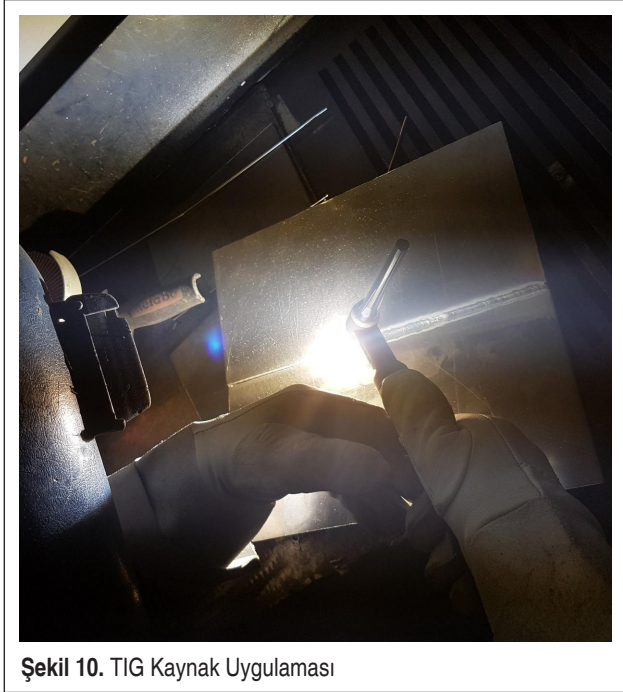
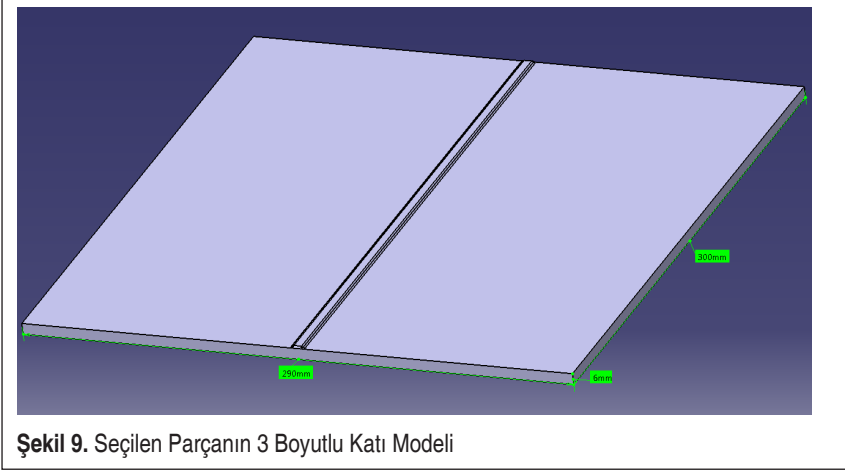
2.1.3 Lazer Kaynağı

Lazer kaynağı; yüksek kaynak ilerleme hızı, çok düşük ısı girdisi, dar kaynak dikişi, küçük ısıdan etkilenen bölge, otomasyona uygunluk, farklı türdeki malzemelerin başarılı kaynağı ve farklı kalınlıkları kaynatabilme özellikleri ile diğer kaynak yöntemlerine göre daha üstündür. Lazer kaynağının başlıca dezavantajları ise çok yüksek yatırım masrafları, sertleştirilebilir malzemelerde son derece sert kaynak dikişi, kaynak işlemlerinde nüfuziyet derinliğinin 0.1-8 mm arasında olmasından ötürü kalın parçaların kaynağındaki problemler, kullanılan lazerlerin göze veya deriye direkt veya dolaylı olarak temasında ciddi sağlık sorunları oluşturması, özellikle yüksek yansıtma kabiliyetine sahip malzemelerin kaynağında ek tedbirler alınması olarak sıralanmaktadır. Lazer ışın kaynak yönteminde çoğunlukla kullanılan lazer sistemleri iki grupta toplanmaktadır. Bunlar; katı hal lazer sistemleri ve gaz lazer sistemleridir.

3. YÖNTEM

Yapılan çalışmada kullanılan deney parçaları olarak 5083 serisi Alüminyum (AlMg4.5Mn0.7) seçilmiştir. Şekil 9'da gösterildiği gibi boyutları 300x290x6mm olacak şekilde 5 adet numune düzenlenmiştir.

Parçalar alın kaynağı yapılacak şekilde kaynak dikişi boyunca taşlama ile temizlenmiş ve kaynaktan önce birleştirilecek parçaların tek tarafından bölgesine kısa punta kaynağı yapılmıştır. Alın kaynağında sanayide yapılan uygulamalara benzer şekilde önce iki tarafa tek paso ilave malzemesiz kaynak yapılmış daha sonra tek yüze ilave



tel ile kaynak yapılarak işlem tamamlanmıştır. İlave tel malzemesi olarak 1.2mm'lik AlMg5 kullanılmıştır.

Kaynak parçalarına Tablo 1'de görüldüğü üzere sırasıyla düşük akımdan başlanarak 130A-160A aralığında TIG-Argon yöntemiyle kaynak yapılmıştır. Ayrıca parçanın

**Tablo 1.** Kaynak Akımına Göre Sac Parçanın Çarpılma Miktarı

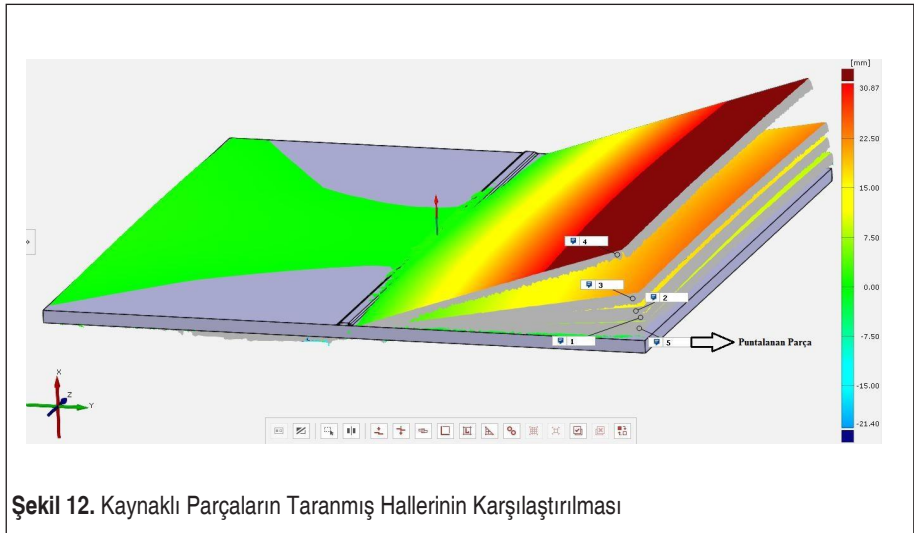
PARÇA NO	AKIM (A)	ÇARPILMA (mm)
1	130	10
2	135	15
3	140	22
4	150	31
5	160	7.5

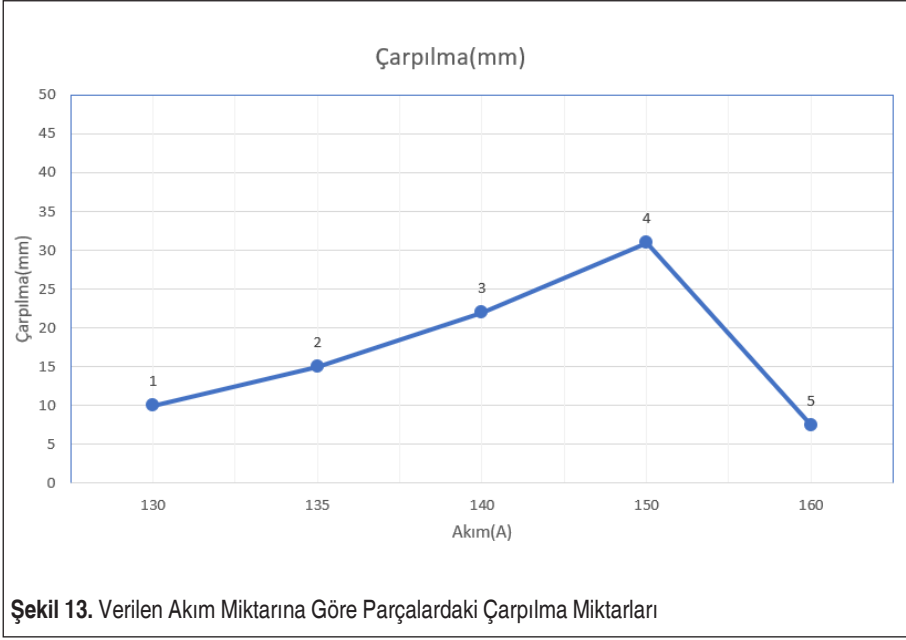
kaynak sonrası görünümü Şekil 11’de görülmektedir. Amper ayarı kaynak cihazı üzerinden alüminyum kaynaklarda kullanılan AC modunda dijital gösterge üzerinden yapılmıştır. Kaynak ilerleme hızının her parçada aynı hızda olmasına kaynak operatörü tarafından özen gösterilmiştir.

4. BULGULAR

Kaynak ile birleştirilmiş olan 5 ayrı parça çarpılmanın tespit edilebilmesi için 3 boyutlu tarama cihazı kullanılarak taranmış ve Şekil 12’de görüldüğü üzere 3 boyutlu katı modelleri üst üste getirilerek karşılaştırılmıştır.

Ayrıca akıma bağlı olarak parçalarda yaklaşık çarpılma miktarları tabloda ve grafik üzerinde gösterilmiştir.





5. SONUÇLAR

Kaynaklar sonucunda ısı girdisinin sebep olduğu çarpılma miktarları yapılan ve giriş bölümünde bahsedilmiş olan çeşitli simülasyonlarla belirlenmeye çalışılmıştır ancak istenilen sonuçlar tamamen elde edilememiştir. Gerek kaynak prosesinin yeterince stabil olmaması gerek de parçanın küçük ısı girdisi farklarında dahi çarpılma oranlarının yüksek değişimleri kaynak sonucu oluşan distorsiyonların tahmin edilmesini zorlaştırmıştır. Yapılan deneyler sonucu görülmektedir ki stabil bir kaynak prosesi ile ve fazla sayıda numune ile simülasyonda ulaşılan distorsiyon değerlerine ulaşmak mümkün olacaktır.

Yapılan bu çalışmada 5 parçanın alın kaynağı ile birleştirilmesi sonucu çarpılma miktarı ortaya koyulmuştur. Sonuçlar göstermektedir ki akımın çarpılma miktarıyla doğrudan ilişkisi vardır, akım arttıkça çarpılma miktarı artmaktadır. Elbette daha net sonuçlar elde etmek için 5 adet parça yeterli değildir, ne kadar yüksek sayıda parça incelenirse akım-çarpılma miktarı oranı daha net belirlenebilir.

Grafikte görüldüğü üzere 5 numaralı parça bir sapma göstermiştir. Akım değeri en yüksek olduğu halde en az çarpılmaya maruz kalmıştır. Bunun sebebi deney sırasında kaynak operatörünün 5 numaralı parçanın punta aşamasında diğer parçalardan farklı olarak iki tarafa da punta yaparak kaynak uygulamasına başlamasıdır. Bu sayede operatör parçayı yüksek ısı girdisinden önce iki taraftan da tutturduğu için parçanın çarpılmasını engellemiştir.



TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın ilk bölümünde görüş ve önerileriyle bana destek olan değerli hocam Prof. Dr. Ali BAYRAM'a teşekkür ederim.

Bu çalışmam süresince desteklerini esirgemeyen ve tez konusunun seçiminde görüş ve önerilerinden faydalandığım değerli hocam Doç.Dr. Hakan AYDIN'a teşekkür ederim.

Deneyisel çalışmalar sırasında katkılarından ötürü TMMOB Makina Mühendisler Odası Bursa Şubesi Uygulamalı Eğitim Merkezi 'ne ve Mehmet Şimşek'e ve çalışmalar sonrasında parçaların ölçümü konusunda destek olan Coşkunöz A.Ş. Kalıp Makine Fabrikası çalışanlarına teşekkür ederim.

Makale çalışmamın oluşmasında, çalışmanı olduğum Oyak-Renault'a teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak beni büyüten, bugünlere getiren aileme sonsuz teşekkür ederim...

KAYNAKÇA

1. American Welding Society, 1976. "Welding Handbook Seventh Edition" 1:222-264, Miami.
2. **Özkara, H.** 1987. "Kaynaklı Parçalarda Kalıntı Gerilmeler ve Distorsiyon", Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
3. **Güneyli, S.** 2016. "Kaynak Sonrası Oluşan Kalıntı Gerilmelerin Talaş Kaldırma ile Değişiminin Deneysel ve Nümerik Modelleme ile Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
4. **Wang Rui, Liang Zhen-xin,Zhang Jian-xun,** 2007. "Dynamic process of angular distortion between aluminum and titanium alloys with TIG welding", State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, School of Materials Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China
5. **Serdaroğlu F. , Türker M., Kutucu K. Y. , Karadeniz E.** 2012. "TIG Kaynak Akımının Boru-Flanş Birleştirilerde Açısız Distorsiyona Etkisi", Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi Cilt: 9, No: 2 (53-60).
6. **Özhendekçi, D.** "YTÜ İnşaat Müh. Böl. Çelik Yapılar I Ders Notları"
7. Askaynak 2011 "Kaynak yöntemleri", https://www.askaynak.com.tr/contents/494/20110725192344_kob_tig_b.jpg, 12.12.2019.
8. **Anık, S., Tülbentçi, K., Kaluç, E.** 1991. "Örtülü Elektrod ile Elektrik Ark Kaynağı", Gedik Holding Yayınları, İstanbul.
9. **Tülbentçi, K.** 1990. "MIG - MAG Eriyen Elektrod ile Gazaltı Kaynağı", Gedik Holding Yayınları, İstanbul.
10. **Groover P.M,** 2010. "Fundamentals of Modern Manufacturing" 4.versiyon (SI versiyon), Wiley&Sons yayınları

Today, Tomorrow, and the Future of Energy Storage Materials for Solar Energy

Dawar Ali¹, Mehmet Fatih Kaya^{2*}, Levent Şendoğdular³

ABSTRACT

Increasing global energy demand and environmental concerns due to the emissions of greenhouse gases as by-products of fossil fuel consumption have led to the exploration of the potential of renewable energy sources such as solar, biofuel, hydrothermal energy etc. Among these, solar thermal energy is becoming a highly desirable source of renewable energy because of the widespread availability of solar radiations and the progress achieved in its efficiency and effectiveness.

Different forms of thermal storage especially thermochemical storage (TCS), latent heat storage (LHS), and sensible heat storage (SHS) have been reported so far. Likewise, there are studies in the literature which also focus on the main mechanical energy storage systems. In addition, electrochemical energy storage devices like batteries are increasingly gaining popularity due to their highly efficient energy conversion values. Recently investigated materials for various solar storage forms show great potential as the future storage materials since theoretical limits are not reached yet; however, they are still in the experimental stage and this paper presents glimpse of those potential studies.

Keywords: Solar energy, storage materials, batteries, thermal energy

Güneş Enerjisi Depolama Malzemelerinin Bugünü, Yarını ve Geleceği

ÖZ

Fosil yakıtların tükenmeye başlaması ve bu yakıtların yan ürünleri olarak ortaya çıkan sera gazı salınımları, bunun yanı sıra artan küresel enerji talebi ve çevresel endişeler, güneş, biyoyakıt, hidrotermal enerji gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının potansiyelinin daha da detaylı araştırılmasına yol açmıştır. Bunlar arasında termal güneş enerjisi sistemleri yenilenebilir enerji sistemleri içerisinde güneş ışığına kolay erişilebilir olması, elde edilen verimlilik değerleri ve etkili bir enerji dönüşümü sağlanması sebebiyle çok yaygın olarak tercih edilen sistemler haline gelmiştir. Şimdiye kadar farklı termal depolama biçimleri, özellikle termokimyasal depolama (TCS), artık ısı depolama (LHS) ve hissedilir ısı depolaması (SHS) ilgili kapsamlı çalışmalar yapılmıştır. Bunların yanı sıra literatürde de ana enerji depolama sistemleri olarak mekanik enerji depolama sistemlerine de odaklanan çalışmalar bulunmaktadır. Ek olarak, bataryalar gibi elektrokimyasal enerji depolama sistemleri yüksek enerji dönüşüm verimleri sayesinde giderek daha fazla popülerlik kazanmaktadır. Çeşitli güneş depolama yöntemleri için yakın zamanda araştırılan malzemeler, teorik sınırlara henüz ulaşılmadığı için güneş enerjisi depolama malzemeleri konusu araştırmacılar için büyük bir potansiyel göstermektedir. Ancak bu çalışmaların çoğu halen deneysel aşamada olup bu değerlendirme çalışmasında güneş enerjisi depolaması ile ilgili malzeme temelli bu potansiyel çalışmalara bir bakış açısı sunulması sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Güneş Enerjisi, depolama malzemeleri, bataryalar, termal enerji.

* İletişim Yazarı

Geliş/Received : 21.09.2020

Kabul/Accepted : 21.10.2020

¹ Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Melikgazi, Kayseri
dawar1424@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1432-5557

² Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Melikgazi, Kayseri
kayamehmetfatih@erciyes.edu.tr, ORCID: 0000-0002-2444-0583

³ Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Melikgazi, Kayseri
lsendogdular@erciyes.edu.tr, ORCID: 0000-0002-6364-0932

1. INTRODUCTION

In this era, energy shortage and environmental issues need to be addressed urgently and globally [1-3]. As compared to 2017, the energy consumption in 2018 increased 1.5% worldwide [4]. A statistical study by British Petroleum shows that global energy demand is continuously increasing and fossil fuel share has almost reached to 87% of the total consumption [1]. Nuclear energy causes less greenhouse emissions and therefore seems to be a promising candidate in terms of environmentally friendly energy source, but it has security problems based on infrastructure and is also very expensive to maintain [3]. Greenhouse gas emissions can only be reduced or at least avoided by consuming renewable energy and therefore, many countries have taken initiatives in this regard [5-11].

Although renewable energy sources cannot be adopted widely because of geographical limitations, economic and atmospheric conditions; they have low environmental damage, produce almost insignificant pollution, and their derivatives are widely available. Among the many other renewable energy sources like wind, biogas, hydrothermal etc., Sun is the major source of clean energy worldwide. Solar energy can be converted to electrical power by both concentrated solar power (CSP) systems and photovoltaics (PVs) [4, 12]. PV cells usually convert solar energy to chemical energy which can be stored in batteries and can be converted into electrical current when needed while CSP systems help to store solar energy as heat to be used as electricity after all [13].

The fundamental parts of any solar thermal system are those which store and collect energy. Solar collectors either transform solar energy into electrical energy using PV methods or into thermal energy of a storage material [14, 15]. PV, solar thermal, and PV/T (photovoltaic/thermal) are the three main solar collectors [6]. PV technology gained massive interest in the last decade in the form of both domestic and remote installations [16] whereas the solar thermal technology has relatively been employed in the housing sector for around half a century now [10]. Thermal energy is further categorized as latent heat, sensible heat and thermochemical heat storage.

Latent heat storage or phase change materials in other words although has low thermal conductivity [7], is considered better than sensible storage due to its high storage density and limited phase transition range [17]. Latent and sensible heat storage do not have the potential to store energy for longer periods of time like from one season to another, instead they can only store energy for a few hours. Therefore, TCS is viable as it solves the issue of longer period energy storage [8]. In this review, the main energy storage materials, or systems like thermal, mechanical, and electrical are considered. Moreover, the potential future storage materials are also presented briefly.



2. THERMAL STORAGE MATERIALS

The flow chart in Figure 1 summarizes the main types of energy storage systems used for solar radiation. Among these thermal, mechanical and electrochemical storage are mainly and widely used systems. Based on the storage mechanism, TES materials can be simply divided into sensible (SHS), thermochemical (TCS), and latent heat storage (LHS) materials [19].

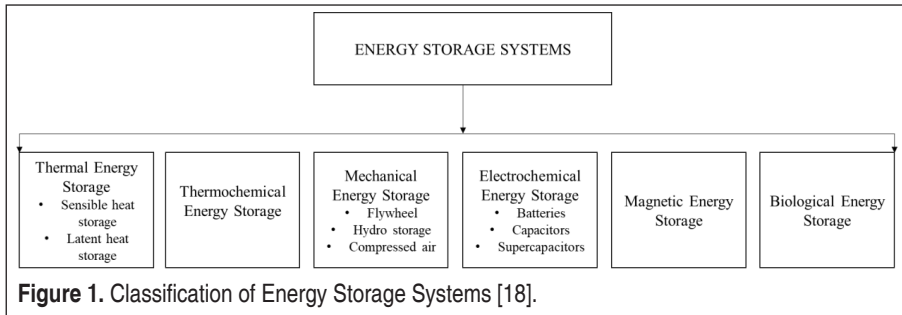


Figure 1. Classification of Energy Storage Systems [18].

2.1 Sensible Heat Storage

The SHS materials do not have to go through a phase change process to store the thermal energy. The extent of thermal energy stored depends on the thermophysical characteristics of the storage material and can be expressed in the form of relationship (1):

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T = m \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1) \quad (1)$$

Where Q is the thermal energy as sensible heat, m is the mass of the storage material in kg, C_p is the specific heat capacity in kJ/kg.K; and T_1 and T_2 are the initial and final temperatures in K [20]. The materials for sensible heat storage can be solids or fluids.

2.1.1 Liquid Storage

Also called as an active system, a liquid storage material can easily circulate and transport the heat. Such kind of system is named as active system. Another major advantage of liquids is that they create a thermal gradient between the hot and the cold fluid. As a result, the density of the storage fluid changes causing the hotter part of the fluid to rise up naturally [21].

2.1.1.1 Water

With a working temperature range between 25-90 °C for low temperature applications, water is the best storage material in this range [22]. The best usage of water is in the form of hot water supply as in residential heating. Materials like aluminium, steel, fiberglass, and reinforced concrete are used for water tanks and heat insulated with polyurethane, wool, or mineral wool.

Hot water mixed with sand gravels in underground can serve as a seasonal large-scale facility for energy storage. This kind of system significantly reduces the water tank construction costs [23].

2.1.1.2 Mineral Oil

Mineral oil is mostly chosen as cooling or heating fluid in the concentrated solar power plants passing through the receiver, collecting heat, and providing it to the boiler for the production of steam for turbine [24]. Mineral oil is less volatile than water and can bear temperatures up to 400 °C without evaporating, allowing it to operate at higher temperatures. The only condition affecting their performance is that they degrade with time and beyond a certain limiting temperature [25].

2.1.1.3 Molten Salts

Molten salts are cheaper, have higher energy storage density and a reduced vapor pressure as compared to water enabling them to work up to 400 °C. For those reasons, they are in high demand in CSP plants as thermal energy storage materials [26]. The most commonly used molten salts remain in the liquid phase throughout the operation even at nights without the need of an antifreeze. Salt composites are used to keep the liquid between 100-500 °C [26]. In addition, Zhao and Wu [19] reported a variety of ternary salt mixtures with melting temperatures less than 100 °C. Those LiNO_3 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, and KNO_3 mixtures can operate around 500 °C with viscosities 80% lower than their commercial counteracts. Moreover, they are corrosive at higher temperatures since they have an oxidizing nature [27].

2.1.1.4 Molten Metals and Alloys

Metals and alloys in the pure form have a higher thermal conductivity, low vapor pressure, higher maximum operating temperature. Therefore, metals and alloys with melting points above 300 °C can be used as a storage media for sensible heat. In the literature Zn/Mg (53.7/46.3), Zn/Al (96/4), Al/Cu/Si/Mg (64.6/28/5.2/2.2), Mg/Ca (84/16), Si/Al (86/12) can be used commonly as molten metals and their alloys [28]. However, they are also corrosive [22].

2.1.2 Solid Storage Medium

Solid materials like rocks, bricks, concrete, sand, and metals can be used for all types of energy storage since they do not boil and freeze. They do not have limitations of liquids, but they have a limitation of circulation as well. Therefore, they can be utilized for passive storage only where air normally transfers the heat. Thus, they are better for applications that need low temperature like space heating and recovery of industrial waste heat. Among all the solid materials pebbles and rock piles are the most preferred since they are cheaper [22].



2.1.2.1 Rocks

Rocks around 5 cm are used together with air or a mineral oil which serve as heat transfer fluids in sand-rock-mineral combinations. In the rock heat storage, heated air passes through the holes between rocks charging them, in the same way cold air circulates through the rocks and gets heated. Rocks are easily available, cheap, non-flammable, and non-toxic, whereas they also face the issues like reduced pressure drops and low air mass flow rates [29]. As an example, appropriate amount is around 300-500 kg rock/m² for thermal energy storage required in space heating.

2.1.2.2 Concrete

Because of its high mechanical strength, the concrete is easily applicable as an SHS material and hence, a container is not required. By circulating the heat transfer fluid (HTF) through the pipes fixed inside a concrete block, heat exchange between concrete and an HTF can occur. In high-temperature applications, its probability to crack under repeated thermal contraction and expansion cycles might be a drawback but research is underway to establish the best suited mixing method to improve chemical-physical characteristics and durability at elevated temperatures [30]. Practical applications have proved that 400 kWh of energy can be stored in 20 m³ of concrete.

2.1.2.3 Sand

Thermal energy can easily be stored in the fine grained gravel and silica sand. Air as an HTF can perform heat transfer within sand grain beds with 0.2 - 0.5 mm diameter. Those beds have been measured up to a storage capacity of 550 °C [31]. The packing density is determined by the fineness of the sand. Finer sand has a greater density of packing. Gravels have grains of 0.4 mm. diameter. To use as solar thermal energy storage options, basalt gravels can be used directly for the solar systems. The gravels fall under gravity absorbing solar energy in the receiver. The Rankine cycle power plant is driven by the steam which is produced by the sand at 700-1000 °C at the bottom of the receiver.

2.1.2.4 Bricks

To reduce the space heating electricity cost, building wall bricks can store thermal energy [22]. During the off-peak hours at night, bricks are heated and store heat. During the day, the heat is extracted by convection or radiation. During the peak hours the stored heat is utilized to keep the buildings warm and this saves the cost of electricity [32].

2.2 Thermochemical Heat Storage

In the thermochemical heat storage systems, reversible chemical reaction is employed to store solar-thermal energy [33]. The heat energy stored equals the enthalpy of the reaction. The storage process occurs with the conversion of reactant (A) to products

(B and C) at the end of the reaction. The backward reaction (exothermic) also generates the A and releases stored heat during the chemical discharge process. Both endothermic and exothermic reaction products can be stored at ambient or working temperatures. Thermal energy stored in thermochemical material can be calculated by:

$$Q = n.H \tag{2}$$

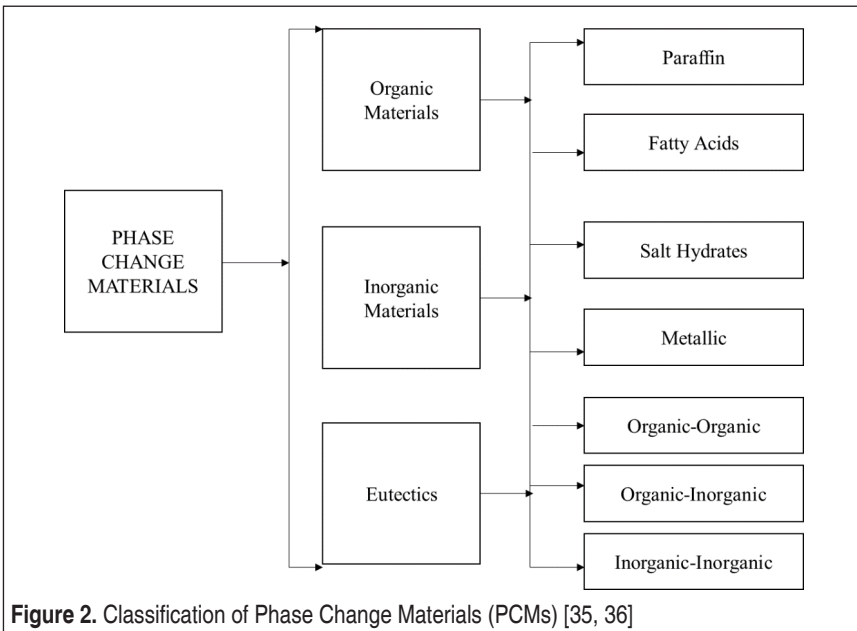
Where n represents the reactants' mol number (mol) and ΔH is the reaction enthalpy (kJ mol^{-1}). Unfortunately, thermochemical energy storage studies are still in laboratory scale, but sensible and latent heat storage studies are in the industrial level. Thermochemical energy storage provides about 6 times the energy density of latent heat storage and 15 times that of sensible heat storage [8, 34]. Thus, this proves how efficient this system can be compared to others.

2.3 Latent Heat Storage

During the melting, phase change materials (PCM) are usually called as “latent fusion fuel”. Phase change reaction occurs during the thermal energy absorption and the temperature fluctuation is very insignificant. Materials store thermal energy as the phase change with the equation below;

$$Q = m.H \tag{3}$$

Here, mass m is in kg and the latent heat of fusion, H is in kJ.kg^{-1} . Usually, phase change occurs between solid and liquid phases [28]. This method is very common





in industrial applications in the last ten years. The Figure 2 below presents the main types of phase change materials; organic, inorganic and eutectics which can be further categorized. All the PCMs are discussed in detail in the following sections.

2.3.1 Organic Materials

For many residential and commercial applications, CHO based latent heat materials (organics) and the mixtures of these organic based materials have proven to be successful and have been used in space heating applications for homes, air conditioning systems, electronic equipment, solar/water heating systems, food, automobiles, textiles, and space industries [12]. Organic PCMs have low melting temperatures restricting their use in power plants as they require high temperatures.

2.3.1.1 Paraffin

Paraffin waxes are members of n-alkanes group ($\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$) by their simple chains [37]. Due to the high cost of paraffin purity, professional quality paraffin waxes are used for these storage studies. Commercially used paraffin is the product of distillation of crude oil. Mostly, paraffins which have saturated carbon are more suitable for PCMs. They have different carbon atoms in their molecules. In these applications, the paraffin wax is used as the PCM and filled inside the tubes. The heat exchange takes place between paraffin and water through heat exchangers.

2.3.1.2 Fatty acids, Esters, Alcohols and Glycols

Fatty acids of ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n-\text{COOH}$) type are the perfect fit as low temperature latent heat storage materials with the best thermophysical properties. They are more expensive than paraffins of professional quality, slightly corrosive and have an unpleasant odour. They are naturally combustible [37].

Esters consist of one group of hydroxyls and alkyls. In the small temperature range, esters exhibit solid-liquid phase change [38].

Polyalcohol or sugar alcohol are called medium temperature PCMs suitable between 90 °C and 200 °C. In the last 40 years, alcohols have been considered as potential PCMs. Although not much research has been done since then, some studies indicated that xylitol, mannitol, and erythritol have almost 300 kJ/kg latent heat due to fusion reactions [39]. This potential has been recorded as the highest value up to which other alternative materials could not reach.

Polyethylene glycol (PEG) is known as polyoxyethylene (POE) and polyethylene oxide (PEO). PEG is located in hydroxyl group and it has dimethyl ether chains with a formula of $\text{HO}-\text{CH}_2-(\text{CH}_2-\text{O}-\text{CH}_2)_n-\text{CH}_2-\text{OH}$. It can dissolve in water and organic compounds. PEGs have also different grades such as PEG600, PEG400 etc. In literature, there exists some earlier studies focused on those materials [40]. They are chemically heat resistant, non-toxic, non-flammable, inexpensive, and non-corrosive.

The PEGs' latent heat of fusion and melting point is directly proportional to the molecular weight [41]. Like other organic PCMs, PEG also has low thermal conductivity.

2.3.2 Inorganic Materials

Inorganic PCMs typically have a heat storage capacity twice that of organic materials per unit volume. The latent heat density is around 350 MJ/m³. They also exceed organic PCMs by having superior thermal conductivities, lower operating temperatures and costs [26]. They are corrosive, which ensures that the devices that contain them have shorter service lives, which raise their costs.

2.3.2.1 Salt Hydrates

Salt hydrates are usually used in the range of 30-50°C at low operating temperatures. They are denoted by a general formula of AB.nH₂O. This can somehow be considered as the representation of water of crystallization of inorganic salt compounds. During the phase change, salt dehydrates and stores the energy. This could be either in the form of a salt with less water or an anhydrous salt [42].

2.3.2.2 Salts

Salts with lower melting temperatures store liquids as a sensible medium. Yet, they can store heat as high as 100°C for high temperature applications. They can be divided into many material types such as carbonates, nitrates, chlorides, and hydroxides, having a wide melting temperature range [43, 44]

2.3.2.3 Metals and Their Alloys

It is well-known that metals have very good thermal conductivity and stability. Moreover, they have good mechanical strength and they can be used again and again for thermal storage without deteriorating their properties at high temperatures [38] Among all materials, metals exhibit the highest phase transfer heat per unit mass or unit volume. Hence, their energy storage potential is very high. Volume change after phase transition is also insignificant. The vapor pressure is also very low. However, they are competitors of salts when volume is important [28].

2.3.3 Eutectic

Eutectics have organic – inorganic, organic – organic, and inorganic – inorganic components. They change their phase in agreement with each other. Eutectics have fixed solidification and liquefaction temperatures. They transform crystal components during the crystallization reactions. Eutectics usually freeze and melt congruently and do not undergo separation.

Alnaimat et al. [45] studied the thermal energy storage systems for solar energy in detail. In Table 1, a summary of different energy storage systems can be seen. Different thermal energy storage systems based on different criteria are also compared in Table



1. The heat losses are the lowest in thermo-chemical while the storage duration is the longest as compared to the other two systems. However, the easiest system to operate among those three is the sensible energy storage.

Table 1. Comparison of Different Energy Storage Systems [45]

Criteria	Sensible Energy Storage System	Latent Energy Storage System	Thermo-chemical Energy Storage System
Operation	Easy	Medium	Hard
Density	Too low	Medium	High
Heat losses	Too High	Medium	No heat loss
Technological Level	In Industrial Use	Preliminary work is still in progress	Only with some demonstrations
Storage time	Couple of hours	Couple of hours	More than a month
Temperature of heat storage	A temperature range	Temperature of phase transition	Ambient temperatures

3. MECHANICAL STORAGE MATERIALS

Considering the cost, environmental footprint, and sustainability, mechanical energy storage systems are much better than others and attract great attention. Mechanical energy storage can be normally divided into flywheel energy storage (FES), pumped hydropower storage (PHS) and compressed-air energy storage (CAES) [46-48].

3.1 Flywheel Energy Storage System (FESS)

In a flywheel energy storage (FESS) system [49] a rotating mass stores energy as kinetic energy for a short-term [50] as shown in Equation (4). They are one of the most effective, fast response storage systems in terms of economic aspects [51].

Flywheels are available in various shapes; laval disc, thick ring, solid disc, and thin ring [52]. Each flywheel features a shape factor (K) reflecting material utilization. Equation (5) represents the specific energy per unit mass which is proportional to K. These equations help to calculate the effect of speed, shape, and inertia on the energy stored by the flywheel [53].

$$E = \frac{1}{2} IW^2 \quad (4)$$

$$\frac{E}{m} = K \sigma_{max} / \rho \quad (5)$$

Where E represents the energy stored, W is the rotational speed, I is the moment of inertia, m is the mass, ρ is the density of the flywheel, and σ_{max} is the maximum stress.

As shown in Figure 3, rotating weight, frequency inverter, and motor-generator are the main parts of the FESS. The design of each component affects the overall efficiency, and one of the main targets is to reduce losses due to power transmission that are determined by the kind of bearing; magnetic bearings proved to be the best selection [54]. In addition to the energy storage, it also increases the battery life [55] in conjunction with renewable sources due to intermittent character.

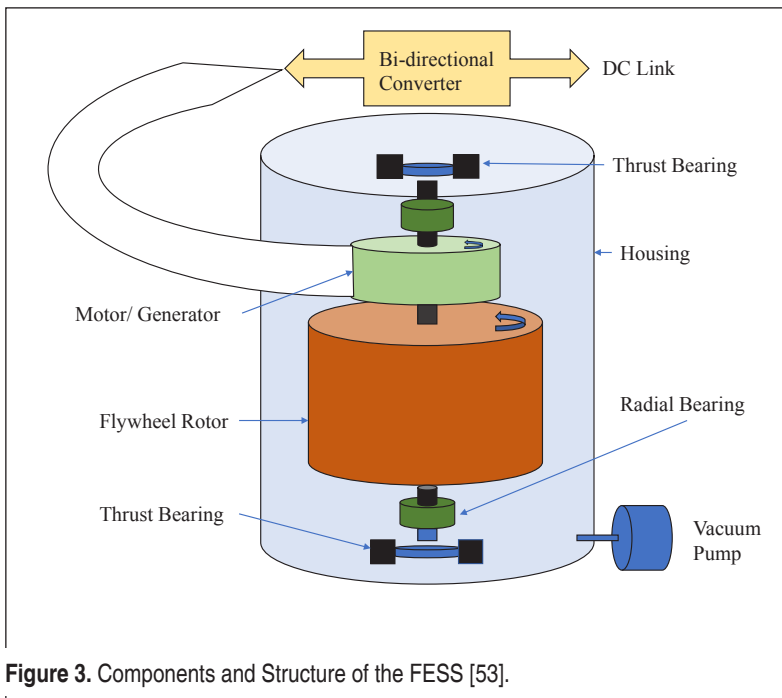


Figure 3. Components and Structure of the FESS [53].

3.2 Pumped Hydro Energy Storage (PHESS)

Another type of mechanical energy storage is the pumped hydro energy storage having features such as flexibility, long-life cycle, and low maintenance cost. It is composed of a pumping system, upper reservoir, and hydro turbine [56]. The excess energy containing water is pumped to the upper reservoir and used when needed.

Photo-voltaic power fluctuations can be avoided by solar-PHESS. The Figure 4 shows the working mechanism of the system in day and night. During the day, the heated

water is pumped to the upper reservoir as storage of energy using the motor, while the same heated water passes to the lower reservoir rotating the turbine to generate the power for use at night [57]. The optimized PHESS reduces the operating costs and is employed in remote areas having no grid supply [58].

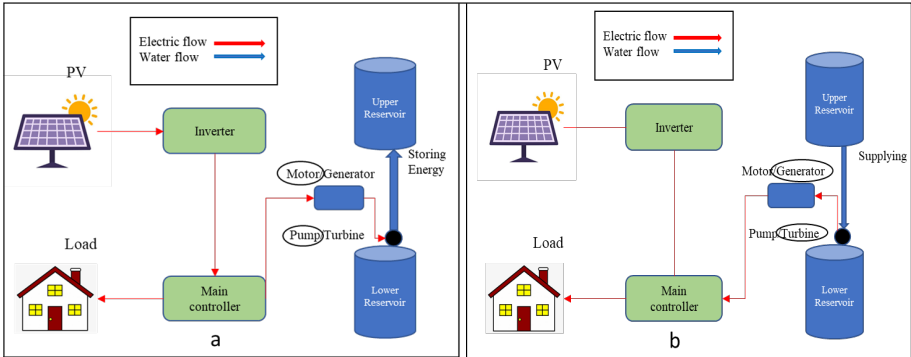


Figure 4. Solar Energy Connected with PHESS (a) Storage; (b) Power Supply [53].

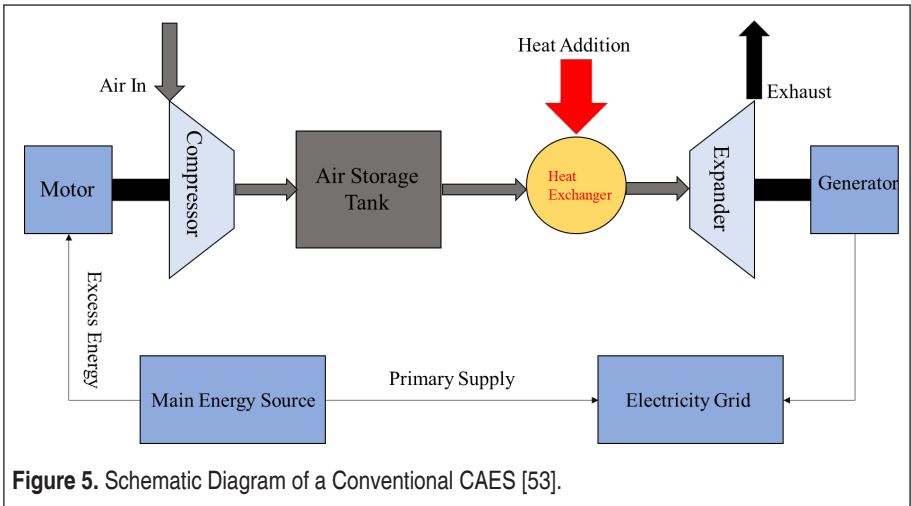


Figure 5. Schematic Diagram of a Conventional CAES [53].

4. ELECTROMAGNETIC ENERGY STORAGE

In 1970, superconductive magnetic energy storage, consisting of a liquid nitrogen cooling system and a superconducting coil, was first introduced. In this method, the coil is charged and discharged for energy storage and consumption. The energy storage efficiency of SMES is >97% and is prompt. The solar and wind power stabilization, improvement in the quality of electrical power supply, voltage stability, and improvement in the power of industrial sectors are all the benefits of this system. The major



drawback of SMES as compared to other systems is the high cost of the superconductors, and maintenance cost of cryogenic temperatures. High temperature superconducting materials are expected to lower the cost of a SMES system [60].

5. ELECTROCHEMICAL ENERGY STORAGE

Batteries and capacitors are the main sources of electrochemical energy storage. A battery stores electrical energy as chemical energy while a capacitor stores energy as surface charge. Another hybrid form is the supercapacitor exhibiting both the characteristics of batteries and capacitors. Lead-acid, nickel-cadmium, zinc-air, sodium-sulphur, and Li-ion batteries are all the battery types based on the component of the electrodes [61].

Electrochemical energy storage is highly efficient, versatile, and flexible as compared to other energy storage technologies. Among the various rechargeable battery types, Lithium-ion batteries (LIBs) are the most widely utilized as they provide high voltage, long cycling life, high reliability, low toxicity, and low self-discharge.

The LIB was commercialized during the early 1990s and since then has gained worldwide acceptance. It consists of a positive cathode, a negative anode, an electrolyte, and a separator. Mainly lithium cobalt oxide or lithium manganese oxide are cathode materials. The anode materials are carbon, iron oxides, cobalt oxides, Si, Sn, and nickel oxides [60].

6. FUTURE OF THE STORAGE MATERIALS

6.1 Mechanical Energy Storage

The energy density of a FES system is linearly dependent on the square of the angular velocity of the flywheel and its mass. Since the material of the flywheel determines the energy density, the faster the rotating speed, the higher the energy density. In this regard, Carbon-fiber reinforced composites having a high strength can serve the purpose. Moreover, carbon nanotubes could prove to be a promising candidate since they have very high tensile strength and young's modulus [62-64].

6.2 Electrochemical Energy Storage

Among all the battery systems LIBs have gained popularity over the last thirty years. If pure lithium could be used as an anode or if pure chalcogen could be used as the cathode, the volumetric storage capacity could be enhanced to a considerable extent. Likewise, the energy density could be doubled if the lithium-air cell becomes operable. Apart from the lithium, sodium or magnesium-based batteries could also be considered but the sodium has safety concerns. Sodium reversibly intercalates into



the chevrel phases, MxMo_6S_8 ; it gives a range of phases by intercalating into the chalcogenides and layered oxides [61, 65].

6.2.1 Iodine-Based Solar Batteries

The first triiodide/iodide (I_3^-/I^-) redox based solar battery was prepared by Hauch and Orel et al. in 2002 [66] which was influenced by the iodine-based electrolyte usage in dye-sensitized solar cells [67, 68].

However, the insufficient concentration of the Li^+ in the electrolyte restricts the capacity of the battery and the device performed better in low light making it useful for indoor systems. The colour shifts between WO_3 and Li_xWO_3 making the possibility of the device as photo-electrochromic system [69].

6.2.2 Vanadium-Based Solar Batteries

The fast kinetics of vanadium based redox flow batteries (RFB), aqueous species, and rich redox chemistry makes them the most widely used RFB systems on the commercial scale in terms of the stationary electrical storage facilities [70-73].

The TiO_2 photoelectrode was merged with the vanadium RFB solar cell in 2012 proposing the new vanadium-based solar battery. In this system, during the charging process electron-hole pairs are generated when the incident light is absorbed by the TiO_2 photoelectrode. During the night, the discharging process occurs in the same way as before where the V_2^+ is oxidized in the anolyte and the VO_2^+ is reduced in the catholyte [74].

Although the TiO_2 showed an efficiency of 12% at 350nm of incident photon-to-electron conversion in an acidic environment. However, the device could not absorb light in the shorter wavelength of the light spectrum due to the large (3.2 eV) bandwidth [75, 76].

6.2.3 Selenium and Bromine-Based Solar Batteries.

For solar batteries, n- $\text{MoSe}_2|\text{Br}_2\text{Br}^-$ and n- $\text{GaAs}|\text{Se}_2^{2-}/\text{Se}^{2-}$ were researched as PE-catholyte combinations in solar batteries. The device with these material combinations achieved a current of around 20 mA/cm^2 and a Voc of 400-500mV which was much higher than the similar $\text{CdSe}|\text{S}/\text{S}^{2-}$ combination. It was believed that the design with flowing electrolyte instead of the static one may help achieve better performance of the device [77].

6.2.4 The Iodine-Based Lithium–Oxygen Solar Batteries

A new concept of integration of TiO_2 photoelectrode with air electrode using I_3^-/I^- redox couple was applied to the normal $\text{Li}-\text{O}_2$ battery in 2014 [78]. The absorbed solar energy reduces the charging potential of the battery by pumping the electrons to the

higher energy level. The device was photocharged to a much lower value of external voltage (2.8 V) than the normal lithium-oxygen battery. The dye-sensitized TiO₂ photoelectrode is recently replaced by g-C₃N₄ photocatalyst [79]. However, the major drawback of such system was the inability to be fully charged and a need of a power input for the charging [80].

6.3 Thermal Energy Storage (PCMS)

The recently developed phase change materials could be the potential future storage materials which are represented below in Table 2. The NaNO₃ : KNO₃ mixture has the highest heat capacity per Kg.K while the latent heat is the highest in Al-Si eutectic.

Table 2. Summary of New PCM Material Properties

Material	Heat Capacity (KJ/Kg.K)	Latent Heat (kJ/ Kg.K)	Volumetric Energy Density (MJ/m ³)	Operating Temperatures Melting	Operating Temperatures Solidification	Thermal Efficiency (%)
NaNO ₃ :K-NO ₃ =60:40 (molar ratios) with 1% CuO [81]	1.68–1.93	122.5–178.87	NA	216–218.21°C	NA	NA
NaNO ₃ :K-NO ₃ =60:40 (molar ratios) [81]	1.24–1.5	107.03	NA	219 °C	NA	NA
Aluminium–silicon eutectic [82]	1.04–1.74	470	NA	577 °C	NA	NA
Ternary carbonates [83]	1.22–1.34	247	NA	405 °C	387°C	NA

6.4 Thermochemical Energy Storage

Table 3 below compares some of the newly developed thermo-chemical energy storage materials. Among all these, the CaO/SiO₂ composite has the highest thermal efficiency of 95.7%.

**Table 3.** Summary of New Thermo-Chemical Energy Storage Materials

Reactants	Operational Suitability	Energy Density (MJ/m ³)	Operating T (°C) Charging	Operating T (°C) Discharging	Thermal Efficiency (%)
Hydroxide looping with Sr(OH) ₂ /SrO [84]	Rankine cycle with subcritical steam	97.09	600	525	7.09
Hydroxide looping with Ca(OH) ₂ /CaO [84]	Rankine cycle with subcritical steam	101.97	700	505	4.78
Redox with BaO ₂ /BaO [84]	supercritical CO ₂ cycle combined	46.09	980	690	23.93
CaO/SiO ₂ composites [85, 86]	NA	NA	950	650	95.7

7. CONCLUSION

Solar energy has the capacity to fulfil the global demand of energy but the major limitation to accomplishing this potential is inherent intermittency. To get around the problem, many newly developed materials for all the storage systems are being researched and tested. Although thermal energy storage is commercially available, electrochemical storage systems like batteries also seem to be a promising choice for continuous flow of power generation and moving peak sunlight hours of solar energy to peak utilization hours in the near future. Moreover, the newly developed materials for the electrochemical batteries in the solar cells, as discussed in the article, although still in the experimental phase, also seem to offer a better storage capacity. All in all, it can be concluded that the development of new materials will boost the stability and performance of energy storage systems.

Acknowledgements

The authors would like to thank the Scientific Research Projects Unit of Erciyes University for funding and supporting the project under the contract numbers: FKB-2019-9134 and FBA-2018-8320

KAYNAKÇA

1. Mofijur, M., Masjuki, H. H., Kalam, M., Atabani, A. E., Fattah, I. R., Mobarak, H. 2014. "Comparative evaluation of performance and emission characteristics of Moringa oleifera and Palm oil based biodiesel in a diesel engine". Industrial crops and products, vol. 53, p. 78-84.



2. **Mofijur, M., Masjuki, H., Kalam, M., Hazrat, M., Liaquat, A., Shahabuddin, M., Varman, M.** 2012. "Prospects of biodiesel from *Jatropha* in Malaysia". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, p. 5007-5020.
3. **Mofijur, M., Masjuki, H., Kalam, M., Atabani, A.** 2013. "Evaluation of biodiesel blending, engine performance and emissions characteristics of *Jatropha curcas* methyl ester: Malaysian perspective". *Energy*, vol. 55, p. 879-887.
4. **Neagu, O., Teodoru, M. C.** 2019. "The relationship between economic complexity, energy consumption structure and greenhouse gas emission: Heterogeneous panel evidence from the EU countries". *Sustainability*, vol. 11, p. 497.
5. **Goh, B. H. H., Ong, H. C., Cheah, M. Y., Chen, W.-H., Yu, K. L., Mahlia, T. M. I.** 2019. "Sustainability of direct biodiesel synthesis from microalgae biomass: A critical review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 107, p. 59-74.
6. **Prasad, D. R., Senthilkumar, R., Lakshmanarao, G., Krishnan, S., Prasad, B. N.** 2019. "A critical review on thermal energy storage materials and systems for solar applications". *AIMS Energy*, vol. 7, p. 507.
7. **Martinopoulos, G.** 2018. "Life Cycle Assessment of solar energy conversion systems in energetic retrofitted buildings". *Journal of Building Engineering*, vol. 20, p. 256-263.
8. **H Abedin, A., A Rosen, M.** 2011. "A critical review of thermochemical energy storage systems". *The open renewable energy journal*, vol. 4, p.
9. **Dharma, S., Masjuki, H., Ong, H. C., Sebayang, A., Silitonga, A., Kusumo, F., Mahlia, T.** 2016. "Optimization of biodiesel production process for mixed *Jatropha curcas*–*Ceiba pentandra* biodiesel using response surface methodology". *Energy Conversion and Management*, vol. 115, p. 178-190.
10. **Silitonga, A., Atabani, A., Mahlia, T., Masjuki, H., Badruddin, I. A., Mekhilef, S.** 2011. "A review on prospect of *Jatropha curcas* for biodiesel in Indonesia". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, p. 3733-3756.
11. **Ong, H. C., Masjuki, H., Mahlia, T., Silitonga, A., Chong, W., Leong, K.** 2014. "Optimization of biodiesel production and engine performance from high free fatty acid *Calophyllum inophyllum* oil in CI diesel engine". *Energy Conversion and Management*, vol. 81, p. 30-40.
12. **Xu, B., Li, P., Chan, C.** 2015. "Application of phase change materials for thermal energy storage in concentrated solar thermal power plants: a review to recent developments". *Applied Energy*, vol. 160, p. 286-307.
13. **Shivashankar, S., Mekhilef, S., Mokhlis, H., Karimi, M.** 2016. "Mitigating methods of power fluctuation of photovoltaic (PV) sources—A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 59, p. 1170-1184.
14. **DeWinter, F.** 1990. "Solar collectors, energy storage, and materials", MIT press,
15. **Silitonga, A. S., Masjuki, H. H., Ong, H. C., Sebayang, A. H., Dharma, S., Kusumo, F., Siswantoro, J., Milano, J., Daud, K., Mahlia, T. M. I.** 2018. "Evaluation of the engine performance and exhaust emissions of biodiesel-bioethanol-diesel blends using kernel-based extreme learning machine". *Energy*, vol. 159, p. 1075-1087.



16. **Martinopoulos, G., Tsalikis, G.** 2018. "Diffusion and adoption of solar energy conversion systems—The case of Greece". *Energy*, vol. 144, p. 800-807.
17. **Barlev, D., Vidu, R., Stroeve, P.** 2011. "Innovation in concentrated solar power". *Solar energy materials and solar cells*, vol. 95, p. 2703-2725.
18. **Powell, K.M. and T.F. Edgar,** 2011, "Control of a large scale solar thermal energy storage system", in *Proceedings of the 2011 American control conference*, IEEE.
19. **Zhao, C., Wu, Z.** 2011. "Thermal property characterization of a low melting-temperature ternary nitrate salt mixture for thermal energy storage systems". *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 95, p. 3341-3346.
20. **Cabeza, L. F.** 2014. "Advances in thermal energy storage systems: Methods and applications", Elsevier,
21. **Gil, A., Medrano, M., Martorell, I., Lázaro, A., Dolado, P., Zalba, B., Cabeza, L. F.** 2010. "State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1—Concepts, materials and modellization". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, p. 31-55.
22. **Hasnain, S.** 1998. "Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques". *Energy conversion and management*, vol. 39, p. 1127-1138.
23. **Kousksou, T., Bruel, P., Jamil, A., El Rhafiki, T., Zeraoui, Y.** 2014. "Energy storage: Applications and challenges". *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 120, p. 59-80.
24. **Badran, A. A., Jubran, B. A.** 2001. "Fuel oil heating by a trickle solar collector". *Energy conversion and management*, vol. 42, p. 1637-1645.
25. **Marchã, J., Osório, T., Pereira, M. C., Horta, P.** 2014. "Development and test results of a calorimetric technique for solar thermal testing loops, enabling mass flow and Cp measurements independent from fluid properties of the HTF used". *Energy Procedia*, vol. 49, p. 2125-2134.
26. **Liu, M., Saman, W., Bruno, F.** 2012. "Review on storage materials and thermal performance enhancement techniques for high temperature phase change thermal storage systems". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, p. 2118-2132.
27. **Wang, T., Mantha, D., Reddy, R. G.** 2013. "Novel low melting point quaternary eutectic system for solar thermal energy storage". *Applied energy*, vol. 102, p. 1422-1429.
28. **Cárdenas, B., León, N.** 2013. "High temperature latent heat thermal energy storage: Phase change materials, design considerations and performance enhancement techniques". *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 27, p. 724-737.
29. **Hänchen, M., Brückner, S., Steinfeld, A.** 2011. "High-temperature thermal storage using a packed bed of rocks—heat transfer analysis and experimental validation". *Applied Thermal Engineering*, vol. 31, p. 1798-1806.
30. **Martins, M., Villalobos, U., Delclos, T., Armstrong, P., Bergan, P. G., Calvet, N.** 2015. "New concentrating solar power facility for testing high temperature concrete thermal energy storage". *Energy Procedia*, vol. 75, p. 2144-2149.



31. **Schlipf, D., Schicktanz, P., Maier, H., Schneider, G.** 2015. "Using sand and other small grained materials as heat storage medium in a packed bed HTTESS". *Energy Procedia*, vol. 69, p. 1029-1038.
32. **Farid, M. M., Khudhair, A. M., Razack, S. A. K., Al-Hallaj, S.** 2004. "A review on phase change energy storage: materials and applications". *Energy conversion and management*, vol. 45, p. 1597-1615.
33. **Pardo, P., Deydier, A., Anxionnaz-Minvielle, Z., Rougé, S., Cabassud, M., Cognet, P.** 2014. "A review on high temperature thermochemical heat energy storage". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 32, p. 591-610.
34. **Silakhori, M., Jafarian, M., Arjomandi, M., Nathan, G. J.** 2017. "Comparing the thermodynamic potential of alternative liquid metal oxides for the storage of solar thermal energy". *Solar Energy*, vol. 157, p. 251-258.
35. **Abhat, A.** 1983. "Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials". *Solar energy*, vol. 30, p. 313-332.
36. **Fallahi, A., Guldentops, G., Tao, M., Granados-Focil, S., Van Dessel, S.** 2017. "Review on solid-solid phase change materials for thermal energy storage: Molecular structure and thermal properties". *Applied Thermal Engineering*, vol. 127, p. 1427-1441.
37. **Sharma, R., Ganesan, P., Tyagi, V., Metselaar, H., Sandaran, S.** 2015. "Developments in organic solid-liquid phase change materials and their applications in thermal energy storage". *Energy Conversion and Management*, vol. 95, p. 193-228.
38. **Pielichowska, K., Pielichowski, K.** 2014. "Phase change materials for thermal energy storage". *Progress in materials science*, vol. 65, p. 67-123.
39. **Buschle, J., W.-D. Steinmann, and R. Tamme,** 2006, "Latent heat storage for process heat applications", in *Proceedings of the 10th International Conference on Thermal Energy Storage ECOSTOCK*, Atlantic City, NJ, USA
40. **Li, Y., Wang, J., Tang, J., Liu, Y., He, Y.** 2009. "Conductive performances of solid polymer electrolyte films based on PVB/LiClO₄ plasticized by PEG200, PEG400 and PEG600". *Journal of Power Sources*, vol. 187, p. 305-311.
41. **Sarier, N., Onder, E.** 2012. "Organic phase change materials and their textile applications: an overview". *Thermochimica Acta*, vol. 540, p. 7-60.
42. **N'Tsoukpoe, K. E., Schmidt, T., Rammelberg, H. U., Watts, B. A., Ruck, W. K.** 2014. "A systematic multi-step screening of numerous salt hydrates for low temperature thermochemical energy storage". *Applied Energy*, vol. 124, p. 1-16.
43. **González-Roubaud, E., Pérez-Osorio, D., Prieto, C.** 2017. "Review of commercial thermal energy storage in concentrated solar power plants: Steam vs. molten salts". *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 80, p. 133-148.
44. **Janz, G. J., Allen, C. B., Bansal, N., Murphy, R., Tomkins, R.** 1979, "Physical properties data compilations relevant to energy storage. II. Molten salts: data on single and multi-component salt systems", *National Standard Reference Data System*,
45. **Alnaimat, F., Rashid, Y.** 2019. "Thermal Energy Storage in Solar Power Plants: A Re-



- view of the Materials, Associated Limitations, and Proposed Solutions”. *Energies*, vol. 12, p. 4164.
46. **Lund, H., Salgi, G.** 2009. “The role of compressed air energy storage (CAES) in future sustainable energy systems”. *Energy conversion and management*, vol. 50, p. 1172-1179.
 47. **Liu, H., Jiang, J.** 2007. “Flywheel energy storage—An upswing technology for energy sustainability”. *Energy and buildings*, vol. 39, p. 599-604.
 48. **Krajačić, G., Lončar, D., Duić, N., Zeljko, M., Arántegui, R. L., Loisel, R., Raguzin, I.** 2013. “Analysis of financial mechanisms in support to new pumped hydropower storage projects in Croatia”. *Applied energy*, vol. 101, p. 161-171.
 49. **Amiryar, M. E., Pullen, K. R.** 2017. “A review of flywheel energy storage system technologies and their applications”. *Applied Sciences*, vol. 7, p. 286.
 50. **Wicki, S., Hansen, E. G.** 2017. “Clean energy storage technology in the making: An innovation systems perspective on flywheel energy storage”. *Journal of cleaner production*, vol. 162, p. 1118-1134.
 51. **Cheng, H., Chen, C., Wu, S., Mirza, Z. A., Liu, Z.** 2017. “Energy evaluation of cropping, poultry rearing, and fish raising systems in the drawdown zone of Three Gorges Reservoir of China”. *Journal of Cleaner Production*, vol. 144, p. 559-571.
 52. **Sebastián, R., Alzola, R. P.** 2012. “Flywheel energy storage systems: Review and simulation for an isolated wind power system”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, p. 6803-6813.
 53. **Mahmoud, M., Ramadan, M., Olabi, A.-G., Pullen, K., Naher, S.** 2020. “A review of mechanical energy storage systems combined with wind and solar applications”. *Energy Conversion and Management*, vol. 210, p. 112670.
 54. **Martin, J. E., Rohwer, L. E., Stupak Jr, J.** 2016. “Elastic magnetic composites for energy storage flywheels”. *Composites Part B: Engineering*, vol. 97, p. 141-149.
 55. **Shen, P., Braham, W., Yi, Y., Eaton, E.** 2019. “Rapid multi-objective optimization with multi-year future weather condition and decision-making support for building retrofit”. *Energy*, vol. 172, p. 892-912.
 56. **Koko, S. P., Kusakana, K., Vermaak, H. J.** 2018. “Optimal power dispatch of a grid-interactive micro-hydrokinetic-pumped hydro storage system”. *Journal of Energy Storage*, vol. 17, p. 63-72.
 57. **Kusakana, K.** 2018. “Optimal operation scheduling of grid-connected PV with ground pumped hydro storage system for cost reduction in small farming activities”. *Journal of Energy Storage*, vol. 16, p. 133-138.
 58. **Tan, S. T., Hashim, H., Lim, J. S., Ho, W. S., Lee, C. T., Yan, J.** 2014. “Energy and emissions benefits of renewable energy derived from municipal solid waste: Analysis of a low carbon scenario in Malaysia”. *Applied Energy*, vol. 136, p. 797-804.
 59. **Cárdenas, B., Hoskin, A., Rouse, J., Garvey, S. D.** 2019. “Wire-wound pressure vessels for small scale CAES”. *Journal of Energy Storage*, vol. 26, p. 100909.
 60. **Liu, C., Li, F., Ma, L. P., Cheng, H. M.** 2010. “Advanced materials for energy storage”. *Advanced materials*, vol. 22, p. E28-E62.



61. **Whittingham, M.** 2011, "Electrochemical energy storage: Batteries and capacitors, in Fundamentals of Materials for Energy and Environmental Sustainability", Cambridge Univ. Press. p. 608-623.
62. **Arani, A. K., Karami, H., Gharehpetian, G., Hejazi, M.** 2017. "Review of Flywheel Energy Storage Systems structures and applications in power systems and microgrids". Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 69, p. 9-18.
63. **Guezgouz, M., Jurasz, J., Bekkouche, B., Ma, T., Javed, M. S., Kies, A.** 2019. "Optimal hybrid pumped hydro-battery storage scheme for off-grid renewable energy systems". Energy Conversion and Management, vol. 199, p. 112046.
64. **He, W., Wang, J.** 2018. "Optimal selection of air expansion machine in Compressed Air Energy Storage: A review". Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 87, p. 77-95.
65. **Whittingham, M. S.** 1978. "Chemistry of intercalation compounds: metal guests in chalcogenide hosts". Progress in Solid State Chemistry, vol. 12, p. 41-99.
66. **Hauch, A., Georg, A., Krašovec, U. O., Orel, B.** 2002. "Photovoltaically self-charging battery". Journal of the Electrochemical Society, vol. 149, p. A1208.
67. **Grätzel, M.** 2011, "Photoelectrochemical cells, in Materials For Sustainable Energy: A Collection of Peer-Reviewed Research and Review Articles from Nature Publishing Group", World Scientific. p. 26-32.
68. **O'regan, B., Grätzel, M.** 1991. "A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films". nature, vol. 353, p. 737-740.
69. **Saito, Y., Uchida, S., Kubo, T., Segawa, H.** 2009. "Energy-storable dye-sensitized solar cells with tungsten oxide charge-storage electrode". ECS Transactions, vol. 16, p. 27.
70. **Weber, A. Z., Mench, M. M., Meyers, J. P., Ross, P. N., Gostick, J. T., Liu, Q.** 2011. "Redox flow batteries: a review". Journal of applied electrochemistry, vol. 41, p. 1137.
71. **Wang, W., Luo, Q., Li, B., Wei, X., Li, L., Yang, Z.** 2013. "Recent progress in redox flow battery research and development". Advanced Functional Materials, vol. 23, p. 970-986.
72. **Rychcik, M., Skyllas-Kazacos, M.** 1988. "Characteristics of a new all-vanadium redox flow battery". Journal of power sources, vol. 22, p. 59-67.
73. **Joerissen, L., Garche, J., Fabjan, C., Tomazic, G.** 2004. "Possible use of vanadium redox-flow batteries for energy storage in small grids and stand-alone photovoltaic systems". Journal of power sources, vol. 127, p. 98-104.
74. **Wei, Z., Liu, D., Hsu, C., Liu, F.** 2014. "All-vanadium redox photoelectrochemical cell: An approach to store solar energy". Electrochemistry Communications, vol. 45, p. 79-82.
75. **Wei, Z., Shen, Y., Liu, D., Hsu, C., Sajjad, S. D., Rajeshwar, K., Liu, F.** 2016. "Geometry-enhanced ultra-long TiO₂ nanobelts in an all-vanadium photoelectrochemical cell for efficient storage of solar energy". Nano energy, vol. 26, p. 200-207.
76. **Liu, D., Zi, W., Sajjad, S. D., Hsu, C., Shen, Y., Wei, M., Liu, F.** 2015. "Reversible



- electron storage in an all-vanadium photoelectrochemical storage cell: synergy between vanadium redox and hybrid photocatalyst". *Acs Catalysis*, vol. 5, p. 2632-2639.
77. Hada, H., Takaoka, K., Saikawa, M., Yonezawa, Y. 1981. "Energy Conversion and Storage in Solid-state Photogalvanic Cells". *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, vol. 54, p. 1640-1644.
 78. Yu, M., Ren, X., Ma, L., Wu, Y. 2014. "Integrating a redox-coupled dye-sensitized photoelectrode into a lithium-oxygen battery for photoassisted charging". *Nature communications*, vol. 5, p. 5111.
 79. Liu, Y., Li, N., Wu, S., Liao, K., Zhu, K., Yi, J., Zhou, H. 2015. "Reducing the charging voltage of a Li-O₂ battery to 1.9 V by incorporating a photocatalyst". *Energy & Environmental Science*, vol. 8, p. 2664-2667.
 80. Yu, M., McCulloch, W. D., Beauchamp, D. R., Huang, Z., Ren, X., Wu, Y. 2015. "Aqueous lithium-iodine solar flow battery for the simultaneous conversion and storage of solar energy". *Journal of the American Chemical Society*, vol. 137, p. 8332-8335.
 81. Awad, A., Burns, A., Waleed, M., Al-Yasiri, M., Wen, D. 2018. "Latent and sensible energy storage enhancement of nano-nitrate molten salt". *Solar Energy*, vol. 172, p. 191-197.
 82. Rea, J. E., Oshman, C. J., Singh, A., Alleman, J., Parilla, P. A., Hardin, C. L., Olsen, M. L., Siegel, N. P., Ginley, D. S., Toberer, E. S. 2018. "Experimental demonstration of a dispatchable latent heat storage system with aluminum-silicon as a phase change material". *Applied energy*, vol. 230, p. 1218-1229.
 83. Zhang, Z., Yuan, Y., Alelyani, S., Cao, X., Phelan, P. E. 2017. "Thermophysical properties enhancement of ternary carbonates with carbon materials for high-temperature thermal energy storage". *Solar Energy*, vol. 155, p. 661-669.
 84. Bayon, A., Bader, R., Jafarian, M., Fedunik-Hofman, L., Sun, Y., Hinkley, J., Miller, S., Lipiński, W. 2018. "Techno-economic assessment of solid-gas thermochemical energy storage systems for solar thermal power applications". *Energy*, vol. 149, p. 473-484.
 85. Benitez-Guerrero, M., Valverde, J. M., Sanchez-Jimenez, P. E., Perejon, A., Perez-Maqueda, L. A. 2018. "Calcium-Looping performance of mechanically modified Al₂O₃-CaO composites for energy storage and CO₂ capture". *Chemical Engineering Journal*, vol. 334, p. 2343-2355.
 86. Benitez-Guerrero, M., Valverde, J. M., Perejon, A., Sanchez-Jimenez, P. E., Perez-Maqueda, L. A. 2018. "Low-cost Ca-based composites synthesized by biotemplate method for thermochemical energy storage of concentrated solar power". *Applied Energy*, vol. 210, p. 108-116.



Yenilikçi Ürün Tasarımında Fonksiyon Analizi ve Budama Yöntemi

Ali Kılıç^{1*}, Orhan Ersürmeli², Bahattin Dabanyastr³, Sadettin Kapucu⁴

ÖZ

Şirketlerin pazarda rekabet edebilme yetenekleri, yenilikçi ürün geliştirme kapasitelerine bağlıdır. Ancak, şirketlerin nasıl yenilikçi olabileceği konusunda belirsizlikler vardır. Son zamanlarda adından sıklıkla bahsedilen yenilikçi problem çözme yöntemleri, bu sorunun cevabı olabilir. Bu çalışmada, firmaların yenilikçi ürün geliştirebilme yeteneğine katkıda bulunacağı düşünülen fonksiyon analizi ve budama yönteminden bahsedilecektir. Fonksiyon analizi, bir ürünün bileşenlerinin arasındaki etkileşiminin görsel olarak ifade edilmesi ilkesine dayanır. Bu gösterimde nesnelere arasındaki işlev ve etkiler açıkça ortaya konur. Budama yöntemi ise fonksiyon modelindeki işlevsel olmayan bir unsurun kaldırılması, değiştirilmesi ya da orijinal sistemin varyasyonlarının oluşturulması işlemidir. Böylelikle sistemin ya da ürünün ideal nihai sonuca erişmesi için sistemdeki ya da diğer kaynakların kullanılmasını içerir. Bu analiz ve yöntemin uygulanmasıyla mevcut bir ürüne alternatif yenilikçi ürünler elde edilebileceği gibi, mevcut ürün bir patent ile korunuyorsa da söz konusu patentin kapsamını aşmak da mümkün olmaktadır. Bu çalışmada, gerçek bir endüstriyel ürün üzerinde fonksiyon analizi ve kırma yapılarak inovatif bir ürün elde etme yöntemlerinin uygulanabilirliği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Budama, fonksiyon analizi, fonksiyon modelleme, patent etrafından dolanma

Function Analysis and Trimming Method in Innovative Product Design

ABSTRACT

The ability of companies to compete in the market depends on their innovative product development capabilities. However, there is uncertainty about how they can be innovative. Innovative problem-solving methods, which are frequently mentioned recently, maybe the answer to this question. In this study, function analysis and trimming will be mentioned which will contribute to the ability of firms to develop innovative products. Functional analysis is the visual representation of the interaction between the components of a product. This representation clearly demonstrates the functions and effects between objects. Trimming method is the process of removing, modifying a non-functional element, or creating variations of the original system in the function model. This includes the use of existing or other resources in the system to achieve the ideal final result of the system or product. By applying the function analysis and trimming, it is possible to obtain alternative innovative products to existing ones, but it is also possible to overcome the said patent even if the present product is protected by a patent. In this study, to show the applicability of methods to obtain a new innovative product by applying the function analysis and trimming on a real industrial product has been applied.

Keywords: Circumventing around the patent, function analysis, function modelling, trimming

* İletişim Yazarı

Geliş/Received : 23.09.2020

Kabul/Accepted : 17.11.2020

¹ Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Şehitkamil, Gaziantep
akilic@gantep.edu.tr, ORCID: 0000-0002-3241-9944

² Örnek Makine Sanayi ve Ticaret A.Ş., Şehitkamil, Gaziantep,
orhanersurmeli@myinet.com, ORCID: 0000-0002-3560-9794

³ Örnek Makine Sanayi ve Ticaret A.Ş., Şehitkamil, Gaziantep, bahattin@ornekmakine.com, ORCID: 0000-0001-9682-874X

⁴ Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Şehitkamil, Gaziantep
kapucu@gantep.edu.tr., ORCID: 0000-0002-7061-9672



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Developing new products or developing alternatives for these products by circumventing the patents of existing products protected by patents has become the condition of being in the intensely competitive market. However, to realize these actions, it provides the opportunity to make multiple conceptual designs. There is a need for methods that are structured, easily applicable, easily taught/learned, and almost all technological information. There are many innovative and creative problem-solving methods used in research and development activities. These methods are divided into seven classes from poor to best in the literature [1] and given comparatively [1, 2]. Recently, it is seen that Theory of Inventive Problem Solving, (TRIZ), which has the above-mentioned features, has become quite popular and is used by many national and international companies [1, 3, 4]. It includes methods that can be used independently from each other within TRIZ, as well as an algorithmic structure that can be used integrated [3, 5, 6]. Engineering is providing the functions that the user wants in products and processes. Function analysis, one of the methods that can be used independently of TRIZ, is very useful for designers, developers, and problem-solving researchers. Function analysis allows a graphical representation of the current state and the relationship between functions and plays a key role in understanding and restating the problem [7, 8, 9].

In this study, brief information about function analysis and pruning methods will be given, and how to circumvent a patent using these methods, and how to turn the resulting solution into a new product will be discussed.

Function Analysis

For a product or process to work, it often needs to perform many functions. Understanding the functions of the product or process by engineers involved in complex system design is a key aspect of the work undertaken. A product or process can be defined in terms of its parts and functions. A function model defines how components interact with each other. A fully functional explanation consists of three parts: a subject, a verb, and an object.

Function modeling is the definition of how system components/elements interact with each other. Technical system components.

- The component can be an object or a field.
- System components are the main parts of the system design.
- Upper system components can also affect the system.
- The product is the focal element of the system. It is the main consideration why the system was designed.

The main purpose of function analysis is to define the disadvantages of an object, which are called malicious functions and even useful functions that are performed inadequately or excessively [13]. It can be mentioned that there are four basic types.

- Useful functional type
- Harmful functional type
- Over / Over functional type
- Poor functional type

Definition of the Problem

The problem that is the subject of this study arose when a company producing textile machinery asked its customer to use another bobbin holder produced in the USA instead of the standard bobbin holder used in



the machines to be produced for them. The component change requested by the customer company makes the bobbin change operation of the operator much easier. However, component change to be made causes a serious increase in machine unit cost due to the use of 144 pieces of bobbin holder in one machine. For this reason, the manufacturer decided to develop a new bobbin holder that can provide the ease of use desired by the customer in order not to lose its competitiveness. After the product analysis, it has been observed that the bobbin holder intended to be used in the machine is under protection with a patent numbered US 7,971,822 in the USA [14]. Therefore, the new bobbin holder to be developed by the manufacturer should have the same capabilities as the patent-protected bobbin holder and should not cause patent infringement. To solve this problem, first, the function analysis of the coil holder, which is protected by the patent, was performed.

Trimming

When the system is examined, it is seen that two elements performing the same function are used. Some of these elements can be given some of the functions, while other elements can be given some of the functions. Here, it should be noted that it is the use of the “Asymmetry” principle, one of the 40 principles of TRIZ [12]. For example, while one of the round head screws that restrict the movement of the coil carrier block operating in the groove and perform the locking function when necessary, the movement limitation function is given to one of the screws, while the other can only be assigned the locking function. A small steel ball can be used instead of round head screws to fulfill the locking function. A system that performs similar functions but consists of different elements from the previous one can be obtained. In addition, using the spring pressure on the element that performs the locking function instead of the spring pressure force applied to the coil carrier block, which changes with the weight of the coil installed, will provide both a decrease in the friction between the coil carrier block and the locking block and pressure independent of the coil weight.

Conclusion

In this study, function analysis and pruning method, which are thought to contribute to the ability to develop innovative products in a competitive environment, are mentioned. The method obtained by combining the usual methods of exceeding the scope of the patent with functional analysis and pruning methods has been applied to an industrial product. As a result of the study carried out to show the applicability of the proposed method, the output has been transformed from conceptual design to real product by making engineering designs and protected under patent.



1. GİRİŞ

Yeni ürün geliştirmek veya patent ile korunan mevcut ürünlerin patentlerinin etrafından dolanarak bu ürünlerin alternatiflerini geliştirmek, yoğun rekabetçi pazarda var olabilmenin koşulu haline gelmiştir. Ancak bu eylemleri gerçekleyebilmek için çoklu kavramsal tasarım yapabilmeye imkân sağlayan; yapısal, kolay uygulanabilir, kolayca öğretilir/öğrenilebilir ve neredeyse hemen hemen tüm teknolojik bilgileri içeren yöntem ya da yöntemlere ihtiyaç vardır. Araştırma geliştirme faaliyetlerinde kullanılmakta olan birçok yenilikçi ve yaratıcı problem çözme yöntemleri bulunmaktadır. Bu yöntemler literatürde zayıftan en iyiye doğru yedi sınıfa ayrılmış [1] ve karşılaştırılmalı olarak verilmiştir [1, 2]. Son zamanlarda, yukarıda bahsedilen özelliklere sahip “Yenilikçi/Yaratıcı Problem Çözme Teorisi, TRIZ’in” oldukça popüler hale geldiği ve birçok ulusal ve uluslararası firma tarafından kullanıldığı görülmektedir [1, 3, 4]. Yenilikçi/yaratıcı problem çözme teorisi içerisinde birbirinden bağımsız kullanılabilen yöntemleri barındırdığı gibi bütünleşik olarak kullanılacak algoritmik bir yapıya da sahiptir [3, 5, 6].

Genel anlamıyla mühendislik, kullanıcının istediği fonksiyonları ürünlerde ve süreçlerde sağlamasıdır. Yenilikçi/Yaratıcı Problem Çözme Teorisi, TRIZ’in bağımsız kullanılabilen yöntemlerinden biri olan Fonksiyon analizi, tasarımcılar, geliştiriciler ve problem çözen araştırmacılar için oldukça yararlıdır. Fonksiyon analizi mevcut durumu ve fonksiyonlar arasındaki ilişkiyi grafiksel olarak açık bir şekilde göstermeye olanak sağlamakta ve problemin anlaşılmasında ve yeniden ifade edilmesinde anahtar rolü oynamaktadır [7, 8, 9].

Makino ve ark. [9] etkiler veri tabanı ve çelişkiler matrisi ile birlikte fonksiyon analizinin kullanımına dayalı fikirler üretmek için bir yöntem önermiş ve önerdikleri bu yöntemin tarım makineleri alanında uygulamalarını incelemişlerdir. Frizziero ve Curbastro [10] lastik basıncını kontrol etmek için Kalite Fonksiyon Göçerimi (KFG) ve Yenilikçi Problem Çözme (TRIZ) yöntemlerinden problem tanımlama için fonksiyon analizinin nasıl kullanıldığı ve problem çözümünde diğer TRIZ yöntemlerinden nasıl yararlandığından bahsetmişlerdir. Michalakoudis ve ark. [11] fonksiyon analiz diyagramı ile Hata Türü ve Etkileri Analizi (FMEA) ve Değer Mühendisliği (VE) ile ürün güvenilirliğinin ve maliyetlerinin iyileştirilebileceğini göstermiştir.

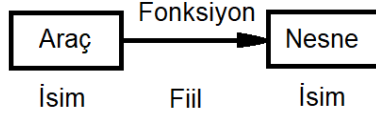
Bu çalışmada, fonksiyon analizi ve budama yöntemleri hakkında kısaca bilgi verilerek bir patentin etrafından bu yöntemler kullanılarak nasıl dolanılacağından ardından da ortaya çıkan çözümün nasıl yeni bir ürüne dönüşeceği bahsedilecektir.

2. FONKSİYON ANALİZİ VE MODELLEME

Belirli bir ürünün veya işlemin çalışması için genellikle birçok işlevi yerine getirme-



si gerekir. Karmaşık sistem tasarımıyla uğraşan mühendisler tarafından ürünün veya sürecin işlevlerini anlamak, üstlenilen çalışmanın kilit bir aşamasıdır. Bir ürün veya süreç, parçaları ve işlevleri açısından tanımlanabilir. Fonksiyon analiz kavramı “Değer Mühendisliği” analizindeki temel unsurlarından biri olarak “Fonksiyon Analizi” konseptini General Electric çalışanı olan Lary Miles 1950 yıllarda benzer fonksiyon ya da fonksiyonları yapan elemanların azaltılmasına yönelik olarak geliştirilmiş bir yöntemdir [12]. Fonksiyon grafiğinin tamamlanmasından sonra bu amacın yanı sıra zararlı fonksiyonların, faydalı ancak yetersiz fonksiyonlar, faydalı ancak aşırı fonksiyonların ve önemli dezavantajların detaylandırılması için kullanılmaktadır. Bir fonksiyon modeli bileşenlerin birbirleri arasındaki etkileşimlerinin nasıl olduğunu tanımlar. Tam işlevsel bir açıklama üç bölümden oluşur: bir özne, bir fiil ve bir nesne. Grafik olarak aşağıdaki gibi sistemimizin basitçe görsel haritasını sağlar.



Şekilden de anlaşılacağı üzere İngilizce gramer yapısına göre grafik gösterimi yapılmaktadır. Her ne kadar Türkçe olarak düşündüğümüzde cümle devrik olursa da doğru fonksiyon cümleleri bizi doğru problem tanımına, bu da doğru çözüme götürecektir.

Fonksiyon analizinde;

- Fonksiyon, aracın nesne üzerine yönelik doğrudan uyguladığı fiziksel etkidir.
- Nesne, kontrol edilecek olan bileşendir.
- Araç, nesnenin fiziksel parametrelerini (davranışını) kontrol eden bileşendir.

Fonksiyon cümlelerini kurarken dikkat edilmesi gereken hususlar vardır. Bunlar:

- Fonksiyon, nesnenin bir parametresini değiştirmelidir.
- Araç, Fonksiyon ve Nesne üçlüsü olmalıdır. Aksi takdirde sistem tamamlanmamış olur.
- İki anlamlı ya da belirsizlik içeren fonksiyonlar kullanılmamalıdır.

Fonksiyon modelleme, sistem bileşenlerinin/elemanlarının birbirleriyle nasıl bir etkileşim içerisinde olduklarının tanımlanmasıdır. Teknik sistem bileşenleri;

- Bileşen bir nesne ya da bir alan olabilir.
- Sistem bileşenleri sistem tasarımının ana parçalarını oluşturan elemanlardır.
- Üst sistem bileşenleri de sistemi etkileyebilir (ancak bunlar üzerinde çalışılan sis-

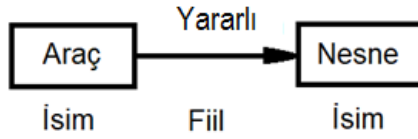


temin bir parçası olarak tasarlanmamışlardır). Fakat bunlar bir fayda sağlayacaksa kaynak olarak yararlanabilir.

iv. Ürün ise sistemin odak elemanıdır. Sistemin neden tasarlandığının ana düşüncesi-
dir.

Fonksiyon analizinin en temel amacı bir nesnenin dezavantajlarını ki bu zararlı fonk-
siyonlar olarak isimlendirilmekte ve hatta yetersiz ya da fazla bir biçimde yerine geti-
rilen faydalı fonksiyonları tanımlamaktır [13]. Dört temel tip (grafiksel olarak göste-
rimler yanlarında verilmiştir) olarak ifade edilebilir.

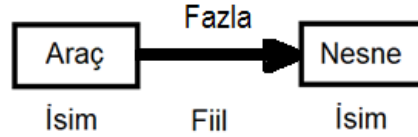
1. Yararlı işlevsel tip.



2. Zararlı işlevsel tip.



3. Fazla/Aşırı işlevsel tip.



4. Yetersiz işlevsel tip.



3. ÜZERİNDE ÇALIŞILAN PROBLEMİN TANIMI

Bu çalışmaya konu olan problem, tekstil makineleri üreten bir firmanın Amerikalı müşterisi tarafından kendileri için üretilecek makinelerde kullanılan bobin tutucu olarak isimlendirilen bir bileşenin (Şekil 1 de verilmiştir) yerine Amerika da üretilen bir bileşenin kullanmasını istemesi üzerine ortaya çıkmıştır. Bu değişimin gerekçesi olarak da Şekil 1' de gösterilen bobin tutucu sistemine bobin yükleme yaparken her

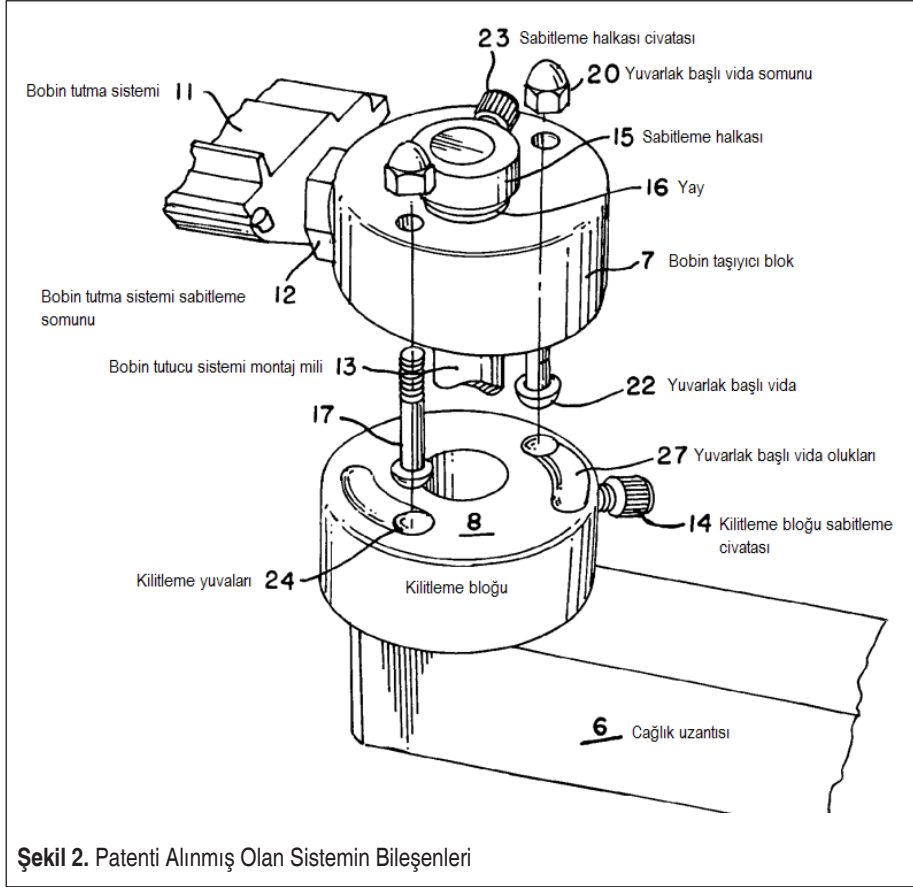


Şekil 1. Hali Hazırda Kullanılan Bobin Tutucu Sitemi. a) Çalışma Pozisyonu, b) Kilitinin Açılması ve Bobin Yükleme İçin Döndürülmesi.

iki elin de kullanılmasının ve bobin yükleme işleminden sonra çalışma pozisyonun döndürüldüğünde Şekil 1 (b) de gösterilen mandalın indirilmesi gerekmektedir. Bobin yükleme yapıldıktan sonra çalışma pozisyonuna döndürülmesi ve kilitlenmesi için mandalın indirilmesi gerekmektedir. Kullanılması istenen bileşenin ise yükleme sırasında herhangi bir kilit açmasına ve yükleme sırasında çift el kullanılmasına ve çalışma pozisyonuna döndürüldüğünde ise kitleme için yükleme yapan çalışanın herhangi bir hareket etmesine gereksinim duymamasıdır. Müşteri firmanın istediği bileşen değişikliği, operatörün bobin değiştirme operasyonunu oldukça kolaylaştırmaktadır. Ancak yapılacak bileşen değişikliği bahsi geçen bobin tutucudan bir makinede 144 adet kullanılmasından dolayı makine birim maliyetinde ciddi bir artışa sebep olmaktadır. Bu sebeple, üretici firma rekabet edebilirliğini kaybetmemek için müşterinin istediği kullanım kolaylığını sağlayabilecek yeni bir bobin tutucu geliştirmeye karar vermiştir. Yapılan ürün analizinden sonra makinede kullanılması istenen bobin tutucunun Amerika’da US 7,971,822 no.lu bir patenle koruma altında olduğu görülmüştür [14]. Dolayısıyla üretici firma tarafından geliştirilecek olan yeni bobin tutucunun hem patenle korunan bobin tutucuyla aynı yeteneklere sahip olması hem de patent ihlaline sebep olmaması gerekmektedir. Bu problemin çözümü için öncelikli olarak patent ile korunan bobin tutucunun Fonksiyon analizi gerçekleştirilmiştir.

3.1 Problemin Grafıksel Modellenmesi

Cağlıklar, iplik işleme makinesiyle bağlantılı olarak kullanılmak üzere birçok iplik bobini taşımak ve düzenlemek için kullanılmaktadır. Cağlıktaki boşalan masuranın çıkarılıp yerine yeni iplik bobinin takılması için bobin tutucu döndürülerek yükleme pozisyonuna getirilmeli ve yükleme yapıldıktan sonra çalışma pozisyonuna geri döndürülmelidir. Bu işlem sırasında da operatörün hızlı bir şekilde değişimi gerçekleştirebilmesi için çalışma konumunda kilitlemeyi yapacak kilitleme sisteminin otomatik olarak yapılması gereklidir. Söz konusu otomatik kilitlemeyi yapabilecek patenti almış olan bobin tutucu sistemi Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Patenti Alınmış Olan Sistemin Bileşenleri

4. FONKSİYON ANALİZİ VE BUDAMA YÖNTEMLERİNİN PATENT KAPSAMINI AŞMADA KULLANILMASI

Budama modern TRIZ'in bir yöntemi olup fonksiyon analizine yapılmışsa kolayca uygulayabilecek bir yöntemdir. Sistemi ya da süreci basitleştirme işlemi olarak adlandırmak mümkündür. Budama yöntemi fonksiyon modelindeki işlevsel olmayan bir unsurun ve/veya fonksiyonun kaldırması, fonksiyonun başka bir elamana/unsura atanmasını ya da orijinal sistemin varyasyonlarını oluşturarak ideal nihai sonuca erişmesi için sistemdeki mevcut ya da diğer kaynakları kullanma işlemidir. Daha da genel anlamıyla budama maliyet azaltma işlemidir. Unsur ya da işlem azaltılmasıyla sistem ya da süreç daha ucuz ve üretimi ya da işletilmesi daha kolay olacaktır.

Budama, bir teknik sistemin karmaşıklığının ve parça sayısının azaltılarak sorunlu bileşenleri ortadan kaldırılmasıdır. Özellikle de patent kapsamını aşma tasarımı yap-



mak veya patent güçlendirme için önemli bir adımdır. Budama işleminin önemli bir kısmı, analiz edilen Mühendislik Sisteminin hangi bileşenlerinin budanabileceği ve nasıl yapılacağına karar vermektir. Nelerin kırılabileceğine ilişkin kararlar, Fonksiyon Analizinin çıktılarına dayanılarak verilir.

Patent haklarına ihlalde bulunmadan bir patentin kapsamını aşma tasarımının literatürdeki yöntemleri [15] şu şekildedir.

- Eksiltme yöntemi: elemanların sayısını azaltmayı;
- İkame yöntemi: İstemlerde tarif edilen teknik yerine yenisini kullanmayı;
- Ekleme ve birleştirme yöntemi: yeni tasarımın istenilen tüm gereksinimleri karşılayacak şekilde yol / fonksiyon / sonuç şartının ekleme ve/veya birleştirme yoluyla değiştirilmesi

Söz konusu patent ve istemler incelendiğinde klasik yöntemlerle yapılan patent kapsamını aşma çalışmaları yetersiz kaldığı için budama yönteminin kullanılmasına odaklanılmıştır. Yukarıda bahsedilen maddelerin nasıl yapılacağı açık değildir. Bu yöntemlerin budama ile birleştirilmesi anılan yetersizliği gidererek daha kullanışlı bir yöntem ortaya çıkarmaktadır.

4.1 Budama Temel Kuralları

Budama yöntemi fonksiyon modelindeki işlevsel olmayan bir unsurun kaldırması, değiştirilmesi ya da orijinal sistemin varyasyonlarını oluşturarak ideal nihai sonuca erişmesi için sistemdeki mevcut ya da diğer kaynakları kullanma işlemidir.

Budamanın üç temel kuralı vardır. Bunlar [12, 16, 17, 18];

Kural I: Artık sistemde o fonksiyona ihtiyacınız yoktur. Eğer verilen fonksiyonun nesnesi sistemden yok edilebilirse sistemdeki özne unsuru budanabilir.

Kural II: Sistemin nesnesi, fonksiyonu kendi kendine yerine getirebilir. Eğer fonksiyonun nesnesi fonksiyonu kendi kendine yerine getirebilirse sistemdeki özne unsuru budanabilir.

Kural III: Başka bileşenler istenilen fonksiyonu yerine getirebilir. Eğer verilen fonksiyon, sistemdeki ya da üst sistemdeki diğer bir bileşene transfer edilebilirse, sistemdeki özne unsurunu mevcut sistemdeki ya da üst sistemdeki bazı bileşenler fonksiyonu yerine getirebilirse ya da yeni bir bileşene ek görev olarak verilebilirse budama yapılabilir.

Mühendislik sistemindeki gelişmeyi en üst düzeye çıkarmak için, en önemli veya temel dezavantajlara sahip bileşenleri budanmalıdır. Bunlar; ürün maliyetlerini düşürmek için pahalı bileşenler, yüksek enerji tüketen veya bakım gerektiren bileşenler, üretimi veya operasyonel karmaşıklığı azaltmak için parça sayısını azaltma ve/veya



karmaşık parçalar, alt sistem ya da üst sistem ile uyumlu olmayan parçalar veya özel bir durum için gereksiz özelliklerle ilgili bileşenler olabilir. Bir bileşenin işlevlerinin diğerlerine yeniden dağıtılması için kabul edilebilir alternatifler mevcut değilse, o bileşeni budamaktan kaçınılmalıdır.

Birleşik budama yöntemini uygulamak için burada bahsedilenlerin kabaca oluşturulan fonksiyon model grafiği Şekil 3’te verilmiştir. Şekil 3 fonksiyon modelleme sistemdeki unsurların/bileşenlerin birbirleriyle olan etkileşimini göstermektedir.

Şekil 3 fonksiyon modelinde göze çarpan; şeklin simetrik olması ve aynı işlevi yapan benzer bileşenler kullanılmasıdır. Örneğin, kilitleme bloğu iki tane yuvarlak başlı vida oluklarını ve kilitleme yuvalarını barındırmaktadır. Yine aynı şekilde bobin taşıyıcı blok üzerinde, aynı işlevi yapan iki adet yuvarlak başlı vida ve somunları vardır. Bu yuvarlak başlı vidalar, yuvarlak başlı vida olukları ile temas halinde olup sürtünme nedeniyle aşınma oluşturmaktadır. Tablo 4’te zararlı fonksiyonların, önemli dezavantajların ve aşırı fonksiyonların detaylandırılması verilmiştir.

Tablo 1. Zararlı Fonksiyonların ve Önemli Dezavantajların Detaylandırılması

Fonksiyon Çeşitleri	Tanımlanabilen Dezavantajlar
Zararlı fonksiyonlar	<ul style="list-style-type: none">• Yayın (16) yetersiz baskı yapması sonucunda yetersiz kilitleme kuvveti• Yuvarlak başlı vidaların yuvarlak başlı vida oluğunu aşındırması• Aşınma nedeniyle bobinin istenilen konumdan sapması
Faydalı, ancak yetersiz fonksiyonlar	<ul style="list-style-type: none">• Masuranın istenilen konumda kalması için Bobin taşıyıcı bloğa baskı yetersiz. Dezavantaj 1; bobin istenilen konumda kalmaz• Dönüş hareketinin kısıtlanması iki adet yuvarlak başlı vida, yuvarlak başlı vida olukları ile temas halinde olup sürtünmektedir. Dezavantaj 2; sürmek/döndürmek için büyük enerji gerektirmesi• Yuvarlak başlı vida, yuvarlak başlı vida oluklarının aşınması. Dezavantaj 3 bobinin istenilen konumdan sapması
Faydalı, ancak aşırı fonksiyonlar	<ul style="list-style-type: none">• Aynı işlevi gerçekleştiren ikişer adet yuvarlak başlı vida, somun, kilitleme yuvası ve yuvarlak başlı vida oluşu vardır.

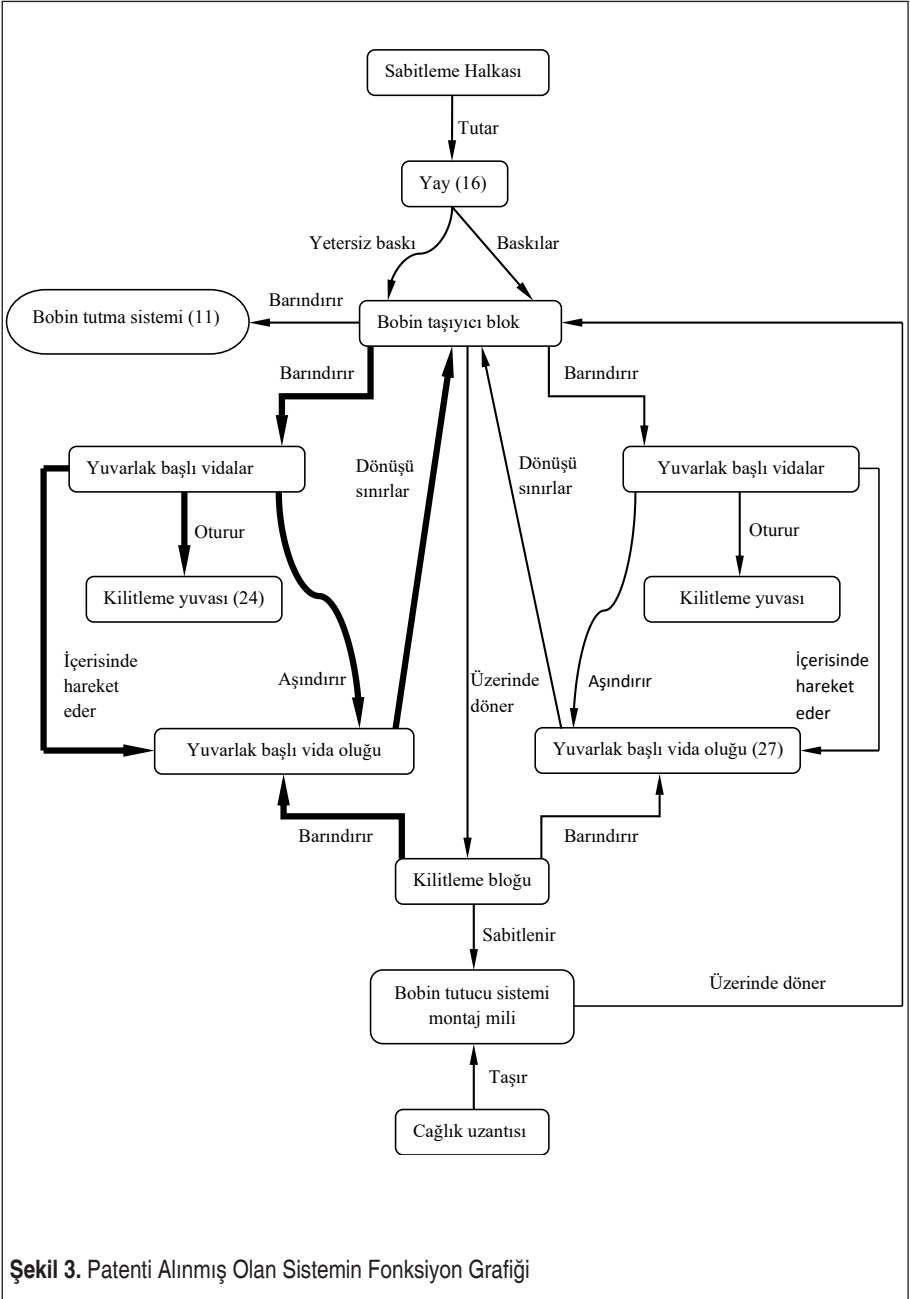
Bu aşamada problem tanımı artık yapılmış olup, çözüm için uygun TRIZ araçları seçilip uygulanabilir. Örneğin en basit hali ile Yenilikçi Yaratıcı Problem Çözme Teorisi olarak bilinen TRIZ’in 40 prensibinden “Asimetri” prensibinin kullanılması ile iki

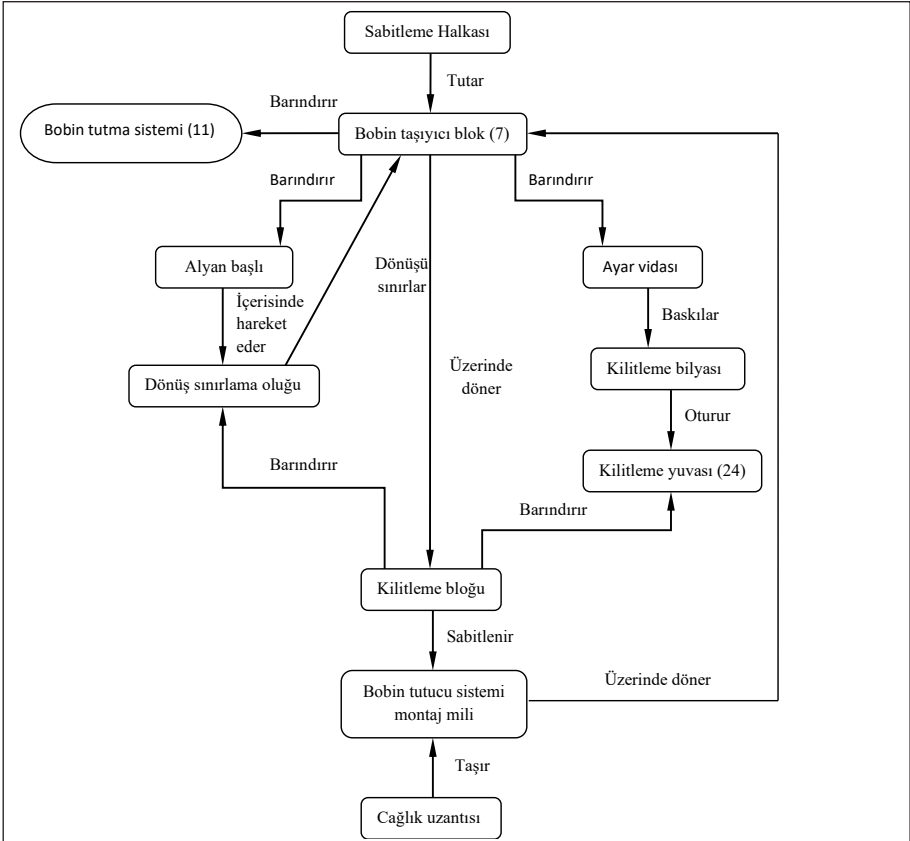


simetrik yuvarlak başlı vida ile sürtünme yaratmak yerine asimetri yaparak tek taraflı sürtünmeye düşürülebilir [12]. Ayrıca, diğer dezavantajların yok edilmesine yönelik TRIZ yöntemlerinden herhangi birisi veya birkaçı kullanılabilir. Makaleye konu olan budamaya odaklanılacak olursa en belirgin dezavantaj aynı fonksiyona/işleve sahip bileşenlerin (ikişer adet yuvarlak başlı vida, somun, kilitleme yuvası ve yuvarlak başlı vida oluğu) kullanılmasıdır. Bu elemanların bir kısmına işlevlerin bir kısmı verilirken diğer elemanlar işlevlerin bir kısmı verilebilir.

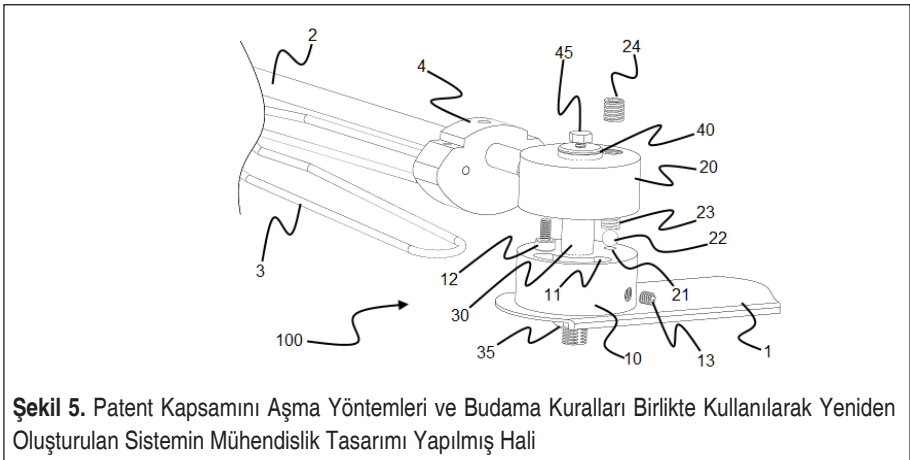
Örneğin, oluk içerisinde çalışan bobin taşıyıcı bloğun hareketini sınırlayan ve gerektiğinde de kilitleme işlevini yapan yuvarlak başlıklı vidalardan birisine hareket sınırlama fonksiyonu verilirken diğerine sadece kilitleme işlevi atanabilir. Önceki tasarımda aynı işlevi yapan iki bileşen yerine, yeni tasarımda kilitleme işlevini yerine getiren bir bileşen ve hareket kısıtlaması yapan bir bileşen olacaktır. Ayrıca, hareket kısıtlaması yapan bileşeni bobin taşıyıcı bloğa sabitleme için yuvarlak başlı vida somuna ihtiyaç yoktur. Bobin taşıyıcı blok dış açılıp somun olarak kullanılabilir (yuvarlak başlı vida somunu işlevi bobin taşıyıcı bloğa atanmıştır). Kilitleme işlevini yerine getirmesi içinde yuvarlak başlı vida yerine bilye habbesi kullanılabilir. Yeni tasarımda kilitleme işlevini yerine getirecek olan bileşen vida ve bilye habbesine dönüştürülmüştür. Benzer şekilde yuvarlak başlı vida somunu işlevi bobin taşıyıcı bloğa atanmıştır. Ayrıca, takılan bobinin ağırlığı ile değişen ve bobin taşıyıcı bloğa yapılan yay (16) baskısı kuvveti yerine kilitleme fonksiyonunu yapan eleman (bilye habbesi) üzerine yay baskısını kullanmak hem bobin taşıyıcı blok ile kilitleme bloğu arasındaki sürtünmenin azalmasını hem de bobin ağırlığından bağımsız bir baskı oluşturulabilmesi sağlayacaktır. Bu tasarım ile yukarıdaki tablo4 de bahsedilen olumsuzluklarında giderildiği görülmekle birlikte, benzer işlevleri yerine getiren ancak öncekinden farklı elemanlardan oluşan bir sistem elde edilmiştir.

Bu öngörülen değişikliklerle fonksiyon grafiğinin son hali Şekil 4'teki gibi olacaktır. Bu grafiğin ürün olarak ise hali Şekil 5 olarak verilmiştir. Yukarıda bahsedildiği üzere ürün Amerika pazarında yer alacağına göre Amerikan patenti almak üzere başvuruda bulunulması kaçınılmazdır. Bu hem yeniden tasarlanan ürünün önceki patentten farklı olduğunun ispatı olacağı gibi, hem de ürünün koruma altına alınmış olmasına yöneliktir. Yukarıda bahsedilenlerden anlaşılacağı üzere mevcut patentli ürünün yetersizlikleri giderilmiştir. Tanımlanan giderilmiş yetersizlikler ve yerine getirilen işlevler istemler olarak ifade edilmiştir [19]. Bu tanımlanan istemlere referanslarda verilen US 9604816B2 patentten erişmek mümkündür. Yapılan araştırma raporunda, alınan patentte de atıfta bulunulan ve etrafından dolanılan US 7971822 no.lu patent ile yeniden tasarlanan arasında "A Tekniğin bilinen durumunu belirten ama buluşla tam olarak ilgili olmayan doküman" olarak nitelenmiştir. Yine gelen araştırma raporunda US20080173742A1 no.lu patentle de "A" kategorisinde olduğu belirtilmiştir. Dolayısıyla burada bahsedilen yöntemin etkili olduğunun göstergesidir.





Şekil 4. Patent Kapsamını Aşma Yöntemleri ve Budama Kuralları Birlikte Kullanılarak Yeniden Oluşturulan Sistem



Şekil 5. Patent Kapsamını Aşma Yöntemleri ve Budama Kuralları Birlikte Kullanılarak Yeniden Oluşturulan Sistemin Mühendislik Tasarımı Yapılmış Hali



5. SONUÇ

Bu çalışmada rekabetçi ortamda yenilikçi ürün geliştirebilme yeteneğine katkıda bulunacağı düşünülen fonksiyon analizi ve budama yönteminden bahsedilmiştir. Alışlageldik patent kapsamını aşma yöntemlerinin, fonksiyonel analizi ve budama yöntemleri ile birleştirilmesiyle elde edilen metodun bir endüstriyel ürüne uygulanması yapılmıştır. Her iki yöntemin en temel ortak noktası mühendislik sistemi oluşturan elemanlardan bazılarının sistemden atılması ve/veya fonksiyonunun başka bir elemana atanmasıyla gerçekleştirilebilmesidir. Önerilen yöntemin uygulanabilirliğini göstermek üzere yapılan çalışma sonucunda elde edilen çıktının mühendislik tasarımları yapılarak kavramsal tasarımdan gerçek ürüne dönüşmesi ve patent altında korunması sağlanmıştır. Patent başvurusunda da patent ihlali olup olmadığı araştırılması istenildiğinden özellikle etrafından dolanılan patente atıfta bulunulmuştur. Araştırma raporunda verilen bilgilere göre bu çalışmada önerilen yaklaşımın mevcutlarından belirgin olarak farklı, daha etkin olduğu ve önerilen yaklaşım ile patentleşebilecek ürünler geliştirebileceği gösterilmiştir.

KAYNAKÇA

1. **Zusman A., Zlotin B.** 1998. "Overview of Creative Methods," <https://www.metodolog.ru/triz-journal/archives/1999/07/e/index.htm>, son erişim tarihi: 22.09.2020.
2. **Dirim, Ş. S.** 2006. "Triz: Yaratıcı Problem Çözme Teorisi ve Diğer Problem Çözme Yöntemleriyle Karşılaştırma," Yüksek Lisans, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
3. **Orloff, M. A.** 2006. *Inventive Thinking through TRIZ*, ISBN 978-3-540-33223-7, Springer-Verlag, Berlin.
4. **Kaya, M. O.** 2016. "Dünya'da ve Türkiye'de Triz Kullanan Şirketler," <https://medium.com/@metinokaya/dunyada-ve-turkiye-de-triz-kullanan-sirketler-52fb26beea8c>, son erişim tarihi: 22.09.2020.
5. **Souchkov, V.** 2015. "A Brief History of TRIZ," *Journal*, <https://triz-journal.com/a-brief-history-of-triz/>, son erişim tarihi: 22.09.2020.
6. **Ekmekçi, İ., Koksal, M.** 2015. "Triz Methodology and An Application Example for Product Development," *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 195.Suppl. C, 2689-2698. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.06.481>
7. **Kowalick, J. F.** 1996. "Tutorial: Use of Functional Analysis And Pruning, with Triz and Ariz, to Solve "Impossible- to - Solve" Problems," <https://triz-journal.com/tutorial-use-functional-analysis-pruning-triz-ariz-solve-impossible-solve-problems/>, son erişim tarihi: 22.09.2020.
8. **Royzen, Z.** 1999. "Tool, Object, Product (TOP) Function Analysis," TRIZCON99, The First Symposium on TRIZ Methodology and Application of Altshuller Institute for TRIZ Studies, Mart 7-9,1999, Novi, Michigan.



9. **Makino, K., Sawaguchi, M., Miyata, N.** 2015. "Research on Functional Analysis Useful for Utilizing TRIZ," *Procedia Engineering*, 131, 1021-1030. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.420>
10. **Frizziero, L., Curbastro, F. R.** 2014. "Innovative Methodologies in Mechanical Design: Qfd vs Triz To Develop an Innovative Pressure Control System," *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 6608, 966-970.
11. **Michalakoudis, J., Childs, P., Aurisicchio, M., Harding, J.** 2017. "Using Functional Analysis Diagrams to Improve Product Reliability and Cost," *Advances in Mechanical Engineering*, 9.1, 1–11. <https://doi.org/10.1177/1687814016685223>
12. **Miles, E. R.** 1989. "Techniques of Value Analysis and Engineering." *Ekistics*, Cilt 56, Sayı 336/337, Sayfa 119–121.
13. **Gadd, K., Goddard, C.** 2011. *TRIZ for Engineers: Enabling Inventive Problem Solving*, ISBN:9780470741887, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA.
14. **Terninko, J.** 2000. "Su-Field Analysis," <https://triz-journal.com/su-field-analysis/>, son erişim tarihi: 22.09.2020
15. **Crow, M. A.** 2011. "Pivotal yarn package holder." U.S. Patent No. 7,971,822.
16. **Kapucu, S.** 2013. "TRIZ ile Patent Kapsamını Aşma Tasarımı," *Mühendis ve Makine*, Cilt 54, Sayı 643, Sayfa 54-62.
17. **Sheu, D. D., Hou, C. T.** 2015. "TRIZ-based Systematic Device Trimming: Theory and Application," *Procedia Engineering*, 131, 237-258. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.385>.
18. **San, Y. T., Jin, Y. T., Li, S. C.** 2009. *TRIZ- Systematic Innovation in Manufacturing*, ISBN: 983804026, Firstfruits Publishing, Malaysia.
19. **Li, M., Ming, X., He, L., Zheng, M., Xu, Z.** 2015. "A TRIZ-based Trimming Method for Patent Design Around," *Computer-Aided Design*, 62, 20-30. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2014.10.005>.
20. **Ersurmeli, O, Dabaniyasti B, Kapucu, S.** 2017. "Bobbin holder adapter." U.S. Patent No. 9,604,816.

Soğuk Püskürtme Teknolojisi ve Uygulamaları

Elif Tekin¹, Serden Uyum², Buğra Karahan³, Kadir Cihan Tekin⁴, Uğur Malayoğlu^{5*}

ÖZ

Soğuk püskürtme, katı tozların yakınsak/ıraksak türde bir nozul vasıtasıyla altlığa doğru hızlandırıldığı bir katı hal biriktirme işlemidir. Kaplama birikimi püskürtülen parçacıkları ertmeden gerçekleşir. Püskürtülen parçacıklar yüksek kinetik enerjiye sahip olduğu için çarpma esnasında altlığa yapışır. Başarılı bir yapışma sağlamak için toz parçacıkların, kendi malzeme özelliklerine bağlı olan kritik hız değerini çarpma esnasında aşması gereklidir. Metaller, seramikler, kompozitler ve polimerler gibi farklı malzemeler soğuk püskürtme kullanılarak biriktirilebilir. Soğuk püskürtme, yüzey kaplaması elde etmek için yeni ve gelecek vaat eden bir teknolojidir ve biriktirme için termal enerji yerine kinetik enerji kullandığından termal püskürtmeye göre çeşitli teknolojik avantajlar sunar. Sonuç olarak, kalıntı gerilmeler, oksidasyon ve istenmeyen kimyasal reaksiyonlar önlenebilir. Soğuk püskürtme teknolojisi endüstride birçok uygulama alanına sahiptir. Birçok endüstride kullanılan bileşenlerin korunması ve onarımı amacıyla geliştirilmiştir. Son yıllarda soğuk püskürtme işlemi elektronik sistemlerin tamiri, eklemeli imalat, kaynak, sert lehimleme, yüzey koruma, tıbbi cihazlar ve tıbbi malzemeler gibi uygulama alanlarında kullanılmaktadır. Bu çalışma, soğuk püskürtme işleminin tarihsel gelişimini, temel ilkelerini ve özelliklerini, yapışma mekanizmasını ve endüstriyel uygulama alanlarını kısaca gözden geçirerek soğuk püskürtme işlemini özetlemektedir.

Anahtar Kelimeler: Soğuk püskürtme, kaplama, kritik hız, aşınma, korozyon

Cold Spray Technology and its Applications

ABSTRACT

Cold spray (CS) is a solid-state deposition process in which solid powders are accelerated towards the substrate via a converging/diverging nozzle. Coating deposition occurs without melting the sprayed particles. Spray particles adhere to the substrate on impact because of their high kinetic energy. For successful bonding, powder particles have to exceed a critical velocity on impact, which is dependent on the properties of the particular spray material. Different materials such as metals, ceramics, composites and polymers can be deposited using CS. CS is a novel and promising technology to obtain surface coating, offering several technological advantages over thermal spray since it utilizes kinetic energy rather than thermal energy for deposition. As a result, residual stresses, oxidation and undesired chemical reactions can be avoided. Cold spray technology has many applications in the industry. It has been developed for the protection and repair of components used in many industries. In recent years, cold spray process has been used in application fields such as repair of electronic systems, additive manufacturing, welding, brazing, surface protection, medical devices, and medical materials. This study summarizes the cold spray process by briefly reviewing the historical development, basic principles and features, adhesion mechanism and application areas of the cold spray process.

Keywords: Cold spray, coating, critical velocity, wear, corrosion

* İletişim Yazarı

Geliş/Received : 28.09.2020

Kabul/Accepted : 04.01.2021

¹ Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir elif_elden@hotmail.com.tr, ORCID: 0000-0001-9162-7172

² Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir serden.uyum@ogr.deu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-1120-4709

³ Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir karahanbugra@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8053-056X

⁴ Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İzmir kadir.tekin@deu.edu.tr, ORCID: 0000-0001-7507-6550

⁵ Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İzmir ugur.malayoglu@deu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-3196-1475

EXTENDED ABSTRACT

Cold spray is a unique manufacturing technology that allows many metals to be deposited quickly on substrates at temperatures below their melting points. In the cold spray process, the particles are accelerated by the supersonic gas jet at a temperature always lower than the melting point of the powder material and the coating is formed from the particles at solid state. As a result, the harmful effects of high temperature oxidation, evaporation, melting, crystallization, residual stresses, debonding, harmful gas release, and other common problems observed in conventional thermal spray methods are minimized or eliminated. Eliminating the detrimental effects of high temperature on coatings and surfaces offers significant advantages and new possibilities and makes cold spray promising for many industrial applications.

In the cold spray method, solid powder particles with a diameter of 5-100 μm are raised to velocities between 300-1200 m/s in a preheated supersonic gas jet and deposited on a hard substrate such as metal, ceramic or glass. In order to achieve good adhesion to the substrate, the particle velocity must exceed the minimum critical velocity value that will create hydrodynamic shear instability at the adhesion interface. If the impact velocity is too low, the particles will bounce off the substrate surface and erode the surface as in the sandblasting process, or some particles will only physically embed into the surface. The minimum impact velocity required to achieve hydrodynamic shear instability in cold spray is called the critical velocity. If the powder particles exceed the critical velocity and the powder material composition is suitable for the process, the powder particles are exposed to adiabatic heating when the impact occurs and deform plastically under very high shear deformation rate. As a result, they become flat and adhere to the substrate surface. The critical velocity value varies considerably when using different powder materials. In addition, the properties and process parameters of the material being sprayed can affect the critical velocity. As a result of the studies carried out, it was stated that as the substrate temperature, particle temperature or particle size increased, the formation of adiabatic shear instability became easier, and as a result, it was found that the critical velocity value decreased.

Cold spray is divided into two categories, low- and high-pressure methods, according to the way the powder material is injected into the nozzle throat. In low-pressure cold spray, generally air or nitrogen gas with a relatively low pressure (0.5-1 MPa) is preheated in the gas heater and forced into a convergent/divergent type nozzle. Gas passing through the nozzle throat reaches a velocity in the range of 300-600 m/s in the supersonic divergent cross section. Meanwhile, solid powder particles are radially inserted from the powder feed unit to the divergent section close to the nozzle throat and are accelerated through the nozzle towards the substrate. In high pressure cold spray, high pressure air, nitrogen, helium gas or a mixture of these are first compressed to a pressure in the range of 1-4 MPa and then flows through the system in two different ways. In the first path, high pressure gas passes through the powder feeder to transport the particles to the spray gun. In the second path, the high-pressure gas passes through the electric gas heater and is preheated up to a temperature of about 1100 °C. This provides an additional increase in gas velocity and consequently the particle velocity is increased. Two separate paths converge near the nozzle inlet. In the final stage, powder particles reach supersonic velocities, exit the gun nozzle, and impact on the substrate to form a coating.

The main advantages of high-pressure cold spray over low-pressure cold spray are being able to select a larger number of materials and achieve higher deposition quality. In the low-pressure cold spray process, the powder deposition efficiency is less since the number of particles exceeding the critical velocity is low. While the deposition efficiency of up to 90% is provided in the high-pressure system, the deposition efficiency of only less than 50% can be achieved in the low-pressure system. The low-pressure cold spray system is more flexible, portable and cost effective compared to the high-pressure system. Thanks to its portability, coating can be applied to repair parts at the workplace without the need to disassemble components. On the other hand, investment costs for high pressure cold spray equipment are high and it



may not be possible to apply coating on the parts on-site since industrially produced systems do not have dimensions suitable for transportation.

Cold spray coating technology has been developed to protect and repair components used in many industries. These industries include aviation, automotive, transportation, casting, petrochemical facilities, mining, metal processing, electronics, marine, ceramic and glass production. The thickness of the cold spray coating has virtually no limitations for most metal and metal matrix composites. Considering this fact, it has been successfully applied in recent years as additive manufacturing technology to manufacture solid components and repair damaged parts. This development significantly expands the areas of cold spray technology. Cold spray technology, a new member of the additive manufacturing family, has great potential to produce components with circular structures such as cylinder walls and flanges. It also allows the production of structures with complex geometries by using well-designed masks or molds.

Cold spray technology continues to be developed to meet the needs of applications with high performance requirements. This review summarizes the information about cold spray by briefly reviewing the historical development, basic principles and properties, adhesion mechanism and applications of the cold spray process. It also provides an overview of recent and emerging developments in the process and the potential of this technology.

1. GİRİŞ

Soğuk püskürtme, birçok metalin ergime sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda altlık parçaların üzerine hızlıca biriktirilmesine imkân tanıyan yegâne imalat teknolojisidir. Daha önceden, metal malzemelerin altlık üzerine biriktirilmesi için metalin kimyasal bir banyoda çözünmesi (katodik biriktirme), yüksek sıcaklıkta ergitilmesi (termal püskürtme kaplama) veya buharlaştırılması (buhar biriktirme) gerekirken, artık günümüzde, uygun koşullar sağlandığında, soğuk püskürtmeyle metaller katı haldeyken altlık üzerine hızlıca biriktirilebilmekte ve diğer yöntemlere kıyasla yüksek sıcaklık ihtiyacı olmadığından metal malzemenin kimyasal ve faz bileşiminde istenmeyen değişimler yaşanmamaktadır. Soğuk püskürtme işleminde toz parçacıkları, malzemenin ergime noktasından daima daha düşük bir sıcaklıkta süpersonik gaz jeti ile hızlandırılır ve katı haldeki parçacıklardan kaplama oluşumu sağlar. Sonuç olarak, geleneksel termal püskürtme yöntemlerinde gözlenen yüksek sıcaklıkta oksidasyon, buharlaşma, erime, kristalleşme, artık gerilmeler, sıyrılma, zararlı gaz salınımı ve diğer yaygın sorunların zararlı etkileri en aza indirilir veya ortadan kaldırılır.

Soğuk püskürtme kaplama teknolojisi birçok endüstride kullanılan bileşenlerin korunmasını ve onarımını sağlamak üzere geliştirilmiştir. Bu endüstriler içerisinde havacılık, otomotiv, ulaşım, döküm, petrokimya tesisleri, maden ve metal işleme, elektronik, denizcilik, seramik ve cam üretimi bulunmaktadır. Soğuk püskürtme kaplamanın kalınlığı, çoğu metal ve metal matrisli kompozit için neredeyse hiçbir sınırlamaya sahip değildir. Bu gerçeği göz önünde bulundurarak, son yıllarda yekpare bileşenleri üretmek ve hasarlı olanları onarmak için eklemeli imalat teknolojisi olarak başarıyla uygulanmıştır. Bu gelişme, geleneksel eklemeli imalat teknolojilerine yeni bir ışık tutmakta ve soğuk püskürtme uygulama alanlarını önemli ölçüde genişletmektedir.

Yüksek performans gereksinimi olan uygulamaların ihtiyaçlarını karşılamak için soğuk püskürtme teknolojisi geliştirilmeye devam etmektedir. Bu çalışma, soğuk püskürtme kaplama sürecinin tarihsel gelişimini, temel ilkelerini ve özelliklerini, yapışma mekanizmasını ve uygulamalarını kısaca gözden geçirerek soğuk püskürtme hakkındaki bilgileri özetlemektedir. Aynı zamanda süreçteki son ve yeni ortaya çıkan gelişmelere ve bu teknolojinin potansiyeline genel bir bakış sağlamaktadır.

2. TARİHSEL GELİŞİMİ

Günümüzde soğuk püskürtme işleminin 1980'lerde Rusya'da yapılan araştırmalarla başladığı yaygın olarak kabul edilmesine rağmen, yaklaşık yirminci yüzyılın başlarından itibaren bu işlem hakkında bahsedilen birkaç patentin alındığı bilinmektedir. 1902 yılında Thurston [1] tarafından bir metali diğerinin üzerine uygulayan bir yöntem hakkında patent alınmıştır. Bu yöntemde, metal parçacıklar, parçacıkların metal yüzeyine gömülmesine ve kalıcı bir kaplama oluşturmaya neden olacak kuvvetteki basınçlı



gaz patlamasıyla, metal sac üzerine atılır. Kullanılan aygıtta, bir hazne içerisine, hava borusuyla basınçlı hava girişi ve huni vasıtasıyla da metal parçacıkların beslemesi yapılır. Gaz basıncının etkisiyle parçacıklar haznenin ucunda bulunan nozul içerisinden itilir ve altlık yüzeyine kaplanır. Yapılan çalışmada kaplama metali olarak bakır ve alüminyum, altlık metal olarak ise demir ve çelik kullanıldığı belirtilmiştir. Yakınsak/ıraksak nozul kullanılmadığından itici gazın düşük hızlara ulaşması sebebiyle bu yöntemin ancak yüksek süneklığe sahip ve nispeten yumuşak metallerin kaplanmasına izin verdiği sonucu çıkarılabilir. Buna eşlik eden diğer bir patentte Thurston [2], kaplanacak metalin ısıtılmasıyla bu yöntemin iyileştirildiğini açıklamıştır. Her ne kadar altlığın ısıtılması metal parçacıkların birikmesini kolaylaştırırsa da mevcut buluşun sınırlı kaplama yeteneğine sahip olduğu öngörülmektedir.

Metal parçacıkların altlık üzerine çarpma hızı arttıkça daha iyi özelliklere sahip kaplamalar üretildiği bilinmektedir. Thurston'ın çalışmasından 50 yılı aşkın süre geçtikten sonra, Rocheville [3] ilk defa yakınsak/ıraksak bir nozul kullanarak yüksek basınçlı hava ve metal parçacıklarının süpersonik hıza ulaşmalarını sağlamıştır. Püskürtme işlemi neticesinde tüm yüzey üzerinde ince tekdüze olan bir tabakanın oluştuğu, kaplamanın sadece parçanın yüzeyi üzerinde biriktiği ancak kendi üzerinde birikmediği belirtilmiştir. Kaplamanın yapışmasının, püskürtülen mikron boyutlu parçacıkların yüzeydeki gözeneklerin içerisine girmesi sonucu bir dereceye kadar sağlandığı, ayrıca kurşun gibi düşük ergime noktasına sahip metal parçacıklar kullanıldığında parçacıkların ergiyerek kaynaşabileceği belirtilmiştir. Bunun sebebi olarak nozul içerisinden geçen parçacıkların sürtünmesi nedeniyle sıcaklığın önemli ölçüde artması gösterilmiştir. Artan sıcaklık ile metal parçacıklar kısmi veya tam ergiyerek yüzeyde ergimiş bir tabaka oluştururlar. Ancak süpersonik nozul kullanıldığında dahi, Rocheville tarafından önerilen cihazın toz metal parçacıklarını parça üzerinde kalın kaplamalar üretecek kadar yüksek hızlara ulaştıramadığı anlaşılmaktadır.

1980'li yıllarda Papyrin ve arkadaşları tarafından Rusya Bilimler Akademisi Teorik ve Uygulamalı Mekanik Enstitüsü'nde süpersonik iki fazın (gaz ve katı parçacıklar) rüzgâr tüneline model parçaların etrafından akışı ile ilgili bazı teorik ve deneysel çalışmalar gerçekleştirildi [4]. Belirli koşullar altında gaz akışına maruz bırakılan ince alüminyum katı parçacıkların, rüzgâr tüneline içerisine yerleştirilen silindirik parçaların ön cephe yüzeylerinde birikerek sürekli bir kaplama oluşturduğu gözlemlendi. Mikroyapı incelemesi sonucunda alüminyum kaplamanın, yüzeye düzgünce yayılan yüksek miktarda deforme olmuş ve sıkıca paketlenmiş parçacıklardan meydana geldiği görülmüştür. Ancak bronz ve pleksiglas parçacıklarla yapılan testlerde, kütlece akış hızı alüminyumdan yüksek olmasına karşın birikmenin olmadığı, bunun aksine çelik hedef parçanın erozyona uğradığı görülmüştür. Bunun üzerine, süpersonik nozul vasıtasıyla alüminyum ve bakır parçacıkları altlık üzerine püskürtülerek daha detaylı çalışmalar yürütmüşlerdir. Bu çalışmaların sonucunda parçacık hızı düşükse parçacığın altlıktan geri sektiği ortaya çıkmıştır. Parçacık hızı kritik değere yükseldikçe

parçacığın yüzeye yapışmaya başladığı ve artan parçacık hızıyla parçacık bağlanma olasılığının arttığı belirtilmiştir. “Soğuk” parçacıklar ile kaplama oluşumu açısından, altlık erozyonu sürecinden (parçacık geri sekmesine bağlı olarak) parçacık hızının artması ile kaplama oluşumu sürecine (parçacık yapışması nedeniyle) bir geçişin olması gerektiğini göstermişlerdir. Yapışmanın meydana geldiği bu “kritik parçacık hızı” değerinin, parçacık ve altlık malzemeleri, parçacık sıcaklığı ve boyutu, altlık yüzeyinin durumu gibi birçok faktöre bağlı olduğu gösterilmiştir. Araştırmacıların bu keşfi yeni bir alternatif kaplama yöntemi olarak kabul edildi ve sonrasında soğuk püskürtme kaplama cihazı geliştirildi [5]. Soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemi olarak adlandırıldıkları bu kaplama yöntemi, metaller, alaşımlar, polimerler veya bunların karışımlarının biriktirilmesine olanak tanıdı [6].

Rusya’da çalışmalar yürüten Papyrin, 1994 yılında Amerika Birleşik Devletleri’nde (ABD) Ulusal Üretim Bilimleri Merkezi (NCMS) himayesinde faaliyet gösteren bir konsorsiyuma soğuk püskürtme yöntemi hakkında bilgi vermiştir. [7]. Papyrin aynı yıl içerisinde bu konsorsiyum tarafından araştırma desteği almıştır ve kaplama uygulaması üzerine bir gaz dinamik püskürtme yöntemi için patent almıştır [8]. Benzer dönemde Rusya’da düşük basınçlı soğuk püskürtme üzerine çalışan bir araştırma gurubu tarafından 1992 yılında Obninsk Toz Püskürtme Merkezi (OCPS) kuruldu. Daha sonra bu merkez tarafından Dymet ticari ismiyle düşük basınçta çalışan soğuk püskürtme sistemi üretilmiştir. Bu düşük basınçlı kaplama teknolojisi 1990’lı yılların ortasında araştırmacılar tarafından Kanada’ya aktarılmış ve Centerline Windsor şirketi bünyesinde yapılan çalışmalarla kaplama cihazı geliştirilmiştir.

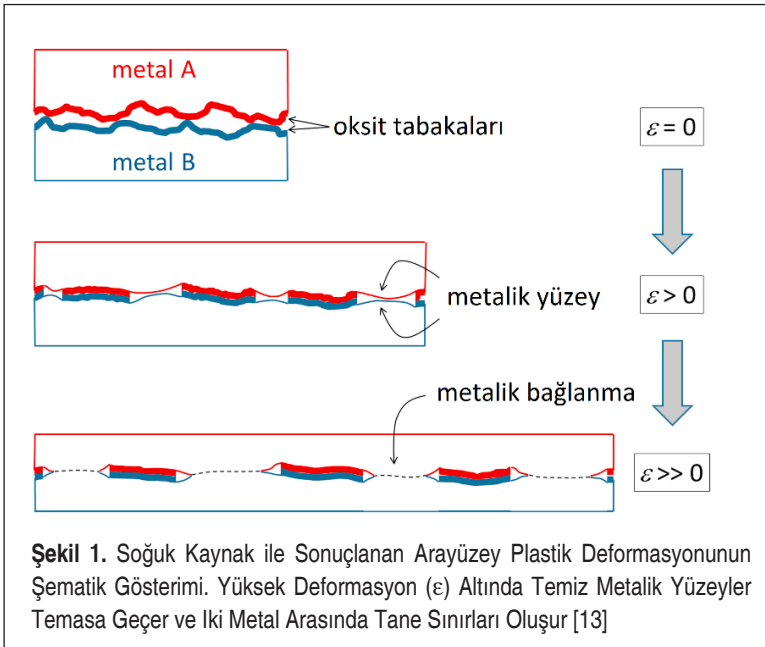
Sandia’nın Termal Püskürtme Araştırma Laboratuvarı’nda (TSRL) üst düzey deneysel çalışmalar yapılarak soğuk püskürtme işleminin gaz dinamiği prensipleri ortaya konmuştur [9]. Ayrıca bağlanma mekanizmaları, donanımın iyileştirilmesi, süreç ekonomisi, ticari uygulamaların geliştirilmesi vb. alanlarda araştırmalar yapılmıştır [10]. Almanya’da Cold Gas Technology GmbH (CGT) şirketi kurulmuş ve yüksek basınçlı soğuk püskürtme cihazı üretilmiştir. Federal Silahlı Kuvvetler Üniversitesi’nde (UFAF) yapılan çalışmalarda soğuk püskürtme işleminde hidrodinamik kararsızlığın kritik hızla ve diğer süreç parametreleriyle olan ilişkisi araştırılmıştır [11, 12]. CGT şirketinin ticari amaçlı cihazı üretebilmesi sayesinde ve araştırmacılar tarafından kaplama işleminin daha iyi anlaşılması adına yürütülen detaylı çalışmalar sonucunda, yüksek basınçlı soğuk püskürtme teknolojisinin daha da büyümesi ve ticarileşmesi için temel oluşturuldu. Şu anda, soğuk püskürtme sistemi ile ilgili dünyanın birçok araştırma merkezinde ve şirketinde geniş bir alanda araştırma ve geliştirme çalışmaları yürütülmektedir.

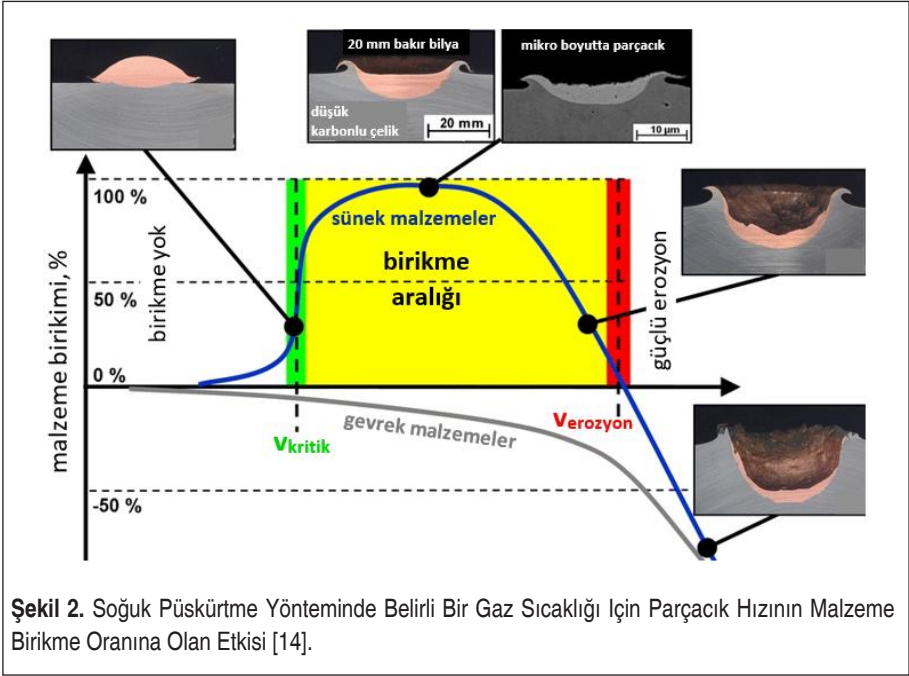
3. TOZ MALZEME BİRİKİMİ

Soğuk püskürtme yönteminde, 5-100 µm çapında katı toz parçacıkları süpersonik hız-

lara ulaşan ısıtılmış gaz içerisinde 300-1200 m/s arasındaki hızlara çıkartılıp metal, seramik veya cam gibi sert bir hedef altlık yüzeyine biriktirilir [4]. Eğer toz parçacıkları yeterince yüksek hıza ulaşır ise ve toz malzeme birleşimi işlem için uygun ise, çarpma gerçekleştiğinde toz parçacıkları adyabatik ısınmaya maruz kalır ve çok yüksek kayma deformasyonu hızı altında plastik deformasyona uğrar. Bunun sonucunda da düzleşip yaprak haline gelerek hedef altlık malzemeye yapışırlar. Soğuk püskürtmede iki farklı bağlanma türü vardır; i) altlık yüzeyinde ilk katmanın oluşması için gerekli olan ve kaplamanın altlığa yapışmasını belirleyen parçacık/altlık malzemeler arasındaki bağlanma, ii) püskürtülen parçacıkların üst üste birikerek büyümesini sağlayan ve kaplamanın fiziksel özellikleri ile kohezyon dayanımını ilgilendiren parçacıklar arası bağlanma. Bağlanma genellikle atomik düzeyde temiz düz iki parça yüzeyinin birbiriyle temas etmesinin hemen ardından gerçekleşir. Ancak uygulamada parça yüzeyleri genellikle pürüzlüdür ve sıklıkla oksit tabakasıyla kaplıdır. Katı hal bağlanma için oksit tabakanın kaldırılması veya kırılması gereklidir. Bunu sağlamanın bir yolu Şekil 1’de gösterildiği gibi plastik deformasyon ile arayüzey bölgesini basıp germektir. Soğuk püskürtmedeki bağlanmanın bu türde arayüzey deformasyonu ile ilişkili olduğu düşünülmektedir [13].

Şekil 2’de belirli bir gaz sıcaklığı için parçacık hızının malzeme birikme oranına olan etkisi gösterilmektedir. Soğuk püskürtmede altlığa iyi yapışma sağlanması için püskürtülen parçacıkların hızı, yapışma arayüzeyinde hidrodinamik kayma kararsızlığı





Şekil 2. Soğuk Püskürtme Yönteminde Belirli Bir Gaz Sıcaklığı İçin Parçacık Hızının Malzeme Birikme Oranına Olan Etkisi [14].

oluşturacak olan minimum kritik hız (V_{kri}) değerini aşmak zorundadır. Eğer çarpma hızı aşırı düşük olursa parçacıklar altlık yüzeyinden sekerek kumlama işleminde olduğu gibi yüzeyi aşındıracaktır veya bazı parçacıklar yüzeyi önemli ölçüde deforme edmeden veya sıkıca tutunmadan sadece fiziksel olarak yüzeye gömülecektir. Soğuk püskürtmede hidrodinamik kayma kararsızlığını sağlamak için gerekli minimum çarpma hızına kritik hız (V_{kri}) denir. Kritik hız değeri, Şekil 2’de birikme verimi %50’ye ulaştığı andaki yeşil çizgiyle belirtilmiştir. Gerçekte yüzeye biriken malzeme miktarının püskürtülen toplam malzeme miktarına oranıyla bulunan birikme verimliliği parçacık ortalama hızının V_{kri} değerini aşmasıyla çarpıcı şekilde artar. Malzeme birikiminin doygunluğa ulaştığı üst noktada en uygun kaplama koşulları sağlanır. Doygunluğa ulaştıktan sonra parçacık hızı daha fazla artırılırsa parçacıklar altlık malzemenin içerisine hidrodinamik olarak nüfuz eder ve erozyona sebep olur. Malzeme birikme verimi %0’a ulaştığı andaki hız değeri erozyon hızı olarak tanımlanır. Şekil 2’de çelik altlık üzerine 20 mm bilyayla yapılan çarpışma testinde elde edilen kesit görüntülerinde erozyon oluşumu görülebilir. Erozyon hızı birçok malzeme için kritik hızın iki veya üç katından daha fazla olmaktadır. Seramikler gibi gevrek yapıdaki malzemeler ergime sıcaklığının altında altlık yüzeyine püskürtülürse, altlığın erozyonuna sebep olacaktır ve malzeme birikmesi gerçekleşmeyecektir. V_{kri} değeri farklı toz malzemeler kullanıldığında önemli ölçüde değişir (Tablo 1). Ayrıca püskür-



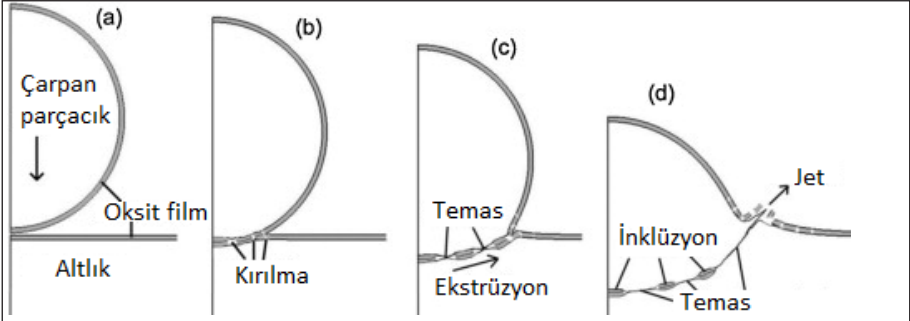
Tablo 1. Soğuk Püskürtme Yönteminde Kullanılan Malzemelerin Deneysel Olarak Elde Edilen Kritik Hız Değerleri [14].

Malzeme	Ergime sıcaklığı, °C	Kritik hız, m/s
Alüminyum	660	620-660
Titanyum	1670	700-890
Kalay	232	160-180
Çinko	420	360-380
Paslanmaz çelik (316L)	1400	700-750
Bakır	1084	460-500
Nikel	1455	610-680
Tantal	2996	490-650

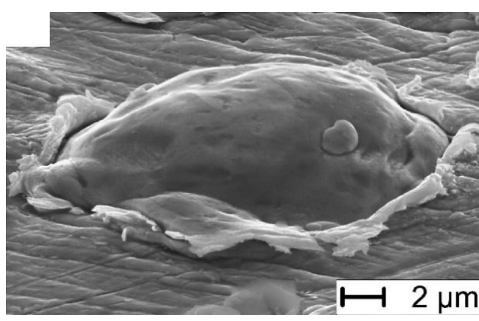
tülen malzemenin özellikleri ve işlem parametreleri de kritik hızı etkileyebilmektedir [11,12]. Yapılan çalışmalar sonucunda altlık sıcaklığı, parçacık sıcaklığı veya parçacığın boyutu arttıkça adyabatik kayma kararsızlığı oluşumunun daha kolay hale geldiği belirtilmiş ve bunun sonucunda kritik hız değerinin düştüğü ortaya çıkmıştır.

Her ne kadar soğuk püskürtmedeki bağlanma mekanizmasını anlamak için birçok sayısal simülasyon ve deneysel araştırma yapılmış olsa da yeterince anlaşılammıştır. Halen, soğuk püskürtmedeki en olası bağlanma mekanizması, Assadi tarafından önerilen adyabatik kayma kararsızlığı ile ilişkilidir [11]. Oksit filmin kırılması ve ekstrüzyonunu içeren adyabatik kayma kararsızlığıyla ilgili bağlanma mekanizması şematik olarak Şekil 3'te gösterilmiştir [15]. Bu mekanizmada, parçacık-parçacık veya parçacık-altlık arayüzey bölgeleri, darbe esnasında şiddetli bölgesel kayma deformasyonuna uğrar. Bu deformasyonun etkisiyle parçacıkların yüzeyindeki ince oksit filmi parçalanır ve kuvvetli parçacık-altlık teması sağlanır [11,12]. Buna ilave olarak arayüzeydeki yüksek bölgesel deformasyon sebebiyle adyabatik kayma kararsızlığı tetiklenir ve arayüzeyin kenara yakın bölgesinde malzeme jeti meydana gelir. Şekil 4'te bakır bir altlık üzerine gömülmüş bakır parçacığın mikroyapı görüntüsü incelendiğinde, çarpan parçacığın kenar bölgesinde oluşan malzeme jeti görülmektedir. Metalik malzemeler söz konusu olduğunda, çarpma sırasında oluşan deformasyon homojen değildir. Homojen olmayan deformasyon, başlangıçta temas bölgesinin dış kenarında oluşan ve artan çarpma hızı ile merkeze doğru uzanan adyabatik kayma kararsızlığı ile ilişkilendirilebilir. Adyabatik kayma kararsızlığı bölgesi hiçbir zaman temas bölgesini tam olarak kapsamaz. Yapılan çalışmalar neticesinde merkeze yakın bölgelerde adyabatik kayma kararsızlığının oluşmadığı ve bu nedenle merkezde metalürjik bağlanmanın tam olarak gerçekleşmediği gösterilmiştir [16].

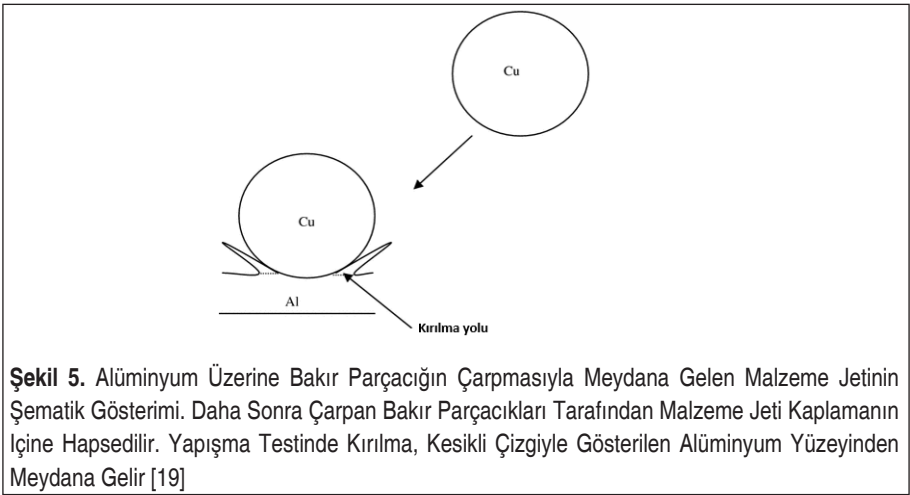
Parçacıkların altlıkla çarpışması sırasında gelişen yüksek basma gerilmeleri bağlan-



Şekil 3. Soğuk Püskürtülmüş Parçacıkların Bağlanma Sürecinin Şematik Diyagramı; (a) Yüzeğe Çarpan Parçacık, (b) Deformasyonun Etkisiyle Yüzey Oksit Filmlerin Kırılması, (c) Oksit Filmin Ekstrüzyonu, ve (d) Malzeme Akışıyla Birlikte Jet Oluşumu [15]



Şekil 4. Bakır Altlık Üzerine Püskürtülen Bakır Parçacıklarının Yakın Çekim SEM Görüntüsü [11]



Şekil 5. Alüminyum Üzerine Bakır Parçacığının Çarpmasıyla Meydana Gelen Malzeme Jetinin Şematik Gösterimi. Daha Sonra Çarpan Bakır Parçacıkları Tarafından Malzeme Jeti Kaplamanın İçine Hapsedilir. Yapışma Testinde Kırılma, Kesikli Çizgiyle Gösterilen Alüminyum Yüzeyinden Meydana Gelir [19]

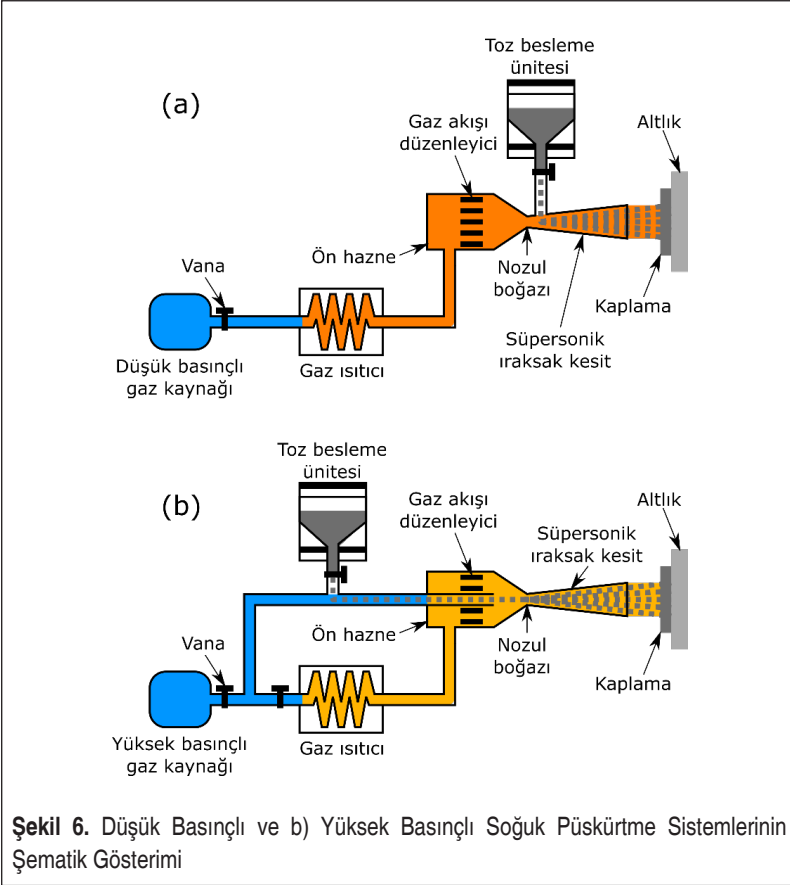


ma için gereklidir [17]. Başka bir deyişle, malzeme kayma dayanımını yitirmekte ve deformasyon mekanizmasının plastikten viskoz akışa geçeceği şekilde ciddi deformasyona uğramaktadır [18]. Bu durum parçacıkların altlıkla ve aynı zamanda kendi aralarında metalürjik bağ (yani atomik bağ) oluşturmasını kolaylaştırır. Hussain ve arkadaşları alüminyum yüzeylere bakır parçacıkları püskürterek yaptığı çalışmada, metalürjik bağlanmanın yanı sıra mekanik kilitleme olarak bilinen başka bir bağlanma mekanizması önermiştir [19]. Bu mekanizmaya göre bakır parçacıkların alüminyum altlığa çarpması nedeniyle, yüzeye yapışan parçacıkları kısmen saran malzeme jetinin oluştuğu öne sürülmektedir. Malzeme jeti altlık ile daha sonra yüzeye çarpan parçacıklar arasında Şekil 5'te gösterildiği gibi mekanik bir kilitleme yaratmaktadır.

4. DÜŞÜK VE YÜKSEK BASINÇLI SOĞUK PÜSKÜRTME YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Soğuk püskürtme işleminde kaplamanın kalitesi gaz sıcaklığı, gaz basıncı ve türü, püskürtme mesafesi ve parçacık hızı gibi işlem parametrelerinin yanı sıra toz ve altlık malzeme türlerine de bağlıdır [20]. Toz malzemenin nozul boğazına enjeksiyon şekline göre soğuk püskürtme işlemi düşük ve yüksek basınçlı olarak iki kategoriye ayrılır. Düşük basınçlı soğuk püskürtmede göreceli düşük basınca (0,5-1 MPa) sahip olan genellikle hava veya azot gazı, gaz ısıtıcı içerisinde sıcaklığı artırılıp püskürtme tabancasının ucundaki yakınsak/ıraksak türdeki nozula doğru itilir (Şekil 6a). Nozul boğazından geçen gaz, ses üstü ıraksak kesit içerisinde 300-600 m/s aralığında bir hıza ulaşır. Bu esnada katı toz parçacıklar, toz besleme ünitesinden ıraksak kesitin nozul boğazına yakın kısmına doğru radyal biçimde gönderilir ve nozul boyunca altlığa doğru hızlandırılır. Venturi etkisiyle nozul içerisindeki statik basınç atmosferik basıncın altında tutularak parçacıkların toz besleme ünitesinden etkili bir şekilde nozulun içine çekilmesi sağlanır.

Şekil 6b'de yüksek basınçlı soğuk püskürtme sisteminde, öncelikle yüksek basınçlı hava, azot, helyum gazı veya bunların bir karışımı 1-4 MPa aralıkta basınca kadar sıkıştırılır ve sonrasında sistemden iki farklı yoldan akar. Birinci yolda yüksek basınçlı gaz, parçacıkları püskürtme tabancasına taşımak için toz besleyiciden geçer. İkinci yolda yüksek basınçlı gaz, elektrikli gaz ısıtıcısından geçer ve yaklaşık 1100 °C sıcaklığa kadar önceden ısıtılır. Bu sayede, gaz hızına ilave bir artış sağlanır ve sonuç olarak parçacık hızı artırılır. İki ayrı yol nozul girişinin yakınında birleşir. Son aşamada, hammadde tozları süpersonik hızlara ulaşarak tabanca nozulundan çıkar ve kaplama oluşturmak üzere altlığa çarpar. Giriş gazı yüksek sıcaklıklara önceden ısıtılmasına rağmen, yüksek sıcaklıktaki gaz ve parçacıklar arasındaki temas süresi nispeten kısa olduğundan parçacıklar katı halde kalır; gaz sıcaklığı da genellikle tozun ergime noktasından çok daha düşüktür. Buna ilave olarak, tabanca nozulunun ıraksak bölümünün genişlemesi ile gazın sıcaklığı önemli ölçüde azalır.



Düşük ve yüksek basınçlı soğuk püskürtme yöntemleri birbirlerine kıyasla bazı avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Yüksek basınçlı soğuk püskürtme yöntemi diğer yöntemle kıyasla daha yüksek gaz akışı ve toz besleme hızlarına sahiptir [21]. Gaz akışının artmasıyla birim zamanda beslenebilen toz miktarı arttığı için toz besleme hızı daha fazladır. Bu iki soğuk püskürtme işlemi kıyaslama amacıyla bazı püskürtme işlem parametreleri Tablo 2’de özetlenmiştir. Temel farklılıklar gazın türü, basınç seviyesi ve kullanılan elektrik gücü ile ilgilidir. Yüksek basınçlı soğuk püskürtmede, ana taşıyıcı gaz ve toz besleme hatlarının karışmasını sağlamak için ana gaz akımına yakın veya daha yüksek bir basınçta çalıştırılan yüksek basınçlı bir toz besleyicisi kullanılır. Yüksek basınçlı toz besleyiciler, düşük basınçlı toz besleyicilerden genellikle daha büyük boyutlu ve daha maliyetlidir. Bununla birlikte, düşük basınçlı soğuk püskürtme için nozul tasarımı daha düşük bir genişleme Mach sayısı (genellikle <3) aralığı ile sınırlıdır ve atmosfer basıncının nozula toz sağlayabilmesi için giriş basıncı sınırlanır (normalde 1,7 MPa).



Yüksek basınçlı soğuk püskürtmenin düşük basınçlı soğuk püskürtmeye göre temel avantajları, daha geniş bir yelpazede malzeme seçimi ve daha yüksek biriktirme kalitesidir. Yüksek basınçlı sistemde %90'a kadar biriktirme verimliliği sağlanırken düşük basınçlı sistemde sadece %50'nin altında toz biriktirme verimliliğine ulaşılabilir [22]. Düşük basınçlı soğuk püskürtme işleminde daha düşük parçacık hızlarına ulaşıldığı için sadece, alüminyum, bakır, kalay ve çinko gibi düşük ergime noktasına sahip sünek metaller biriktirilebilir. Düşük gaz sıcaklığında ve basınçta bu malzemelerin püskürtülebilirliğini iyileştirmek için daha yüksek sertliğe sahip seramik parçacıklar toz karışımına ilave edilebilir. Seramik parçacıklar hem mikron boyutunda dövme etkisi yaratarak alt tabakaları sıkıştırır hem de yüzeyi sürekli temizler ve pürüzlülüğü artırarak parçacıkların daha iyi tutunmasını sağlar. Oluşturulan seramik takviyeli kompozit mikroyapı uygulamaya bağlı olarak faydalı olabilir veya bir sınırlama getirebilir; örneğin, bazı durumlarda, ikincil parçacıklarla sağlanan mukavemet ve sertlik mekanik özellikleri iyileştirir, diğer durumlarda ise fiziksel olarak bağlanan seramik-metal arayüzeyleri aşırı korozif ortamlarda korozyon direncini düşürebilir veya elektiriksel iletkenliğin düşmesine neden olabilir.

Düşük basınçlı soğuk püskürtme sistemi yüksek basınçlı sisteme kıyasla daha esnek, taşınabilir ve uygun maliyetlidir. Parça onarımı gerektiren işlerde taşınabilir olması sayesinde parçanın sökülmesine ihtiyaç duymadan çalışma yerinde kaplama uygulanabilmektedir. Buna karşın yüksek basınçlı soğuk püskürtme donanımı için yatırım maliyetleri yüksektir ve endüstriyel olarak üretilen sistemler taşınabilir boyutlara sahip olmadığı için kaplama uygulanacak parçaların kullanım yerinde kaplanması mümkün olmayabilir [21].

Her iki soğuk püskürtme işleminin bazı ortak sınırlamaları vardır. Karşılaşılan en büyük sorun, parçacık hızı ve sıcaklık arttıkça daha şiddetli hale gelen nozul tıkanmasıdır. Sorunun üstesinden gelmek için, tıkanmaya dirençli çeşitli nozul malzemeleri kullanılmasının yanı sıra ana toz malzemesi içerisine daha büyük veya daha sert parçacıkların ilave edildiği bir toz karışımı kullanılabilir [20,23]. Her iki soğuk püskürtme işlemi için bir diğer yaygın sorun, nozul boğazının erozif aşınması sonucunda çalışma koşulları ve birikme kalitesinin değişmesidir. Düşük basınçlı soğuk püskürtme nozulunun servis ömrü yüksek basınçlı sistemdekine kıyasla daha uzundur. Bunun sebebi, toz parçacıklarının sadece nozulun süpersonik hıza ulaşılan iraksak bölgesinden geçerek nozul duvarının aşınmasını azaltmasıdır [22]. Nozul için sinterlenmiş tungsten karbür gibi aşınmaya dayanıklı malzemeler kullanılarak sert parçacıklar püskürtüldüğünde ortaya çıkan aşınma hasarı engellenmektedir [20].

Ticari olarak üretimi yapılan soğuk püskürtme cihazlarının işlem parametreleri Tablo 3'te verilmiştir. Yüksek basınçlı sistemde gaz sıcaklığı ve basınç değerlerinin yüksek olması sayesinde alüminyum ve bakır gibi sünek metallerin yanı sıra ergime noktası

**Tablo 2.** Soğuk Püskürtme İşlemlerinde Kullanılan Tipik Püskürtme Parametreleri [21]

Püskürtme Parametresi	Yüksek Basıncılı Soğuk Püskürtme	Düşük Basıncılı Soğuk Püskürtme
İşlem gazı	Azot, Helyum	Basıncılı hava
Basınç (bar)	10-50	6-10
Çalışma sıcaklığı (°C)	1000-1100	600-650
Gaz akış hızı (m ³ /dk)	0,85-2,5 (N ₂), 4,2 (He)	0,3-0,4
Toz besleme hızı (kg/s)	4,5-13,5	0,3-3
Püskürtme mesafesi (mm)	10-50	5-15
Elektrik gücü (kW)	40-70	3,3; 3,8; 4,25
Parçacık büyüklüğü (mikron)	5-50	5-30
Parçacık hızı (m/s)	1200	600

Tablo 3. Endüstriyel Soğuk Püskürtme Sistemlerinin Özellikleri

Firma Adı	Ticari Cihaz Adı	Proses türü	Maksimum Çalışma Sıcaklığı (°C)	Maksimum Çalışma Basıncı (bar)	Isıtma Gücü (kW)
Impact Innovations GmbH (Almanya)	Impact Spray System 5/8	Yüksek basınç	800	50	34
	Impact Spray System 5/11	Yüksek basınç	1100	50	40
Plasma Giken Co. Ltd. (Japonya)	PCS-800	Yüksek basınç	800	50	35
	PCS-1000	Yüksek basınç	1000	50	70
VRC (ABD)	Gen III	Yüksek basınç	900	70	21
DYMET (Rusya)	D423	Düşük basınç	600	8	3,3
	D523	Düşük basınç	600	8	3,3
CenterLine Ltd. (Kanada)	SST PX	Düşük basınç	550	17,2	3,8-4,25
	SST EPX	Düşük basınç	550	35	3,8-4,25
Inovati (Japonya)	KM	Düşük basınç	1000	4,5-10	3,8

ve sertliği daha yuğsek olan titanyum gibi metaller de biriktirilebilmektedir. Soğuk puskurtme sistemleri, toz enjeksiyonu yontemine gore farklılık gosterirler. Şekil 7 ve 8’de gosterilen Impact Innovations ve VRC firmalarına ait yuğsek basıncılı soğuk puskurtme sistemlerinde yukarı yonlu enjeksiyon kullanılmaktadır. Şekil 9 ve 10’da gosterilen Dymet ve CenterLine firmalarına ait duğuk basıncılı soğuk puskurtme sistemlerinde ise aşağı yonlu enjeksiyon tercih edilmiştir.





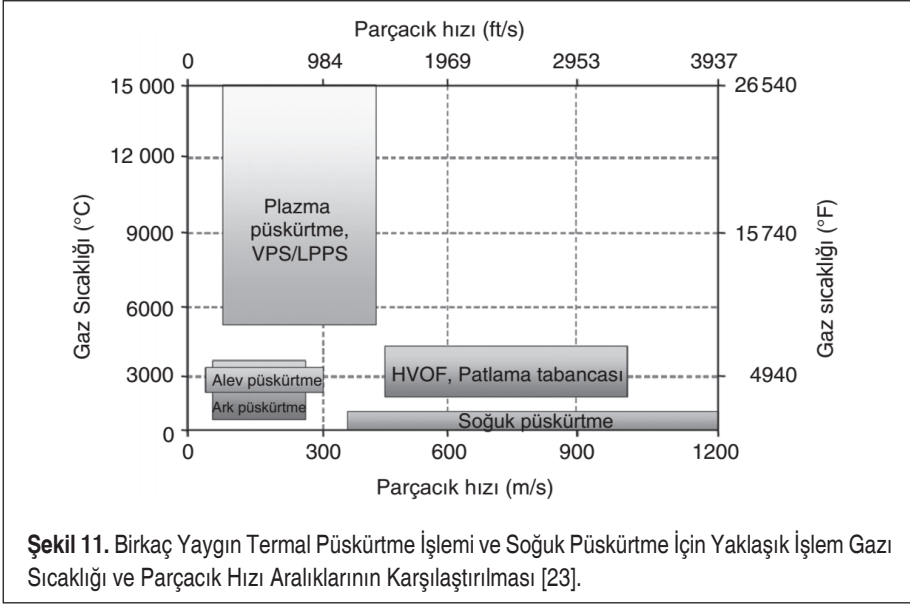
Şekil 9. Dymet 423 Taşınabilir Aşağı Yönde Enjeksiyon Sistemi (DYMET Corporation).



Şekil 10. Basıncısız Çift Toz Besleyici ile Donatılmış SST PX Aşağı Yönde Enjeksiyon Sistemleri; El Tabancası (sol taraftaki) ve Robotik Kol Vasıtasıyla Kaplama İşlemi (sağ taraftaki) (CenterLine Ltd.)

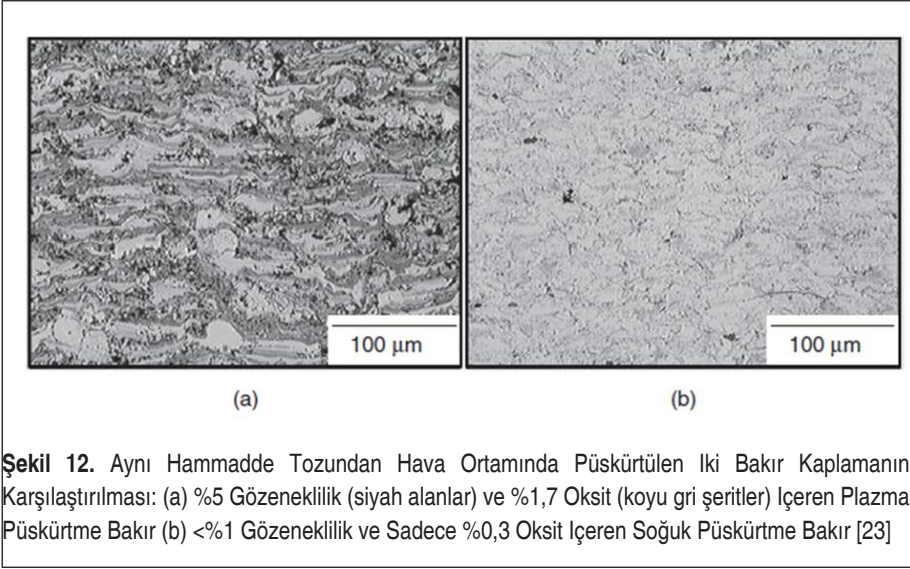
5. SOĞUK PÜSKÜRTME İŞLEMİNİN AVANTAJLARI VE DEZAVANTAJLARI

Soğuk püskürtme ve geleneksel termal püskürtme işlemlerinin yaklaşık işlem sıcaklıkları ve parçacık hızlarının karşılaştırması Şekil 11’de gösterilmektedir. Soğuk püskürtme çok yüksek parçacık hızlarıyla birlikte son derece düşük işlem sıcaklıklarında gerçekleştirildiği için birçok avantaj sağlamaktadır [23]. Bu yöntem ısıya duyarlı malzemelerin yanı sıra alüminyum, bakır ve titanyum gibi oksijene duyarlı malzemelerin de kaplanması için uygundur [6,20]. Ayrıca, hammadde tozu işlem sırasında çok yüksek sıcaklıklara çıkarılmadığı ve dolayısıyla ergimediği için gelecekteki kaplama işlemlerinde tekrar kullanılabilir [20]. Soğuk püskürtme, endüstriyel gereçlerde ha-



sarılı metal parçaların ve cihazların onarımı için çok uygundur. Hasara uğramış orijinal imalat parçalarına kaplama yapılması, yeni bir parça üretme masrafı olmadan veya çevresel atıkları artırmadan onarmanın etkili bir yoludur.

Geleneksel termal püskürtme işlemlerinin iki önemli sınırlaması vardır. Bunlar gözeneklilik ve metal oksit safsızlıklarıdır. Bazı uygulamalarda, soğuk püskürtme bu iki alanda önemli avantajlar sunabilir. Örneğin Şekil 12'de, aynı hammadde tozu kullanılarak iki farklı püskürtme işlemiyle (plazma püskürtme ve soğuk püskürtme) biriktirilen bakır kaplamaların karşılaştırması gösterilmektedir [23]. Şekil 12(a)'da gösterilen plazma püskürtme kaplamadaki gözenekliliğin (~%5) nedeni, ergimiş metal damlacıkların yüzeye çarpması sonucunda sıçraması ve yüzeyde birikmesi sırasında boşluk gibi düzensizlikleri tamamen doldurmamasıdır. Şekil 12(b)'de gösterilen soğuk püskürtme malzemedeki düşük gözeneklilik seviyesi (<%1) ise, soğuk püskürtmenin katı hal işlemi olduğu gerçeğinden kaynaklanır ve bu nedenle sıçrama yoktur. Benzer şekilde, plazma püskürtme kaplamasının oksit içeriği bakır hammaddesi tozunda bulunan oksitten neredeyse altı kat daha fazladır. Bunun nedeni plazma püskürtme yüksek sıcaklıklarda uygulandığından havadaki bakır tozunun ergimesi ve bu esnada önemli ölçüde oksidasyona uğramasıdır. Bununla birlikte, ölçüm belirsizliği dahilinde, soğuk püskürtme kaplamasının ölçülen oksit içeriği, hammadde tozuyla tamamen aynıdır. Soğuk püskürtme işlemi çok daha düşük işlem sıcaklıklarında gerçekleştirildiğinden, püskürtme ortamında metallerin oksijen ile reaksiyonu büyük ölçüde azaltılır veya ortadan kaldırılır [23].



Şekil 12. Aynı Hammadde Tozundan Hava Ortamında Püskürtülen İki Bakır Kaplamanın Karşılaştırılması: (a) %5 Gözeneklilik (siyah alanlar) ve %1,7 Oksit (koyu gri şeritler) İçeren Plazma Püskürtme Bakır (b) <%1 Gözeneklilik ve Sadece %0,3 Oksit İçeren Soğuk Püskürtme Bakır [23]

Geleneksel termal püskürtme işlemleri genellikle tane büyümesi, kimyasal reaksiyonlar, çatlaklar, buharlaşma, termal artık gerilme, termal büzülme, faz dönüşümü ve oksidasyona yol açar; ancak bunlar soğuk püskürtme işleminde gözlenmemektedir [4]. Soğuk püskürtme nispeten düşük gaz sıcaklıkları kullandığı için ısı radyasyonu ve metal buharları oluşması açısından işlevsel olarak daha güvenlidir [20]. Diğer bir avantajı, altlık hasarı olmadan 1 mm'den düşük kalınlıktaki altlıkları kaplama kabiliyetidir. Ayrıca, soğuk püskürtme kaplamalar basma gerilmeleri altında üretildiği için yapışma mukavemeti yüksek kalın kaplamalar veya çok katmanlı kaplamalar üretilebilir [20]. Diğer bir avantaj ise püskürtme yapılan alanın soğuk püskürtmede nispeten küçük olması (1–25 mm²) ve bu sayede hassas kaplamaların yüksek verimle biriktirebilmesidir [24]. Ayrıca biriktirme verimi püskürtülen toz tipine göre değişir.

Soğuk püskürtme yönteminde çok sayıda farklı hammadde ve altlıkların kullanılmasının yanı sıra, kaplanabilen malzeme türleri nispeten sünek metal tozları veya sünek metallerle karıştırılmış sert malzemeler ile sınırlandırılmıştır. Bu yöntemde seramik gibi sert tek türde parçacıkların biriktirilmesi zordur. Çünkü, parçacıklar arası bağın meydana gelmesi için plastik deformasyona uğramaları gereklidir. Yapılan bir çalışmada, TiO₂ gibi seramik parçacıkların yapışmasını sağlamak için gerekli olan kayma kararsızlığı olayının, ancak yeterli süneklığe sahip altlık malzemelerin kullanılmasıyla mümkün hale geldiği belirtilmiştir [25]. Seramik parçacık hızı arttıkça altlığın daha fazla deformasyona uğradığı ve birikme veriminin arttığı ifade edilmiştir. Benzer şekilde, seramik altlıklar üzerine püskürtme yapılması, düşük kaplama-altlık arayüzey bağ mukavemeti sebebi ile zordur. Ayrıca, taşıyıcı gaz tüketimi 1–2 m³/dak civarındadır ve termal püskürtme işlemlerine kıyasla yüksektir [22].



Soğuk püskürtme yönteminde püskürtme alanının küçük ve püskürtme mesafesinin kısa olması nedeniyle geniş yüzey alanlı altlıkların kaplanmasında zorluk yaşanmaktadır. Buna ek olarak soğuk püskürtme, sünekliği çok düşük olan kaplamalar oluşturur, çünkü yoğun plastik deformasyon sonucu yapı çok sertleşebilir ve parçacıklar arası bağlar nispeten zayıf olabilir [26,27]. Kaplama işlemi sonrasında yapılan ısı işlemleri ile çekme mukavemetinin ve sünekliğin arttığı belirlenmiştir [28].

Son yıllarda soğuk püskürtme, bağımsız metal bileşenler üretmek ve hasarlı metal bileşenleri yenilemek için eklemeli imalat teknolojisi olarak başarıyla geliştirilmiştir [29,30,31]. Soğuk püskürtmeyle eklemeli imalat (CSAM) soğuk püskürtme teknolojisinin tüm avantajlarını beraberinde getirmektedir. Tablo 4'te, CSAM ve diğer mev-

Tablo 4. Soğuk Püskürtmeyle Eklemeli İmalat ve Diğer Füzyon Esaslı Eklemeli İmalat Yöntemlerinin Karşılaştırılması [32]

	CSAM (Soğuk püskürtmeyle eklemeli imalat)	SLM (Lazer ışını ile ergitme)	EBM (Elektron ışını ile ergitme)	LMD (Lazer metal birikimi)
Toz besleme modu	Doğrudan biriktirme	Toz yatağı	Toz yatağı	Doğrudan biriktirme
Hammadde sınırlamaları	Yüksek sertlikteki mukavemetli metalleri işlemede zorluk	Yüksek yansıtıcılık ve zayıf akışkanlığa sahip metalleri işlemede zorluk	İletken olmayan ve düşük ergime sıcaklığına sahip metaller için uygun değildir	Yüksek yansıtma özellikli metallerle ilgili zorluk
Toz ergitme		✓	✓	✓
Ürün boyutu	Geniş	Sınırsız	Sınırsız	Geniş
Boyutsal hassasiyet	Düşük	Yüksek	Yüksek	Orta
Mekanik özellikler (Üretim hali)	↓↓	↑↑	↑↑	↑↑
Mekanik özellikler (Isıl işlemler hali)	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑
Üretim süresi	Kısa	Uzun	Uzun	Uzun
Ekipman esnekliği	↑↑	↓↓	↓↓	↓↓
Onarım için uygunluk	✓			✓

cut eklemeli imalat teknolojileri karşılaştırılmaktadır. CSAM’ın diğer eklemeli imalat süreçlerine göre en önemli avantajları, daha kısa üretim süreleri, sınırsız ürün boyutu, üretim esnekliği ve hasarlı parça onarımı için uygunluğudur. Ayrıca, CSAM özellikle lazer esaslı eklemeli imalat işlemleri kullanılarak üretilmesi çok zor olan bakır ve alüminyum gibi yüksek yansıtma özellikli metaller için uygundur. Bununla birlikte, CSAM’ın dezavantajları da vardır. CSAM genel olarak pürüzlü bir yüzeye sahip yarı mamul bir ürün üretir ve bu üretim sonrasında ek bir işlem gerektirir. Buna ek olarak, bu yöntemle elde edilen birikintiler, doğal kusurlar nedeniyle imal edildiği haliyle zayıf mekanik özelliklere sahiptir. Sonuç olarak, mekanik özellikleri geliştirmek için yaygın olarak ısıl işlemler uygulanır [32].

6. TOZ VE ALTLIK MALZEMELER

Soğuk püskürtme kaplama, elektrik iletkenliği, ısı yalıtımı, korozyon direnci, oksidasyon direnci, aşınma direnci vb. bir dizi özellikler ile karakterize edilmektedir ve tüm bu özellikler başlangıç tozu ve soğuk püskürtme işlemi parametreleri ile yakın bağlantı içerisinde. Ayrıca hammadde tozunun püskürtme sırasında kimyasal olarak büyük ölçüde değiştiği diğer termal püskürtme yöntemlerinin aksine, soğuk püskürtme işlemi sırasında hammadde tozu özelliklerinin korunması ihtiyacı söz konusudur. Dolayısıyla bu durum soğuk püskürtme kaplamalarda hammadde tozlarının seçimini kritik bir faktör haline getirmektedir.

Toz imalat endüstrisi, ticari soğuk püskürtme donanımlarının piyasada kullanıma başlaması ile toz boyutu aralıkları ve kompozisyon bakımından soğuk püskürtmeye uygun toz bileşimleri üretmeye doğru gelişim kaydetmeye başlamıştır. Bunun sebebi, soğuk püskürtme yönteminin normal bir termal püskürtme besleme stoku ile karşılaştırıldığında daha dar aralıkta boyut dağılımına sahip ve daha ince bir besleme stoku ihtiyacı duymasındır. Bu noktada gerekli parçacık boyutu aralıklarının, farklı soğuk püskürtme donanımı tasarımlarının her biri için özel olduğu görülmektedir [20]. Buna bağlı olarak en yaygın kullanılan parçacık boyutu aralıklarının 5–25 ve 15–45 µm arasında olduğu söylenebilir. Günümüzde atomizasyon, mekanik alaşımlandırma, sinterleme ve püskürtme kurutma gibi bir dizi iyi bilinen teknik soğuk püskürtme için besleme stoku üretmek amacıyla kullanılmaktadır.

6.1 Toz Özellikleri ve Karakterizasyonu

Soğuk püskürtme işlemindeki toz besleyicinin temel gereksinimi, toz parçacıklarının nozulun yakınsak (yüksek basınç-düşük hız) veya iraksak (alçak basınç-yüksek hız) bölümlerine taşınmasıdır. Tozun akma kabiliyeti ya da endüstride “toz besleme sorunu” olarak da bilinen durum tozun püskürtülebilirliği ile ilgili bir husustur. Soğuk püskürtme yönteminde toz malzemesi seçimi için birincil kıstas toz akışıdır. Toz bes-



leme sorunları veya nozul boğazında yaşanabilecek tıkanmalar püskürtme işlemlerinin kesilmesine ve kalitesiz kaplamaların meydana gelmesine neden olabilmektedir. Tozun akışkanlığını ölçmek için nicel bir test yöntemi olan Hall akış ölçer hunisi kullanılmakta ve ASTM B213 standardı takip edilerek gerçekleştirilmektedir [33]. Hall debimetresi, önceden kalibre edilmiş bir huni kullanarak metalik ve serbest akışlı ince tozların akış hızını belirleyen basit bir cihazdır. Hall debimetresi ayrıca ASTM B212'ye göre test tozunun görünür yoğunluğunu da belirleyebilmektedir [34].

Tozun akış hızı, tozun soğuk püskürtme işlemi için uygunluğunun belirlenmesinde temel bir özelliktir. Bu bağlamda akış hızları değerlendirmeye alındığında çok yüksek bir akış hızı nozulun yakınsak bölümündeki boğazın tıkanmasına sebep olurken; zayıf bir akışkanlık ise aralıklı besleme ve tutarsız kaplama hadiselerinin meydana gelmesine neden olmaktadır. Dolayısıyla kaliteli bir kaplama için en uygun toz akış hızının belirlenmesi gerekir.

Ham madde tozunun özellikleri genel olarak fiziksel ve kimyasal olarak iki kategoriye ayrılmaktadır. Kaplama oluşumunda etkili olan bu özellikler aşağıda detaylıca verilmektedir.

Fiziksel özellikler:

- Parçacık boyutları ve tane boyutları
- Dış morfoloji (küresel, eliptik, açılı yüzeyler vb.) ve iç morfoloji (gözeneklilik)
- Akışkanlık ve görünür yoğunluk
- Termal özellikler
- Elektriksel iletkenlik

Kimyasal özellikler:

- Kimyasal bileşim (saflık, oksijen/azot gibi istenmeyen bileşenlerin seviyesi)
- Çökeltilerin ve fazların dağılımı
- Kristalografik bilgi (katı çözeltiler)

6.2. Toz Malzeme Türleri

Araştırmalara göre soğuk püskürtme yöntemi ile ilgili hazırlanan bilimsel çalışmaların %40'ından fazlasını metal ve alaşımları oluşturmaktadır. Ayrıca metal takviyeli veya metalik matristen yapılmış kompozitler dikkate alındığında bu oranın daha da üst seviyelere çıktığı görülebilmektedir. Soğuk püskürtme kullanılan toz malzeme türleri ve birikme mekanizmaları Tablo 5'te paylaşılmıştır. Buna göre yüzey merkezli kübik kristal yapıya sahip metallerin (alüminyum, bakır, gümüş, altın, platin, nikel, ç demir) soğuk püskürtme için oldukça uygun şartlar sağladığı ifade edilmektedir. Bunun sebebi ise söz konusu metallerin iyi deforme olabilen çok sayıda kayma düzlemi sunmasıdır. Magnezyum, çinko, kobalt, kadmiyum ve titanyum gibi hekzagonal

Tablo 5. Soğuk Püskürtmeyle Eklemeli İmalat Ve Diğer Füzyon Esaslı Eklemeli İmalat Yöntemlerinin Karşılaştırılması [32].

Toz Besleme Stoku	Başarılı Birikintiler	Birikme Mekanizması
Metaller	Al, Ag, Cu, Ni, Ta, Ti, Zn, Fe, Sn, Nb, Mg	Plastik Deformasyon
Metalik Alaşımlar	TiAlV, CuCrAl, CuAgCe, CuAgZr, AlCoCe, Paslanmaz Çelik	Plastik Deformasyon
Metal cam	NiTiZrSiSn, FeCoCrMoBC, Cu-50Ti20Ni30	Viskoz Deformasyon
Metal Esaslı Sistemler	CoNiCrAlY, MAICrRe, WC-Co, CrCo stelite,	Plastik Deformasyon
Seramik Esaslı Fazlar	SiC, B ₄ C, WC, TiN	Mekanik Kilitleme
Oksitler	Al ₂ O ₃ , TiO ₂ , WO ₃ , Y ₂ O ₃ , ZrO ₂ , NiO	Mekanik Kilitleme
Polimerler	PPA, PE	Deformasyon+Termal Difüzyon

yapılı metaller daha düşük sayıda kayma düzlemlerine ve dolayısıyla daha az deformasyon kabiliyetine sahiptir. Tungsten, tantal, molibden, niyobyum, vanadyum, krom, α -demir ve γ -titanyum gibi hacim merkezli kübik metallerin ise deformasyon kabiliyeti en düşüktür. Diğer taraftan trigonal veya tetragonal kristal yapıya sahip metal esaslı bileşikler yetersiz süneklikleri nedeniyle soğuk püskürtme için yeterli uygunluğa sahip değildir [35].

Yirmi birinci yüzyılın başlarında ise ticari soğuk püskürtme donanımlarının kullanımına başlanması ile ticari olarak saf titanyum kaplamaların geliştirilmesi üzerine önemli Ar-Ge çalışmaları yürütülmüştür. Bu çalışmaları köşeli/sünger titanyum ve titanyum alaşımlı tozlar (Ti-6Al-4V gibi) izlemiştir. Soğuk püskürtme üzerine çalışan araştırmacıların şu anki ilgisi ise In 718, MCrAlY ve karışımlarından oluşan kompozit alaşım tozlarının püskürtülmesi üzerine gelişim göstermektedir. Geçmişte soğuk püskürtme yöntemi kullanılarak biriktirilemeyen seramik esaslı sert metal kaplamalar şimdi yeni toz tasarımı ve yeni üretim yolları kullanılarak başarılı bir şekilde uygulanabilmektedir. Ayrıca soğuk püskürtme donanımlarındaki gelişmelerin daha yüksek gaz basıncı ve daha yüksek işlem sıcaklığını mümkün kılmasıyla birlikte, püskürtülmesi zor malzemelerin kaplanabileceği sonucunu da ortaya çıkarmaktadır. Soğuk püskürtme yöntemi kullanılarak metaller (Cu, Al, Ni, Zn, Ti), ısıya dayanıklı metaller (Zr, Ta), alaşımlar (316 Paslanmaz çelik, Al Alaşımları, MCrAlY), oksitler (TiO₂), sermetler (Al-Al₂O₃ karışımları, WC-12Co ile Ni karışımı, Cu-MoS₂ ve Cu-MoS₂-



WC karışımları ve Al–12Si kompozitleri), intermetalikler (Fe/Al) başarılı bir şekilde altlık üzerine kaplanabilmektedir [36,37,38,39,40].

6.3 Altlık Malzeme Türleri

Mevcut durumda metallere seramiklere geniş bir yelpazedeki malzemelere uygulanabilen geleneksel termal püskürtme işlemlerinin aksine, soğuk püskürtme yöntemi yeterli derecede düşük sıcaklıkta sünekliğe sahip metallere veya kompozitlerin altlık olarak kullanımı ile sınırlıdır. Al, Cu, Ni, Ti, Ag, Zn gibi metaller ile bu metallere seramiklerle veya diğer sünek olmayan malzeme türlerinin karışımları ile ortaya çıkan altlık malzemeler örnek olarak verilebilmektedir [33].

Soğuk püskürtme yönteminde kullanılabilen altlık malzemeler genel bir değerlendirilmeye alındığında, yelpazenin bir tarafında yer alan aşırı yumuşak altlıklarda (polietilen gibi), gelen parçacıklar herhangi bir birikme olasılığı olmadan yüzeyde derin çukurların oluşmasına sebep olur. Yelpazenin diğer tarafında kolayca ayrılan (karbon gibi) yapılara sahip son derece kırılabilir altlıklarda ise toz parçacıkları tarafından erozyon meydana gelir. Elde edilen bu tespitler yüzeylerin kaplanması için altlık malzemelerin elastik ve sağlam olması gerektiği sonucunu ortaya çıkarmaktadır [41]. Başka bir ifadeyle, kabul edilebilir bir bağ yapısı için altlık malzemenin toz malzemesine göre yeterli plastik deformasyonu destekleyecek kadar sert olması gereklidir. Bu durum altlık malzeme ve toz ikilisi seçiminin oldukça önemli olduğunu ve birbiriyle ilişkili bir tasarım parametresi olarak ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte soğuk püskürtme kaplamaların metaller (alüminyum, bakır, titanyum, nikel vb.), alaşımlar (Inconel, çelikler, vb.) ve kompozitler (metal matrisli kompozitler, karbon kompozitler, vb.) gibi birçok altlık malzeme üzerinde çok yüksek yapışma mukavemeti sergilediği bilinmektedir. Ayrıca camın altlık malzeme olarak kullanıldığı soğuk püskürtme uygulamalarında dahi, alüminyum vb. toz malzemeleri ile kaplamanın mümkün olabileceği ifade edilmiştir [42].

7. KOMPOZİT KAPLAMALARIN YAPIŞMA ÖZELLİKLERİ VE AŞINMA DAVRANIŞI

Soğuk püskürtme kaplamaların yapışma özelliklerinin incelenmesi, bu tür malzemelerin yapısal ve işlevsel kaplamalar olarak yaygın şekilde kullanımı nedeniyle oldukça yüksek öneme sahiptir. Toz karışıma takviye parçacıkların eklenmesi, kaplamanın altlığa yapışmasına hem pozitif [43, 44] hem de negatif [45] yönde etki etmektedir. Nispeten az miktarda takviye parçacığın ilavesi altlık yüzeyini pürüzlendirerek ve oksit filmi altlık yüzeyinden temizleyerek kompozit kaplamanın yapışma mukavemetini arttırmıştır [46]. Her iki etki de altlık ve matris arasında metalurjik bağların oluşumunu kolaylaştırır. Aynı zamanda seramik takviye parçacıkların püskürtme sırasında

metal parçacıkların yüzeyindeki oksit filmini çarpmanın etkisiyle kaldırdığı önerilmektedir. Bu sayede kimyasal/metalurjik aktivitenin arttığı ve dolayısıyla kaplamanın yapışma mukavemetinin iyileştiği belirtilmiştir [46].

AZ91D-SiC kompozit kaplamada hacimce %15 SiC parçacığı ilave edildiğinde takviye edilmemiş duruma göre yapışma mukavemetinde 12 MPa'dan 22 MPa'a bir artış görülmüştür [47]. Bunun sebebi olarak SiC parçacıkların püskürtülen ilk kaplama tabakasının üzerinde yarattığı sıkıştırma etkisi gösterilmiştir. Al 6061 altlık üzerine Al-Al₂O₃ kompozit kaplamada, besleme tozuna ağırlıkça %70 seramik parçacık ilavesiyle yapışma mukavemeti artmış ve yapışma testinde kullanılan yapıştırıcının yapışma mukavemetine (70 MPa) ulaşılmıştır [44]. Takviye içermeyen kaplamada 20 MPa'ın altında bir yapışma mukavemeti elde edilirken, kompozit kaplamalardaki yüksek yapışma mukavemetinin sebebi olarak seramik parçacıkların yüzeyde mikro-pürüzler oluşturması ve mekanik kenetlenmeyi artırması gösterilmiştir. Ayrıca, yüzeydeki oksit tabakasının giderilmesi parçacıklar ve altlık arasındaki metalurjik bağlanmayı teşvik ederek yapışma mukavemetini arttırmaktadır.

Nispeten daha yüksek takviye miktarında, metal matris ile altlık yüzeyi arasındaki azalan temas alanı nedeniyle yapışma mukavemetinde azalma olabileceği dikkat edilmesi gereken bir konudur. Ayrıca, genellikle daha büyük hacim oranlarındaki takviyede bulunan fazla sayıda kusur ve gözenekler, yapışma mukavemetini olumsuz yönde etkiler. Örneğin, AA 2024-T3 altlık üzerindeki Al 2024-Al₂O₃ kompozit kaplamalarda, ağırlıkça %20 Al₂O₃ parçacıkların eklenmesi yapışma mukavemetinin 20 MPa'dan 50,68 MPa'a yükselmesine neden olurken, Al₂O₃ miktarının %20'den %60'a artışı yapışma mukavemetinde önemli bir artışa neden olmamıştır [48]. İlk durumdaki artış, takviye parçacıklar tarafından altlık yüzeyin pürüzlenmesi ve bu sayede mekanik kenetlenmenin artmasıyla ilişkilendirilmiştir. Diğer taraftan, 6061-T6 altlık üzerine uygulanan Al-12Si kaplamada, SiC takviyesi miktarının hacimce %0'dan %15'e çıkarılmasıyla yapışma mukavemeti biraz azalmıştır [45]. Arayüzeyde SiC parçacıkların büyük miktarlarda varolması nedeniyle kaplama ile altlık arasındaki bağlanma bölgelerinin sayısının azaldığı belirtilmiştir. Al altlık üzerinde Co-WC kaplama uygulanan diğer bir çalışmada, Co içeriğinin ağırlıkça %12'den %17'ye yükseltilmesi sonucunda yapışma mukavemeti 19 ± 1 MPa'dan 26 ± 10 MPa'a artmıştır [49].

Nispeten az sayıda takviye parçacıkları sıkıştırma etkisiyle kohezyon mukavemetini artırabilirken, daha fazla miktarlarda seramik parçacıkların kullanımı metal parçacıkların yakın temasını engelleyebilir. Dolayısıyla, metalik parçacıklar arasındaki yük transferi azalarak daha düşük bir kohezyon mukavemeti ile sonuçlanır [50]. Besleme tozundaki Al₂O₃ içeriğinin ağırlıkça %0'dan %30'a yükseltilmesiyle CuSn5-Al₂O₃ kaplamaların kohezyon mukavemetinde 11,2'den 32,5 MPa'a varan bir artış gözlenmiştir [51]. 316L matrisine SiC parçacıkların eklenmesi, kohezyon mukavemetinde

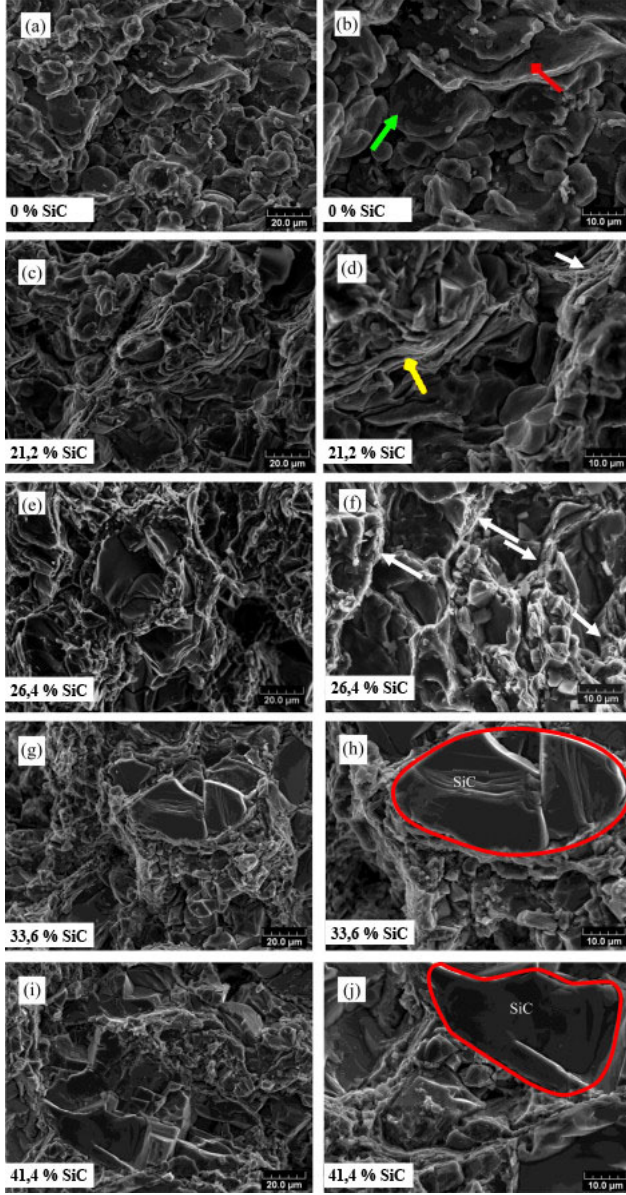


48 ± 7 MPa'dan 53 ± 9 MPa'a bir artışla sonuçlanmıştır [52]. Al5056 / SiC kaplamada, kaplamanın kohezyon mukavemeti, SiC içeriğindeki hacimce %0'dan %26,4'e bir artışla beraber 107.1 MPa'dan 146.9 MPa'a yükselmiştir [50]. Bununla birlikte, takviye içeriğinin hacimce %41,4'e yükselmesi, kohezyon mukavemetinin 112.7 MPa'a düşmesine neden olmuştur.

Şekil 13, kohezyon testlerinde başarısız olan Al5056-SiC kaplamanın kırılma yüzey analizini göstermektedir [50]. Şekilde takviye içeriği yukarıdan aşağıya doğru artmaktadır. Her satırda aynı kırık yüzeyin farklı büyütmelelerdeki mikro görüntüleri verilmiştir. İlk gözleme göre, SiC parçacıkları Al5056 parçacıkların deformasyonunu önemli ölçüde iyileştirmektedir. Takviyesiz kaplamada, Al5056 parçacıkları genellikle küreseldir (Şekil 13b'de yeşil okla gösterilmiştir) ve SiC takviye parçacıkları mevcut olduğunda daha düz bir hal alarak yassı şekillere dönüşür (Şekil 13d'de sarı okla gösterilmiştir). İkinci gözlem, takviye içermeyen kaplamada bulunan ve Şekil 13(b)'de kırmızı okla gösterilen zayıf bağlanmış parçacıklar arasındaki çatlakların, seramik takviye eklendiğinde artık mevcut olmadığı şeklindedir. Üçüncü gözlem olarak, hacimce %21,1 SiC ilave edilen kaplamada çukurlar ve sünek kırılma bulguları ortaya çıkmaya başlamıştır (Şekil 13d'de beyaz okla gösterilmiştir). Bu etkilerin sonucunda 107 MPa olan takviyesiz kaplamanın kohezyon mukavemeti hacimce %21,1 SiC takviye edilerek 129 MPa'a çıkarılmıştır. Kırılma yüzeylerindeki çukurlar takviye içeriği hacimce %26,4'e yükseltildiğinde daha belirgin hale gelmiştir (Şekil 13f'deki beyaz oklar) ve kohezyon mukavemeti 147 MPa'a çıkmıştır. Son gözlem ise, SiC içeriğinin %33,6-41,4 aralığındaki değerlere artırılması neticesinde takviye parçacıklarının Al5056 parçacıkları arasındaki etkin temas alanını azaltması şeklindedir (Şekil 13h ve j'de işaretli parçacıklar). Ayrıca çatlak sayısının da arttığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak kohezyon mukavemeti 147 MPa'lık maksimum değere ulaştıktan sonra, hacimce %33,6 ve %41,4 SiC ilavesi yapıldığında sırasıyla 122 MPa ve 113 MPa'a düşmüştür [50].

Kohezyon hasarı, kayma gerilmesi altında da meydana gelebilir ve parçacık takviye miktarına ek olarak, parçacık morfolojisi de kompozit kaplamaların kohezyon kayma mukavemetini etkiler. Köşeli ve küresel Al₂O₃ parçacıkları içeren farklı Al-Al₂O₃ kompozit kaplamaların basınçlı burulma testi sırasında benzer basınç gerilme-gerinim davranışları sergilediği tespit edilmiştir [53]. Bununla birlikte, köşeli parçacık içeren kompozit kaplamanın deformasyonu için daha düşük bir tork değerine ihtiyaç duyulmuştur ve neticede küresel parçacık içeren kaplamaya kıyasla kohezyon mukavemetinin daha düşük çıktığı önerilmiştir. Köşeli parçacıkların keskin köşelerindeki artan gerilim konsantrasyonunun, matriste mikro çatlakların oluşmasını desteklediği bulunmuştur.

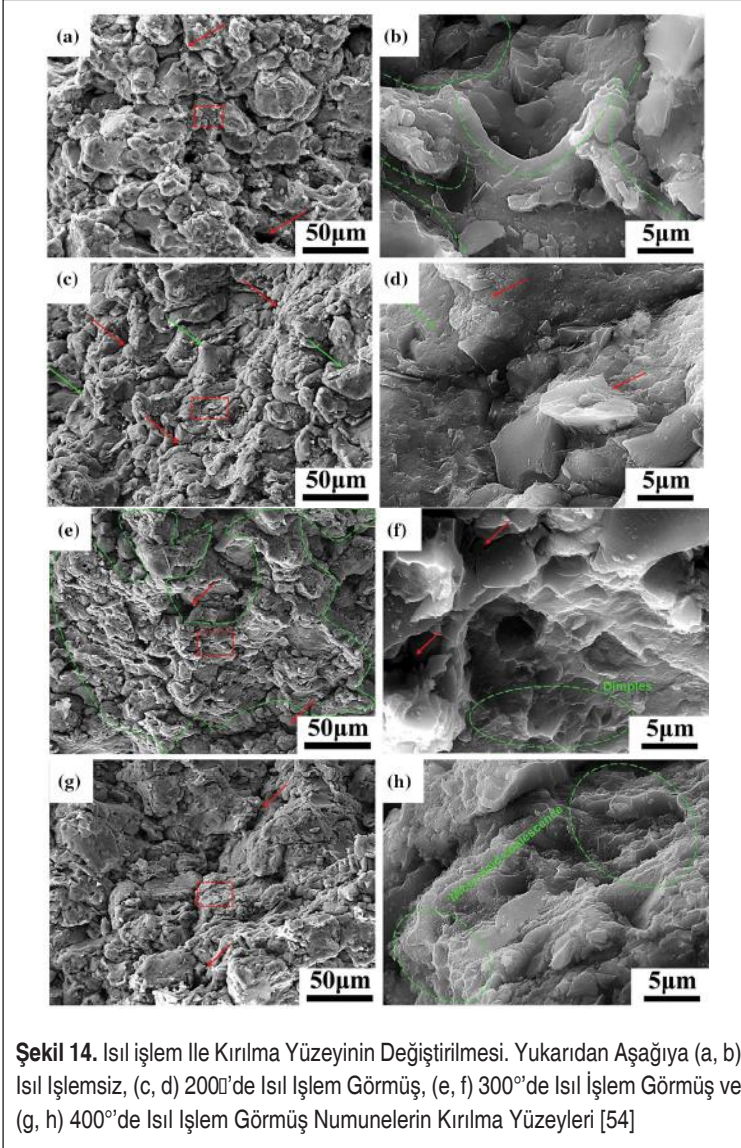
Kırılma mekanizmaları, püskürtme sonrası ısı işlemlerin uygulanmasıyla da değişebilir. Örnek olarak hacimce %23 B4C içeren Al kompozit kaplamaların Ar gazı ortamında 4 saat boyunca 200, 300, 400 ve 500°C farklı sıcaklıklarda ısı işlemden geçirilmesinden sonra yapılan çekme testleri verilmiştir [54]. Isıl işlemsiz durumda maksimum



Şekil 13. Al-5056-SiC Kompozit Kaplamada Artan Takviye İçeriğinin Kırılma Davranışı Üzerindeki Etkisi [50].

çekme mukavemeti 38 MPa iken bahsedilen ısıt işlemlerden sonra bu değer sırasıyla 44, 56, 58 ve 60 MPa'ya yükselmiştir. İşlem görmemiş ve ısıt işlem görmüş numuneler-

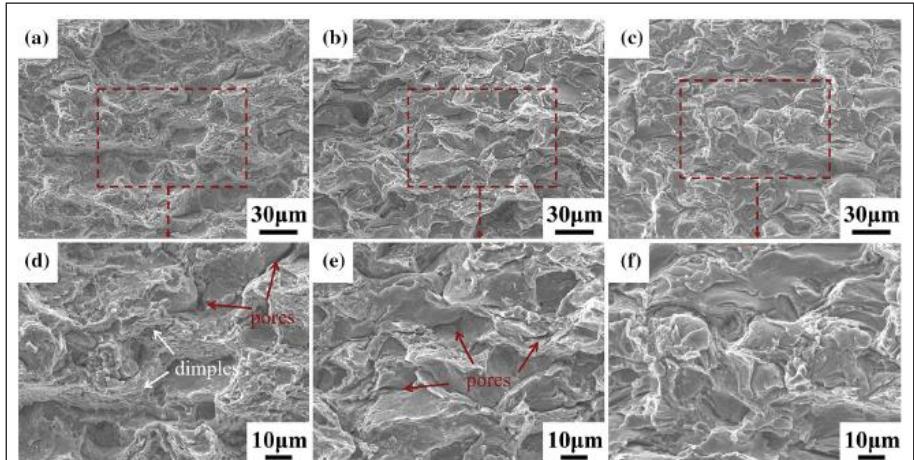
de kırılma hasarının son aşaması kaplamada meydana gelmiştir. Şekil 14(a) ve (b)'de gösterilen ısılsız işlemsiz kaplamanın kırılma analizinde, parçacıkların zayıf bağlandığı ve parçacıklar arasında çok sayıda aralık olduğu için bu bölgelerin çatlak başlatıcı olarak işlev gördüğü ortaya çıkarmıştır. 200°C'deki ısılsız işlem sonucunda bazı parçacıkların kısmen bağlanmış olduğu tespit edilmesine rağmen, zayıf bağlanmış bölgelerin halen önemli miktarda bulunması sebebiyle ısılsız işlemsiz durumda olduğu gibi



Şekil 14. Isılsız işlem ile kırılma yüzeyinin değiştirilmesi. Yukarıdan aşağıya (a, b) ısılsız işlemsiz, (c, d) 200°C'de ısılsız işlem görmüş, (e, f) 300°C'de ısılsız işlem görmüş ve (g, h) 400°C'de ısılsız işlem görmüş Numunelerin kırılma yüzeyleri [54]

aynı çatlak başlangıcı mekanizmasının aktif olduğu bulunmuştur (Şekil 14c ve d). 300°C’de ısıtılma işlemi görmüş numuneler daha güçlü metalurjik bağa sahip olduğu için çukur benzeri yapılar ve sünek kırılmaya ait izler bulunmuştur. Bununla birlikte, kırılma hasarında çatlak başlangıcı olarak işlev gören parçacıklar arası boşluklar ve gözenekler halen mevcuttur (Şekil 14e ve f). 400 °C ve 500 °C sıcaklıkta ısıtılma işlemi tabii tutulmuş numuneler için gevrek kırılmadan tamamen farklı bir hasar bulunmuştur. Tüm kırılma yüzeyleri, sünek kırılmayı işaret eden mikro boşluk oluşumu ve bunların birleşmesine ait görüntüleri içermektedir (Şekil 14g ve h).

Diğer bir çalışmada, gaz atomizasyon tekniğiyle üretilmiş hacimce %4,2 nano-TiB₂ içeren 7075Al kompozit toz malzeme 7075Al-T6 altlık üzerine kaplanmıştır [55]. Bu çalışmada, taşıyıcı gaz olarak azot ve helyum kullanılmıştır. Gaz sıcaklığı, basıncı ve nozul tipinde de birtakım değişiklikler yapılmıştır. Çekme testi sonrası kırılma yüzeyleri farklı büyütme oranlarında Şekil 15’te gösterilmektedir. İşlem koşullarında yapılan değişiklikler biriktirme sırasında farklı deformasyon seviyelerine neden olmuştur. Şekil 15 (a)’da kırılma yüzeyi, tipik bir klivaj özelliği gösterir. Daha fazla plastik deformasyonun ve toparlanmanın meydana geldiği parçacıklar arası sınırlarda bazı çukurlar bulunmaktadır. Taşıyıcı gaz olarak azotun kullanıldığı kaplamada, Şekil 15 (b)’de gösterilen kırılma hasarı tercihen parçacıkların arayüzeyleri boyunca meydana gelmiştir. Kırılma yüzeyinde hemen hemen hiçbir çukur görülmemiş ve gevrek bir kırılma olmuştur. Helyumun taşıyıcı gaz olarak kullanıldığı Şekil 15 (c)’deki kırılma yüzeyi, deforme olmuş parçacıkların içerisinde geçen çatlakları içeren kıvrımlı bir yapı sergilemektedir. Gözlemlenen parçacık içi kırılmanın sebebi, malzeme jeti ve adyabatik kayma kararsızlığı nedeniyle arayüzey bölgelerinde aşırı deformasyo-



Şekil 15. İşlem Koşullarının Kırılma Yüzeylerine Etkisi. Soğuk Püskürtmede Taşıyıcı Gaz Kullanımı Soldan Sağa (a, d) Hava, (b, e) Azot ve (c, f) Helyumdur. (d, e, f), (a, b, c)'nin Daha Yüksek Büyütmeleridir [55]



nun meydana gelmesi ve sonuçta parçacıklar arasında daha güçlü metalik bağların oluşmasıdır. Hasar mekanizmasındaki değişiklik, Şekil 15 (a), (b) ve (c)'deki plastik deformasyon seviyesindeki değişikliklerle uyumludur. Ayrıca, Şekil 15 (a), (b) ve (c)'de gösterilen mikroyapılar için çekme mukavemeti değerleri sırasıyla 325 MPa, 280 MPa ve 350 MPa elde edilmiş ve uzama değerleri sırasıyla %1,2, %0,6 ve %1,2 olarak bulunmuştur. Şekil 15 (d) ve (e)'deki mikroyapıların yakından görünümünde, çekme testleri sırasında kırılma hasarını hızlandırarak mukavemet ve uzamayı azaltan iç kusurlar ve gözenekler gözlemlenebilir [55].

Özetle, kaplama/altlık yapışma mukavemeti, takviye parçacık oranı yükseltilerek sıkıştırma etkisinin artması sonucunda geliştirilebilir. Ara yüzeydeki artan yapışma mukavemeti nedeniyle, hasar mekanizması adezyondan kaplamanın kendi içinde hasara uğradığı koheziona doğru değişebilir. Bununla birlikte, aşırı takviye parçacık kullanılması, etkin metalurjik bağlantı alanlarını azaltabilir ve daha düşük yapışma mukavemeti ile sonuçlanabilir. Kaplamanın kohezyon mukavemeti için de benzer bir etki mevcuttur. Parçacık morfolojisi, kaplamanın kohezyon mukavemetini etkileyebilir. Küresel parçacıklarla takviye edilmiş kaplamalar, keskin köşeli parçacıklara kıyasla daha az gerilim konsantrasyonu oluşturacağından daha yüksek kayma mukavemeti sunar. Isıl işlem, kaplama içindeki bağlanmayı önemli ölçüde iyileştirebilir ve sonuç olarak kompozit kaplamaların kırılma mekanizmasını değiştirebilir.

Aşınma, göreceli hareket esnasında yüzeyde meydana gelen malzeme kaybı olup düşük, orta ve şiddetli olmak üzere 3 farklı rejimde sınıflandırılmaktadır [56]. Düşük aşınma rejiminde talaş kaldırma durumu, belirgin talaş parçacıkları oluşmaksızın bölgesel yüzey deformasyonu ve kazıma mekanizmaları tarafından yönetilir [56]. Temasın hâlihazırda pürüzlülük seviyesinde olduğu orta aşınma rejiminde, birincil mekanizma yüzeyde mikro çatlakların oluşumudur. Bu rejimdeki bölgesel kopma, toz benzeri aşınma kalıntılarının oluşumuna yol açar [56]. Şiddetli aşınma rejiminde ise büyük yüzey altı çatlağı ve makroskopik kopma meydana gelir ve ince bir tabaka halinde aşınma kalıntılarının oluşumuna yol açar [56]. Yürütülen çalışmalarda matriste oluşan plastik deformasyon ve kazıma ile takviye malzemedeki kırılmanın, özellikle seramik takviyeli soğuk püskürtme kaplamalarda aşınma davranışını yöneten önemli süreçler arasında olduğu ifade edilmiştir [50, 57, 58, 59]. Ayrıca bazı çalışmalar arayüzey bağlantısının kuvvetli olması durumunda, takviye parçacıklarının kompozitin yük taşıma kapasitesine önemli ölçüde katkıda bulunabileceğini ve aşınma hızını azaltabileceğini göstermiştir [60, 61, 62]. Öte yandan kusurlu ara yüzey bağlanması, takviye edici parçacıkların kopmasına, kırılmasına ve parçalanmasına yol açabilmekte olup, bu da çeşitli mekanizmalar yoluyla ciddi aşınmaya neden olabilmektedir [60, 63]. Bu mekanizmalardan birincisi, kırılan parçacıklar uygulanan yükü taşıma yeteneklerini kaybeder. Sonuç olarak, matris malzemesindeki kayma gerinimlerinin miktarı önemli ölçüde artar ve bu da deformasyonun belirli bir bölgede yoğunlaşmasına ve yüzey altı tabakalarının ayrılmasına yol açar. İkinci olarak, kırılmış veya kopmuş takviye par-

çacıkları, tabakaların ayrılma hızını artırabilir. Üçüncü olarak, kırılmış veya yerinden sökülen parçacıklar abrazyon aşınması yoluyla ilave malzeme kaldırma mekanizmaları sağlayabilir.

Aşınma, kayma hareketi sırasında kaplamanın mikroyapısı değiştiğinde mekanizmaların gelişebileceği dinamik bir süreçtir. Yapılan bir çalışmada, Ti ve Ti-TiC kompozit kaplamaların kaymalı aşınması sırasında aşınma yüzeyleri doğrudan gözlemlenmiş olup, önerilen mevcut sürtünme ve aşınma mekanizmalarıyla kıyaslanabilir olduğu belirlenmiştir [64]. Sonuçlar incelendiğinde, saf Ti kaplamanın kaymalı aşınma testi sırasında Ti metalin karşı yüzeye transferinin başlangıç aşamasında meydana geldiği ortaya çıkmıştır. Sonraki çevrimlerde ana aşınma mekanizmaları, transfer filmlerinin çatlaması ve oksitlenmiş kalıntıların oluşması olarak değişiklik göstermiş olup, bu durumda ortaya çıkan aşındırıcı parçacıklar daha fazla aşınmaya yol açmıştır. Oksitlenmiş kalıntıların mekanik olarak aşınma yüzeyine kenetlenmesi sonucunda meydana gelen katmanların koruyucu olmadığı görülmüştür. Ti kaplamaya ilave edilen TiC parçacıkların sürtünme davranışını çift yönlü olarak önemli ölçüde değiştirdiği bulunmuştur. İlk olarak, test başlangıcında TiC parçacıkların yerinden çıkması ve sürtünme katsayısında gözlenen artış sebebiyle Ti'nin karşı yüzeye transfer olduğu ve yapıştığı bulunmuştur. İkincisi, TiC içeren kaplamalarda yüzeyden kopan üçüncül parçacıkların arayüzeyde kompakt ve yağlayıcı tribo filmleri oluşturduğu ve daha yüksek çevrimlerde kararlı ve düşük sürtünmeye yol açtığı gözlenmiştir [64].

Dinamik bir süreç olmanın yanı sıra, aşınma ve malzeme kaldırma mekanizmaları malzeme türüne, kompozit kaplamadaki takviye içeriğine ve test koşullarına bağlı olarak önemli ölçüde değişebilir. Düşük oranda seramik takviyesi yapılan WC-Co-Ni kompozit kaplamalarda malzeme kaybına sebep olan baskın mekanizmanın düşük devirli yüzey yorulması olduğu bulunmuştur [65]. Ayrıca düşük seramik içerikli kaplamaların aşınmış yüzeylerinde, kaldırılan aşınma kalıntılarının aşınma izi boyunca sıvanması nedeniyle tribofilm oluşmuştur. Tribofilmin kaplamanın aşınma direncini geliştirmede yararlı bir rol oynadığı ve kaplamanın karşı parça tarafından daha fazla aşınmasını önlediği görülmüştür. Bununla birlikte en yüksek seramik içeriği hacimce %62 olan kaplama yüzeyinde hiçbir tribofilmin üretilmediği tespit edilmiş olup, karakterize edilen aşınma yüzeylerindeki WC çıkıntılarının Ni matris fazının aşınmasını etkin bir şekilde önlediği görülmüştür [65]. Saf Ni ve %10,5 Ni-WC kompozit kaplamaların katı parçacık erozyonu karşılaştırılmış ve akışkanın geliş açısı 30° olduğunda benzer aşınma direnci elde edilmiştir. Ancak normal 90° geliş açısında kompozit kaplamanın daha düşük bir erozyon hızına sahip olduğu ortaya çıkmıştır [60]. Açık değeri 30° olduğunda ana aşınma mekanizmaları kesme ve kazıma şeklinde iken normal geliş açısında deformasyonun belirli bir bölge ile sınırlandırıldığı, çıkıntı oluşumunun ve WC kırılmasının meydana geldiği gözlemlenmiştir. Açık değeri 90° olduğunda ise her iki kaplamanın göstermiş olduğu yüksek aşınma direncinin sebebi olarak aşındırıcı Al_2O_3 parçacıkların kaplamaya gömülmesi ve ardından mekanik olarak modifiye edil-



miş katmanın oluşumu olarak ifade edilmiştir. Bununla birlikte, kompozit kaplamadaki WC parçacıklarının varlığı, Al_2O_3 parçacıklarının gömülmesini ve mekanik olarak modifiye edilmiş katmanın oluşumunu önlemiş, bu durum ise daha düşük erozyon direncine katkıda bulunmuştur. Sonuç olarak 300 açıda WC parçacıkları Ni'yi yüzeyin bazı bölgelerinde aşınmadan koruyabilmiştir. Bununla birlikte kayda değer bir gelişim için WC içeriğinin oldukça düşük olması gerektiği bulunmuştur [60].

Özetle, matris fazındaki plastik deformasyon ve kazıma ile takviyedeki kırılma, soğuk püskürtme kompozit kaplamalardaki ana aşınma mekanizmalarıdır. İlave olarak, zayıf matris/takviye arayüzey bağlanmasının parçacık kopmasına neden olduğu görülmektedir. Aşınma dinamik bir süreçtir, çünkü aşınma sırasında malzemenin kaybı ve sürtünme katmanlarının oluşumu yoluyla sürekli gelişir. Aşınma mekanizmaları ve süreçleri, bir malzeme sisteminden diğerine önemli ölçüde farklılık gösterebilir ve farklı koşullar altında duruma göre incelemeler gerektirebilir. Aşınma mekanizmaları, kayma kuvvetini azaltmaya yönelik olarak yükü dağıtan ve/veya katı yağlayıcıların dahil edilmesini sağlayan sert takviye ilavesiyle daha düşük aşınma kaybı elde etmek için modifiye edilebilir.

8. ENDÜSTRİYEL UYGULAMALAR

Son yıllarda soğuk püskürtme işlemi elektronik sistemlerin tamiri, eklemeli imalat, kaynak, sert lehimleme, yüzey koruma, tıbbi cihazlar ve malzemeler gibi uygulama alanlarına yönelik olarak kullanılmaktadır. Bu doğrultuda soğuk püskürtme yönteminin uygulandığı sektörler değerlendirildiğinde savunma sanayi, otomotiv, havacılık ve medikal endüstrileri daha fazla öne çıkmaktadır [66, 67]. Soğuk püskürtme yöntemi bazı endüstriyel uygulamalarda kullanılan parçaların, kullanım sahasındayken onarımı için devrim yaratacak nitelikte etkiye neden olmuştur. Özellikle havacılık, petrokimya ve nükleer enerji endüstrisinde bakım maliyetlerinin düşürülmesine yönelik olarak ciddi tasarrufların ortaya çıkarılmasını sağlamıştır. Söz konusu işlevsel özellikler ve uygulama alanları ile ilgili soğuk püskürtme yönteminin mevcut potansiyeli Tablo 6'da toplu olarak özetlenmiştir.

8.1 Eklemeli İmalat ve Onarım

Yüksek yoğunluk, üstün yapışma, yüksek birikme hızı ve birikme verimi gibi özellikler soğuk püskürtme teknolojisini net şekle yakın parça üretimi ve onarım için cazip hale getirmektedir. Soğuk püskürtme yöntemi kullanılarak temel malzeme preformları üzerindeki flanşlar, çıkıntılar ve direkler gibi yapıların üretimi için bir yöntem patenti alınmıştır [68]. Burada son parçaların mekanik özelliklerini iyileştirmek için sıcak izostatik presleme, ısı işlem, yaşlandırma, su verme, germe ve tavlama işlemleri imalat sürecine dâhil edilmiştir. Heinrich ve arkadaşları, içi boş bir boru üretmek için soğuk püskürtme işleminin kullanılabileceği bir yöntem patentini almıştır [69]. Bu yöntemde içi boş bir borunun birikmesi için düşük yapışma özelliğine sahip silindirik bir altlık kullanılmıştır. Burada düşük yapışma özelliğine sahip soğuk püskürtme



Tablo 6. Soğuk Püskürtme Yönteminin Mevcut Potansiyeline Yönelik Genel Bakış [42]

İşlevsel Özellikler	Metal ve Alaşımları	Metal/Polymer	Meta/Seramik (MMC)	Meta/Metal (MMC)	İntermetalikler	Oksitler	Seramikler	WC Sermetler	MMC/Sermetler	MALCer	MCrAlY	Stelitelere	Karbürler	Polymerler	Ternitler	Nanomalzemeleler	Uygulama Alanı
Korozyon Direnci	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Havacılık, otomotiv, elektronik, savunma, petrokimya, enerji
Oksidasyon Direnci	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Havacılık, deniz, elektrik-elektronik uygulamaları
Erozyon (Elektrik, kaviteasyon ile) Direnci	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Çeşitli endüstri sektörleri
Yüksek Özgül Mukavemet	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Otomotiv, havacılık, işleme, dekorasyon
Aşınma Direnci	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Çeşitli endüstri sektörleri
Aşındırıcı	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Otomotiv, havacılık, denizcilik, inşaat mühendisliği
Sürtünme Önleyici	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Çeşitli endüstri sektörleri
Özel Bağlayıcı Tabaka	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Havacılık, savunma, petrokimya
Restorasyon	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Çeşitli endüstri sektörleri
Yığın Matzeme	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Biyomedikal (dış ve ortopedik implantlar)
Biyoyumluluk	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Biyomedikal
Anti-bakteriyel	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Elektronik, havacılık, enerji depolama, elektrik kontak uygulamaları
İletkenlik/Yalıtım (Elektriksel-Termal)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Enerji üretim endüstrisi
Fotovoltaik Performans	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Enerji üretim endüstrisi
Fotokatalitik Performans	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Enerji üretim endüstrisi, enerji depolama
Enerji Yüklü Malzemeler	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	



kaplama, taslak kalıbın kaplamadan ayrılabilmesi bakımından kritik öneme sahiptir. Bu durum püskürtme uygulama açısının 0° 'den 90° 'ye değiştirilmesiyle sağlanmıştır. Payne ve Garland'ın soğuk püskürtme işlemiyle ince duvarlı muhafazaların onarımı için aldığı patent, alüminyum döküm parçalar gibi aşınmış iç ve dış yüzeylere sahip malzemelerin onarımını kapsamaktadır [70]. İnce duvarlı bileşenler, genellikle ağırlığın kritik öneme sahip olduğu havacılık ve otomotiv endüstrilerinde kullanılmaktadır. İnce duvarlı muhafazalar kullanım şartlarında korozyon, erozyon ve mekanik aşınmaya maruz kalmaktadır. Son yıllarda soğuk püskürtme yöntemi, havacılık ve otomotiv bileşenlerinin onarımı ve imalatına uyarlanmıştır. Bunun ile ilgili yürütülen bir patent çalışmasında türbin rotorunun üretimi ve onarımına yönelik olarak soğuk püskürtme yöntemi kullanılmıştır [71]. Diğer bir patentte türbin kanatlarının tamir edilmesi için soğuk püskürtme yöntemine başvurulmuştur. Buradaki tamirin amacı türbin kanatlarında görülen aşınma, çatlama ve mikro yapısal bozulmaların önüne geçmektir [72].

8.2 Kaynak ve Lehimleme

Soğuk püskürtme yönteminin düşük işlem sıcaklığı, düşük oksijen içeriği ve yüksek birikme hızına sahip olmasının yanı sıra işlem hızı ile birikmenin çok iyi şekilde kontrol edilmesi sayesinde kaynak ve lehim uygulamalarında kullanımının önü açılmıştır. Schmid ve Doesburg tarafından Sn-Ag-Cu, Sn-Ni-Cu, Sn-Cu, Sn-Zn ve diğer düşük erime noktasına sahip kompozit malzeme karışımlarıyla lehimler üretmek için soğuk püskürtme işleminin kullanıldığı bir yöntem patenti alınmıştır [73]. Miller ve arkadaşları giydirmeye yapılar da bağlantı oluşturulması ile ilgili soğuk püskürtme yönteminin kullanımına yönelik patent çalışması gerçekleştirmiştir [74]. Burada sürekli bir bağlantı oluşturmak için kaplama malzemesinin iki bağlantı arasına püskürtülmesi söz konusudur. Ayrıca bağlantıların tantaldan yapılabileceği ve korozyona dayanıklı bağlantılar üretmek için çelik kenarları tantal kaynaklarla kaynaklamak için kullanılabilmesi ifade edilmiştir. Soğuk püskürtme uygulamaları yarı iletken contalara kadar uzanmaktadır. Ohno, Cu gibi metalik tozdan yapılmış bir reçine bağlantı kaplamasını iki yarı iletken altlık arasına biriktirmek için soğuk püskürtme işleminin kullanıldığı bir yöntemin patentini almıştır. Soğuk püskürtme işlemi geleneksel kaynak ve lehimleme tekniklerinden farklı olarak, mikroyapısal bozunmayı ve aşırı ısıdan etkilenen bölgenin oluşumunu sınırlandıran düşük işlem sıcaklıkları altında gerçekleştirilir [75]. Schaeffer ve diğerleri, türbin kanatları ve braketleri gibi havacılık bileşenlerinin kaynaklanması ve lehimlenmesinde, titanyum alüminit tozunun soğuk püskürtme işlemiyle biriktirilmesini içeren bir yöntemin patentini almıştır [76].

8.3 Koruyucu Kaplamalar

Ajdelsztajn ve arkadaşları, soğuk püskürtme yöntemiyle kobalt ve mangan alaşımını içeren korozyona dayanıklı kaplamaların üretilmesi için bir patent almıştır [77]. Benzer şekilde Raybould ve arkadaşları magnezyum bileşenlerinin korozyon ve aşınmadan korunması ve onarımı için bir yöntem patentini almıştır [78]. Bu amaç doğ-

rultusunda korozyona dayanıklı soğuk püskürtme kaplamalar içerisinde alüminyum, alüminyum alaşımları, titanyum ve alaşımları ile sert parçacık içerikli kompozitler kullanılmıştır. Koruyucu kaplama olarak korozyondan korumak için alüminyum katman ve erozyon aşınmasından korumak için dış katmanda titanyum veya sert parçacık içeren kompozit malzemelerin kullanıldığı belirtilmiştir. Bunting ve arkadaşları, korozyon hasarına uğramış bir gaz türbini bileşeninin aslına uygun ölçülerde ve düşük oksidasyon hızına sahip olacak şekilde onarılmasıyla ilgili bir yöntem geliştirmiştir [79]. Bu yöntem, ana malzemeye kıyasla üstün korozyon direncine sahip alüminyum, magnezyum, silisyum ve bunların karışımlarından oluşan malzemelerin soğuk püskürtme yöntemi ile kaplanmasını içermektedir. Bu noktada malzeme oksidasyonunu azaltmak için düşük biriktirme sıcaklıkları ve azot veya helyum gibi oksitleyici olmayan taşıyıcı gazlar seçilmektedir. Miyamoto ve Hirano, kalay içeren alüminyum esaslı alaşımı soğuk püskürtme yöntemiyle rulmanların kayma yüzeyine kaplamıştır [80]. Termal püskürtme kaplamalara kıyasla farklı fazların soğuk püskürtülmüş yapıda daha iyi dağılması ve daha düşük oksit içeriğine sahip olması sayesinde performansta iyileşme tespit edilmiştir.

8.4 Havacılık Sanayi

Havacılık endüstrisinde soğuk püskürtme yönteminin yeni uygulamaları ortaya çıkmaktadır. Haynes ve arkadaşları, gaz türbinlerindeki dönen ve sabit bileşenler arasında aşınabilir bir conta oluşturmak amacıyla, bir sızdırmazlık destek malzemesi üzerine aşınabilir kaplamalar uygulayan yöntemin patentini almıştır [81]. Titanyum veya nikel esaslı alaşımdan üretilen soğuk püskürtme kaplamanın istenilen yapısal sertliğe, sızdırmazlığa ve daha fazla aşınabilirliğe sahip olması için işlem parametreleri değiştirilerek kaplama içerisinde değişen seviyelerde gözeneklilik oluşturulmuştur. Soğuk püskürtme işleminin başka bir uygulaması, türbin motoru bileşenleri üzerine bağlayıcı astarların biriktirilmesidir [82]. Bu amaç doğrultusunda patenti alınan yöntemdeki en önemli yenilik, taşıyıcı gazın bir kısmının kaplama içerisinde hapsedilmesidir. Bir sonraki ısı işlem sırasında içeride hapsedilen gaz yayılarak daha büyük gözenekler oluşturmaktadır. Seçilen malzemeler arasında MCrAlY, alüminyum, titanyum, paladyum ve diğer geçiş metalleri bulunmaktadır. İşlem sonucunda %25-%50 arasında gözenekliliğe sahip bağlayıcı astar üretildiği ve böylece türbin motorunun çalışma sıcaklığının artırıldığı ifade edilmiştir.

8.5 İmalat Sanayi

Barker ve arkadaşları tarafından yüksek saflıktaki elektrokatalitik malzemelerin bir elektrot üzerine kaplandığı bir yöntem patentlenmiştir. Bu çalışmada soğuk püskürtme yönteminin toz malzeme özelliklerini değiştirmediği ifade edilmiştir [83]. Soğuk püskürtme yöntemi, biriktirme sırasında metalik toz oksidasyonunu önleyebildiğinden ve soğuk püskürtme kaplamaların yüksek termal iletkenlik göstermesinden



dolayı güç modülleri gibi ısı transfer cihazlarında da uygulama alanları bulmaktadır [84,85]. Kruger ve Ullrich, bakır indiyum selenid veya YBaCuO gibi güneş pili materyallerinin, tekstürlü altlıklar üzerine birikmesini önermiştir. Burada tekstürlü altlık malzemelerin güneş pillerinin verimliliğini arttırdığı iddia edilmiştir [86]. Doye ve arkadaşları, reaktif gazları kaplama yapısına dahil ederek fotokatalitik özelliklerini geliştirmek için bir yöntem önermiştir. Söz konusu patent çalışmasında soğuk püskürtmeyle yüzeye biriktirilen titanyum dioksit, kaplama işlemi sürerken UV ışığı ile aktive edilmiştir. Bu sayede taşıyıcı gaz olan reaktif azot molekülleri kaplama yüzeyinde parçalanmıştır. Daha sonra kemisorpsiyon mekanizmasıyla azot atomları, oksijen atomlarını titanyum dioksit kristal yapısının dışına iterek titanyum oksinitrür oluşturmuştur. Kaplamaların, kataliz için uygun yüzeyi arttıran değişik oranlarda gözeneklilik içerdiği tespit edilmiştir [87].

8.6 Medikal Uygulamaları

Soğuk püskürtmede gözenekliliğin kontrolü, tıbbi cihaz uygulamalarında avantaj sağlamaktadır. Kramer tarafından stentler, anastomoz çipleri, embolik koruma filtreleri, doku/organ ekleri gibi tıbbi cihazlardaki uygulamalar için tüplerin, levhaların ve altlık tabakalarının net şekle yakın üretimi için soğuk püskürtme yöntemi patentlenmiştir [88]. Ayrıca, biyolojik olarak uyumlu polimer veya seramik içeren yüksek gözenekli soğuk püskürtme kaplamaların medikal cihazlardaki uygulamaları bulunmaktadır. Bu uygulamaların amacı cihaz biyoyumluluğunu artırarak ilaç ve tedavi edici ajanlar için ilaç salım sistemi işlevini görmektir. Gözenekli yapılar, gözenekli toz malzemelerin püskürtülmesiyle veya püskürtme işleminde uygun değerlere sahip parametreler seçilerek elde edilebilir. İlaçların doğrudan gözenekli tıbbi cihaza soğuk püskürtme ile biriktirilmesi de hedeflenmektedir.

8.7 Elektroiletken Parçalar ve Manyetik İletkenler

Soğuk püskürtme yönteminde kullanılan toz parçacıklar tercihen elektriksel olarak iletken malzemeler veya lehmlenebilir malzemelerdir. Bunlar Sn ve alaşımları, özellikle Sn-Ag alaşımları, Al ve alaşımları, Ag ve alaşımları, Au ve alaşımları, Pb ve alaşımları, Zn ve alaşımları ve bu malzemelerin kompozit karışımlarıdır. Elektrik iletken bir altlık üzerinde soğuk püskürtme ile elektrik temaslarının sağlanması bir avantajdır [89]. Genel olarak bu temasın oluşturulması için alt tabakanın önceden temizlenmesi gerekli olup, soğuk püskürtme yöntemi ile yüzeyin ilk temizliği olmadan da temas yaratılabilmektedir. İlk olarak parçacıklar altlık malzemeyi oksitlerden arındırır ve sonraki süreçte parçacıklar yakın elektrik teması gerçekleştirerek altlığa yapışır.

Elektronik bileşenlerin ve elektrik sistemlerinin modern motorlu taşıtlara daha fazla dâhil edilmesiyle, yüksek akım ve daha iyi sıcaklık yönetimi yeteneklerine sahip devreleri olan bileşenlere ve sistemlere daha fazla ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tür motorlu taşıtlarda yaygın olan yüksek güç uygulamalarını ve gereksinimlerini karşılamak için



bu tür yeteneklere sahip elektronik devreler gereklidir. Genel olarak, bir devrenin bu tür kriterleri karşılması için, ısı üretimini en aza indirmek ve devre soğutmaya yardımcı olmak amacıyla, ısıyı ileten veya termal enerjiyi yayan metal iletken yolunun yeterince kalın olması gereklidir. Söz konusu bir çalışmada yüksek akım uygulamalarında kullanım için bakır esaslı bir devre tercih edilmiştir. Bakır esaslı devre, elektriksel olarak yalıtkan bir altlığa, istenilen devre şekline göre oluşturulan gümüş içerikli bir bağ katmanına ve plastik deformasyona uğramış bakır parçacıklarını içeren elektriksel olarak iletken bir katmana sahiptir [90].

Çok hücreli pil yapılarında güvenli elektrik bağlantılarının elde edilmesi önemlidir. Lityum iyon çok hücreli pilleri için bu tür bağlantılar özellikle bazı kriterleri yerine getirmesi açısından önemlidir. Bu kriterler içerisinde, benzer olmayan metaller ile fiziksel bağ kurulması, bağlantının 0,2 mOhm'un altında elektrik direncine sahip olması, mekanik ve termal etkilere dayanıklı olması, yüksek korozyon direnci sergilemesi ve kaynaklama işlemi sırasında pil hücresinin sıcaklığını ~ 100 °C'nin altında tutma kabiliyeti verilebilir. Bu amaçla iki parçanın birbirine fiziksel olarak bağlanması ve düşük dirence sahip elektrik bağlantısının oluşturulması için soğuk püskürtmeyi içeren bir işlem önerilmiştir [91].

Manyetik malzemeleri bir taşıyıcı altlık üzerine termal olarak püskürtmek mümkündür. Ancak termal püskürtme işleminden gelen yoğun ısı bazı metallerin oksitlenmesine veya oksit üretmesine neden olur. Oksitler kaynaklandıkları ana metallerden çok daha zayıf manyetik alanlar üretir. Bununla birlikte soğuk püskürtme işlemi mıknatıs üretimi için kullanılır. Bu nedenle manyetik malzeme yüksek sıcaklıklara maruz kalmaz. İstenmeyen oksitlerin oluşumunu azaltır ve mıknatısın nihai şekline uygun olarak malzemenin hassas bir şekilde birikmesini sağlar [92].

Gerçekleştirilen diğer bir çalışmada, elektrik devrelerinin üretimi için soğuk püskürtme yöntemi ve cihazı patentlenmiştir. Bu patent çok az maskeleme kullanarak veya maskeleme olmadan desenli bir elektrik devre kartı üretmeyi mümkün kılmaktadır. Ayrıca, bu buluş üç boyutlu olarak şekillendirilmiş bir altlık malzemeye uygulanabilmektedir. Sonuç olarak elektrik devresi hemen hemen her yüzeye püskürtülebileceği için birçok yeni kullanım alanını ortaya çıkarmaktadır [93]. Soğuk püskürtme yöntemi yeni elektroiletken ve manyetik cihazların üretimi esnasında lehimleme işlemi, yüzeyin onarımı ve korunması aşamalarında uygulama alanı bulmaktadır. Soğuk püskürtme işlemi ile ortaya çıkan kaplamaların mikron altı boyuta ve gözenekli yapıya sahip olması avantajlı sonuçlar doğurmaktadır [94].

8.8 Savunma Sanayi

Soğuk püskürtme yönteminin savunma sanayi uygulamaları daha çok tamir-onarım, bakım, eklemeli imalat, aşınma ve korozyon direncinin iyileştirilmesi çerçevesinde yoğunlaşmaktadır. Bu doğrultuda alüminyum ve magnezyum alaşımları başta olmak



üzere çelik, nikel bazlı süper alaşımlar ve pirinç/bronz alaşımları gibi yüksek mukavemetli malzemeler için çeşitli onarım süreçleri geliştirilmiştir. Dökme magnezyum ve alüminyum alaşımları hafifliği, yüksek mukavemet/ağırlık oranları ve düşük üretim maliyetleri nedeniyle dişli kutuları ve şanzıman muhafazaları gibi havacılık ve savunma sanayi bileşenlerinde kullanılır. Şanzımanlar ve şanzıman mahfazaları özellikle korozyon, aşınma ve/veya darbe hasarlarına maruz kalmaktadır [53,95].

Magnezyum alaşımlarının boyutsal yenilenmesi ve korozyondan korunması için yüzeylerine soğuk püskürtme yöntemiyle alüminyum ve alüminyum alaşımları kaplanır. Soğuk püskürtülmüş alüminyumun korozyona karşı korumadaki en önemli görevi pasif film oluşumunu hızlandırmasıdır. Dünya geneline bakıldığında özellikle askeri hava araçlarında görülen magnezyum korozyonu için bakım/onarım maliyetleri oldukça yüksektir. Aynı zamanda ülkelerin askeri araç envanterine bakıldığında her biri magnezyum alaşımlarından üretilen ve genellikle şanzıman ve şanzıman muhafazalarından oluşan çok sayıda bileşene sahip binlerce uçak ve helikopter bulunmaktadır [53]. Helikopter iniş takımı amortisörlerinde ve uçak pervane kanatlarında kullanılan alüminyum alaşımlarının (AA2224, AA7075 vb.) onarımında soğuk püskürtme teknolojisinin potansiyeli gösterilmiştir [96]. Uluslararası Toz Metalurjisi ve Yeni Malzemeler Araştırma Merkezi tarafından, 6061 alüminyum fan gövdesi de dâhil olmak üzere yüksek seviyelerde hasara maruz kalan gaz türbini bileşenlerini onarmak için soğuk püskürtme işleminin çeşitli uygulamalarda kullanıldığı bildirilmiştir [53]. Başka bir uygulama, titanyum kompresör muhafazasının imalatında başlangıç malzemesi ve işleme atıklarını en aza indirmek için belirli alanların soğuk püskürtmeyle titanyum kaplanmasıdır. Benzer bir yaklaşım ile bakır, alüminyum ve çinko gibi diğer malzemelerin kullanıldığı difüzörler, yakıcılar, türbinler ve egzoz nozulları gibi parçalarda da başarı sağlandığı rapor edilmiştir. Ayrıca alüminyum ve magnezyum havacılık bileşenlerinin onarımına yönelik pervane kanadı tamiri gerçekleştirilmiştir. Askeri uçaklarda görülen bir başka sorun dış panel üzerinde yer alan panel sabitleme delikleri etrafında sürtünme nedeniyle meydana gelen aşınmadır. Panel 2024-T6 alüminyum alaşımından imal edilmiş olup, alüminyum alaşımı tozun soğuk püskürtülmesiyle onarım işlemi gerçekleştirilmiştir. Menteşe bağlantı parçaları, uçuş sırasında aşınma ve korozyon hasarına maruz kalmaktadır. Menteşe bağlantı parçalarının hasarını uçaktan sökmeden onarmak için Al-7075 tozunu kaplayan bir soğuk püskürtme işlemi geliştirilmiştir. Uçaklarda yer alan iniş takımları aksları 2024 alüminyum alaşımından imal edilmektedir. Bu parçalar ile yaşanan en büyük sorun aşınma hasarıdır. Dolayısıyla iniş takımları akslarının aşınma performanslarını arttırmak için nikel esaslı tozlar seçilerek soğuk püskürtme kaplamalar kullanılmıştır [95].

9. SONUÇLAR

Soğuk püskürtme, toz metal parçacıklarını ergime noktasının altındaki sıcaklıklarda parça yüzeylerine biriktirmek için termal enerji yerine kinetik enerji kullanan bir kaplama işlemidir. Biriktirilen kaplamalar, parçacıkların orijinal faz yapısını korurken



geleneksel termal püskürtme işlemleriyle ilişkili oksit oluşumunu ve artık gerilmeleri en aza indirerek altlık yüzeylerine gelişmiş aşınma ve korozyon koruması sağlar.

Son yıllarda soğuk püskürtme sistemindeki nozul tasarımına yönelik birtakım çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar neticesinde, biriktirme hızı ve biriktirme verimliliğinin artırılabilceği tespit edilmiştir. Nozul tasarımındaki gelişmeler, nispeten daha yüksek biriktirme hızlarının yanı sıra daha büyük parçacıkları biriktirme kabiliyetini de teşvik etmiştir. Akışkanlar dinamiği modelleri ile geliştirilen yüksek parçacık hızlarına sahip nozullar, daha yoğun kaplamaları ve daha yüksek biriktirme verimliliğini sağlamıştır. Nozul uzunluğunun artırılmasının parçacık hızını önemli ölçüde etkilediği gösterilmiştir. Örneğin, merkezi nozul uzunluğunun arttırılmasıyla, taşıyıcı azot gazıyla püskürtülen bakır parçacıkların hesaplanan hızı ciddi oranda yükseltilmiştir.

Soğuk püskürtme işlemi birçok sektöre yönelik uygulama alanına sahiptir. Son zamanlardaki gelişmeler neticesinde havacılık, medikal ve eklemeli imalat ön plana çıkmaktadır. Yakın zamanda gelecek vaat eden bir çalışma, havacılık endüstrisi için umut verici olan düşük ağırlıklı ve yüksek mukavemetli karbon fiber kompozitlerin metalle kaplanması işlemidir. Geleneksel üretim proseslerinin fiber kompozit malzemelerin kaplanması işleminde uygulanması zordur çünkü zaman alır, emek gerektirir ve oldukça pahalıdır. Bununla birlikte, karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kompozitlerin metalle kaplanması, havacılık ve uzay mühendisliğinde uçak gövdesinin iletkenliğini arttırmaya yardımcı olur. Soğuk püskürtme işlemleri, CFRP yapılarındaki oksidasyon ve ağırlık artışı sorunlarını çözmede etkili olmuştur.

Son zamanlarda yapılan araştırmalar, eklemeli imalatın soğuk püskürtme işlemlerinin uygulanması için ticari olarak en uygun seçenek olacağını öne sürmektedir. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte, soğuk püskürtmenin uygulanabilirliğinin rüzgâr enerjisi, fotovoltaik enerji, mimari ve tıp gibi daha gelişmiş alanlara yayılması beklenmektedir. Örneğin, fotovoltaik uygulamalarda, güneş pillerindeki karmaşık iletken tasarımların imalatı için uygulanabilir. Rüzgâr enerjisi endüstrisinde, karmaşık polimer-matris kompozitlerden üretilen parçalarda yüzey performansını iyileştirmek için bu yöntem kullanılabilir. Diğer taraftan biyomedikal alanda, tıbbi implantların soğuk püskürtmeyle üretilmesi için Co-Cr ve paslanmaz çelik toz karışımlarının kullanılması önerilmiştir. Co-Cr, paslanmaz çeliğe göre korozyona karşı daha dayanıklıdır, ancak aynı zamanda üretimi daha zor ve daha pahalıdır. Soğuk püskürtme işlemi, paslanmaz çeliğin Co-Cr ile birleştirilerek ucuz ve kolay bir şekilde korozyon direnci ve mukavemet açısından üstün özellikler kazanmasını sağlar. Bunun neticesinde, gelecekte yeni biyomalzemelerin geliştirilmesi mümkün hale gelebilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Dokuz Eylül Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. (BAP Proje no: 2020.KB.FEN.001).



KAYNAKÇA

1. **Thurston, S.H.** Method of Impacting One Metal Upon Another, US706701, year of priority (issued): 1900 (1902).
2. **Thurston, S.H.** Process of Coating One Metal with Another Metal, US706702, year of priority (issued): 1901 (1902).
3. **Rocheville, C. F.** 1958. Device for Treating the Surface of a Workpeice. US3100724, year of priority (issued).
4. **Papyrin, A., Kosarev, V., Klinkov, S., Alkhimov, A., & Fomin, V.** 2007. Discovery of the cold spray phenomenon and its basic features, Editor(s): Papyrin, A., Kosarev, V., Klinkov, S., Alkhimov, A., Fomin, V., ISBN-13: 9780080451558, Cold Spray Technology, Pages 1-32, Elsevier.
5. **AlMangour, B.** 2018. Fundamentals of Cold Spray Processing: Evolution and Future Perspectives, P. Cavaliere (ed.), Cold-Spray Coatings. (pp. 3-24). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67183-3_1
6. **Irissou, E., Legoux, J. G., Ryabinin, A. N., Jodoin, B., & Moreau, C.** 2008. "Review on cold spray process and technology: part I—intellectual property," Journal of Thermal Spray Technology, vol. 17, no. 4, 495-516. <https://doi.org/10.1007/s11666-008-9203-3>
7. M.F. Smith, Chapter 1: Introduction to Cold Spray, Editor(s): Kay, C. M., & Karthikeyan, J. In High Pressure Cold Spray: Principles and Applications, ASM International, 2016, Pages 1-16.
8. **Alkhimov, A. P., Papyrin, A. N., Kosarev, V. F., Nesterovich, N. I., & Shushpanov, M. M.** 1994. U.S. Patent No. 5,302,414. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
9. **Dykhuiizen, R. C., & Smith, M. F.** 1998. "Gas dynamic principles of cold spray," Journal of Thermal spray technology, vol. 7, no. 2, p. 205-212. <https://doi.org/10.1361/105996398770350945>
10. **Dykhuiizen, R. C., Smith, M. F., Gilmore, D. L., Neiser, R. A., Jiang, X., & Sampath, S.** 1999. "Impact of high velocity cold spray particles," Journal of Thermal spray technology, vol. 8, no. 4, p. 559-564. <https://doi.org/10.1361/105996399770350250>
11. **Assadi, H., Gärtner, F., Stoltenhoff, T., & Kreye, H.** 2003. "Bonding mechanism in cold gas spraying," Acta Materialia, vol. 51, no. 15, p. 4379-4394. [https://doi.org/10.1016/s1359-6454\(03\)00274-x](https://doi.org/10.1016/s1359-6454(03)00274-x)
12. **Schmidt, T., Gärtner, F., Assadi, H., & Kreye, H.** 2006. "Development of a generalized parameter window for cold spray deposition," Acta materialia, vol. 54, no. 3, p. 729-742. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.10.005>
13. **Assadi, H., Kreye, H., Gärtner, F., & Klassen, T.** 2016. "Cold spraying—A materials perspective," Acta Materialia, vol. 116, p. 382-407. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.06.034>
14. **Schmidt, T., Assadi, H., Gärtner, F., Richter, H., Stoltenhoff, T., Kreye, H., & Klassen, T.** 2009. "From Particle Acceleration to Impact and Bonding in Cold Spraying," Journal of Thermal Spray Technology, vol. 18, no. 5-6, p. 794-808. <https://doi.org/10.1007/s11666-009-9357-7>

15. **Li, W. Y., Li, C. J., & Liao, H.** 2010. "Significant influence of particle surface oxidation on deposition efficiency, interface microstructure and adhesive strength of cold-sprayed copper coatings," *Applied Surface Science*, vol. 256, no.16, p. 4953-4958. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.03.008>
16. **Vidaller, M. V., List, A., Gaertner, F., Klassen, T., Dosta, S., & Guilemany, J. M.** 2015. "Single impact bonding of cold sprayed Ti-6Al-4V powders on different substrates," *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 24, no. 4, p. 644-658. <https://doi.org/10.1007/s11666-014-0200-4>
17. **Grujicic, M., Zhao, C. L., DeRosset, W. S., & Helfritsch, D.** 2004. "Adiabatic shear instability based mechanism for particles/substrate bonding in the cold-gas dynamic-spray process," *Materials & design*, vol. 25, no. 8, p. 681-688. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2004.03.008>
18. **Grujicic, M., Saylor, J. R., Beasley, D. E., DeRosset, W. S., & Helfritsch, D.** 2003. "Computational analysis of the interfacial bonding between feed-powder particles and the substrate in the cold-gas dynamic-spray process," *Applied Surface Science*, vol. 219, no. 3-4, p. 211-227. [https://doi.org/10.1016/s0169-4332\(03\)00643-3](https://doi.org/10.1016/s0169-4332(03)00643-3)
19. **Hussain, T., McCartney, D. G., Shipway, P. H., & Zhang, D.** 2009. "Bonding mechanisms in cold spraying: the contributions of metallurgical and mechanical components," *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 18, no. 3, p. 364-379. <https://doi.org/10.1007/s11666-009-9298-1>
20. **Champagne, V. K.** 2007. *The cold spray materials deposition process*, ISBN: 978-1-84569-181-3, Elsevier Science.
21. **Rokni, M. R., Nutt, S. R., Widener, C. A., Crawford, G. A., & Champagne, V. K.** 2018. *Structure-Properties Relations in High-Pressure Cold-Sprayed Deposits*. In *Cold-Spray Coatings* (p. 143-192), Editor: Cavaliere, P., ISBN: 978-3-319-67182-6, Springer, Cham.
22. **Gärtner, F., Stoltenhoff, T., Schmidt, T., & Kreye, H.** 2006. "The cold spray process and its potential for industrial applications," *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 15, no. 2, p. 223-232. <https://doi.org/10.1361/105996306x108110>
23. **Smith, M. F.** 2007. *Comparing cold spray with thermal spray coating technologies*. In *The cold spray materials deposition process* (p. 43-61), ISBN: 978-1-84569-181-3, Woodhead Publishing.
24. **Ghelihi, R., & Guagliano, M.** 2009. "Coating by the cold spray process: a state of the art," *Frattura ed Integrità Strutturale*, vol. 3, no. 8, p. 30-44. <https://doi.org/10.3221/igfesis.08.03>
25. **Kliemann, J. O., Gutzmann, H., Gärtner, F., Hübner, H., Borchers, C., & Klassen, T.** 2011. "Formation of cold-sprayed ceramic titanium dioxide layers on metal surfaces," *Journal of thermal spray technology*, vol. 20, no. 1-2, p. 292-298. <https://doi.org/10.1007/s11666-010-9563-3>
26. **Borchers, C., Gärtner, F., Stoltenhoff, T., & Kreye, H.** 2005. "Formation of persistent dislocation loops by ultra-high strain-rate deformation during cold spraying," *Acta Materialia*, vol. 53, no. 10, p. 2991-3000. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.02.048>
27. **Sundararajan, G., Phani, P. S., Jyothirmayi, A., & Gundakaram, R. C.** 2009. "The



- influence of heat treatment on the microstructural, mechanical and corrosion behaviour of cold sprayed SS 316L coatings,” *Journal of materials science*, vol. 44, no. 9, p. 2320-2326. <https://doi.org/10.1007/s10853-008-3200-2>
28. **Murray, J. W., Zucoli, M. V., & Hussain, T.** 2018. “Heat treatment of cold-sprayed C355 Al for repair: microstructure and mechanical properties,” *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 27, no. 1-2, p. 159-168. <https://doi.org/10.1007/s11666-017-0665-z>
 29. **Raelison, R. N., Xie, Y., Sapanathan, T., Planche, M. P., Kromer, R., Costil, S., & Langlade, C.** 2018. “Cold gas dynamic spray technology: a comprehensive review of processing conditions for various technological developments till to date”, *Additive Manufacturing*, vol. 19, p. 134-159. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.07.001>
 30. **Li, W., Yang, K., Yin, S., Yang, X., Xu, Y., & Lupoi, R.** 2018. “Solid-state additive manufacturing and repairing by cold spraying: A review,” *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 34, no. 3, p. 440-457. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2017.09.015>
 31. **Yin, S., Aldwell, B., & Lupoi, R.** 2018. Cold Spray Additive Manufacture and Component Restoration. In *Cold-Spray Coatings* (pp. 195-224), Editor: Cavaliere, P., ISBN: 978-3-319-67182-6, Springer, Cham.
 32. **Yin, S., Cavaliere, P., Aldwell, B., Jenkins, R., Liao, H., Li, W., & Lupoi, R.** 2018. “Cold spray additive manufacturing and repair: Fundamentals and applications,” *Additive Manufacturing*, vol. 21, p. 628-650. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.017>
 33. **Davis, J. R. (Ed.)** 2004. *Handbook of thermal spray technology*. ASM international.
 34. **Pawlowski, L.** 2008. *The science and engineering of thermal spray coatings*, 2nd edition, ISBN: 978-0-471-49049-4, John Wiley & Sons.
 35. **Raelison, R. N., Verdy, C., & Liao, H.** 2017. “Cold gas dynamic spray additive manufacturing today: Deposit possibilities, technological solutions and viable applications,” *Materials & Design*, 133, 266-287. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.07.067>
 36. **Hussain, T., Yue, S., & Li, C. J.** 2015. Characteristics of feedstock materials. In *Modern Cold Spray* (pp. 73-105), Editor: Julio Villafuerte, ISBN 978-3-319-16771-8, Springer International Publishing, Switzerland.
 37. **Irissou, E., Legoux, J. G., Arsenault, B., & Moreau, C.** 2007. “Investigation of Al-Al₂O₃ Cold Spray Coating Formation and Properties,” *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 5, no. 16, p. 661-668. <https://doi.org/10.1007/s11666-007-9086-8>
 38. **Melendez, N. M., & McDonald, A. G.** 2013. “Development of WC-based metal matrix composite coatings using low-pressure cold gas dynamic spraying,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 214, p. 101-109. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.11.010>
 39. **Zhang, Y., Epshteyn, Y., & Chromik, R. R.** 2018. “Dry sliding wear behaviour of cold-sprayed Cu-MoS₂ and Cu-MoS₂-WC composite coatings: The influence of WC,” *Tribology International*, vol. 123, p. 296-306. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.12.015>
 40. **Yandouzi, M., Richer, P., & Jodoin, B.** 2009. “SiC particulate reinforced Al-12Si alloy composite coatings produced by the pulsed gas dynamic spray process: Microstructure and properties,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 203, issues 20-21, p. 3260-3270. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.04.001>

41. **Villafuerte, J.** 2015. Modern cold spray: materials, process, and applications, Editor: Julio Villafuerte, ISBN 978-3-319-16771-8, Springer International Publishing, Switzerland.
42. **Karthikeyan, J.** 2007. The advantages and disadvantages of the cold spray coating process. In *The cold spray materials deposition process* (pp. 62-71), ISBN: 978-1-84569-181-3, Woodhead Publishing.
43. **Wang, Q., Spencer, K., Birbilis, N., & Zhang, M. X.** 2010. "The influence of ceramic particles on bond strength of cold spray composite coatings on AZ91 alloy substrate", *Surface and Coatings Technology*, 205(1), 50-56. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.06.008>
44. **Fernandez, R., & Jodoin, B.** 2018. "Cold spray aluminum–alumina cermet coatings: effect of alumina content," *Journal of Thermal Spray Technology*, 27(4), 603-623. <https://doi.org/10.1007/s11666-018-0702-6>
45. **Sansoucy, E., Marcoux, P., Ajdelsztajn, L., & Jodoin, B.** 2008. "Properties of SiC-reinforced aluminum alloy coatings produced by the cold gas dynamic spraying process." *Surface and Coatings Technology*, 202(16), 3988-3996. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.02.017>
46. **Grigoriev, S., Okunkova, A., Sova, A., Bertrand, P., & Smurov, I.** 2015. "Cold spraying: From process fundamentals towards advanced applications," *Surface and Coatings Technology*, 268, 77-84. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.09.060>
47. **Suo, X.K., Suo, Q.L., Li, W.Y., Planche, M.P., & Liao, H.L.** 2014. "Effects of Sic Volume Fraction and Particle Size on the Deposition Behavior and Mechanical Properties of Cold-Sprayed AZ91D/SiCp Composite Coatings," *J. Therm. Spray Technol.*, 2014, 23(1–2), p 91-97. <https://doi.org/10.1007/s11666-013-9974-z>
48. **Zhang, Z., Liu, F., Han, E. H., Xu, L., & Uzoma, P. C.** 2019. "Effects of Al₂O₃ on the microstructures and corrosion behavior of low-pressure cold gas sprayed Al 2024-Al₂O₃ composite coatings on AA 2024-T3 substrate," *Surface and Coatings Technology*, 370, 53-68. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.04.082>
49. **Couto, M., Dosta, S., Torrell, M., Fernández, J., & Guilemany, J. M.** 2013. "Cold spray deposition of WC–17 and 12Co cermets onto aluminum," *Surface and Coatings Technology*, 235, 54-61. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.07.011>
50. **Yu, M., Suo, X. K., Li, W. Y., Wang, Y. Y., & Liao, H. L.** 2014. "Microstructure, mechanical property and wear performance of cold sprayed Al5056/SiCp composite coatings: effect of reinforcement content," *Applied surface science*, 289, 188-196. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.10.132>
51. **Chen, W., Yu, Y., Tieu, A. K., Hao, J., Wang, L., Zhu, S., & Yang, J.** 2020. "Microstructure, mechanical properties and tribological behavior of the low-pressure cold sprayed tin bronze-alumina coating in artificial seawater." *Tribology International*, 142, 105992. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.105992>
52. **Chen, J., Ma, B., Liu, G., Song, H., Wu, J., Cui, L., & Zheng, Z.** 2017. "Wear and corrosion properties of 316L-SiC composite coating deposited by cold spray on magnesium alloy," *Journal of Thermal Spray Technology*, 26(6), 1381-1392. <https://doi.org/10.1007/s11666-017-0583-0>



53. **Michael Shockley, J., Desrayaud, C., Chromik, R.R., & Descartes, S.** 2017. "Significance of Al₂O₃ Particle Morphology in the Microstructure Evolution of Cold-Sprayed Al-Al₂O₃ during Unconstrained High-Pressure Torsion," *Mater. Sci. Eng. A*, 2017, 684, p 510-516. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.12.078>
54. **Tariq, N. H., Gyansah, L., Wang, J. Q., Qiu, X., Feng, B., Siddique, M. T., & Xiong, T. Y.** 2018. "Cold spray additive manufacturing: A viable strategy to fabricate thick B4C/Al composite coatings for neutron shielding applications," *Surface and Coatings Technology*, 339, 224-236. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.02.007>
55. **Xie, X., Ma, Y., Chen, C., Ji, G., Verdy, C., Wu, H., Chen, Z., Yuan, S., Normand, B., Yin, S., & Liao, H.** 2020. "Cold spray additive manufacturing of metal matrix composites (MMCs) using a novel nano-TiB₂-reinforced 7075Al powder," *Journal of Alloys and Compounds*, 819, 152962. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152962>
56. **Aghababaei, R., Brink, T., & Molinari, J.F.** 2018. "Asperity-Level Origins of Transition from Mild to Severe Wear," *Phys. Rev. Lett.*, 120(18), p 186105. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.120.186105>
57. **Alidokht, S.A., Manimunda, P., Vo, P., Yue, S., & Chromik, R.R.** 2016. "Cold Spray Deposition of a Ni-WC Composite Coating and Its Dry Sliding Wear Behavior," *Surf. Coat. Technol.*, 308, p 424-434. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.09.089>
58. **Zhang, L., Yang, S., Lv, X., & Jie, X.** 2019. "Wear and Corrosion Resistance of Cold-Sprayed Cu-Based Composite Coatings on Magnesium Substrate," *J. Therm. Spray Technol.*, 28(6), p 1212-1224. <https://doi.org/10.1007/s11666-019-00887-9>
59. **Chen, J., Ma, B., Liu, G., Song, H., Wu, J., Cui, L., & Zheng, Z.** 2017. "Wear and Corrosion Properties of 316L-SiC Composite Coating Deposited by Cold Spray on Magnesium Alloy," *J. Therm. Spray Technol.*, 26(6), p 1381-1392. <https://doi.org/10.1007/s11666-017-0583-0>
60. **AhmadAlidokht, S., Vo, P., Yue, S., & Chromik, R.R.** 2017. "Erosive Wear Behavior of Cold-Sprayed Ni-WC Composite Coating," *Wear*, 376-377, p 566-577. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.01.052>
61. **Yan, X., Huang, C., Chen, C., Bolot, R., Dembinski, L., Huang, R., Ma, W., Liao, H., & Liu, M.** 2019. "Additive Manufacturing of WC Reinforced Maraging Steel 300 Composites by Cold Spraying and Selective Laser Melting," *Surf. Coat. Technol.*, 371, p 161-171. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.03.072>
62. **An, Q., Huang, L., Jiao, Y., Bao, Y., Zhong, B., & Geng, L.** 2019. "Intergrowth Microstructure and Superior Wear Resistance of (TiB+TiC)/Ti64 Hybrid Coatings by Gas Tungsten Arc Cladding," *Mater. Des.*, 162, p 34-44
63. **Peat, T., Galloway, A., Toumpis, A., McNutt, P., & Iqbal, N.** 2017. "The Erosion Performance of Particle Reinforced Metal Matrix Composite Coatings Produced by Co-Deposition Cold Gas Dynamic Spraying," *Appl. Surf. Sci.*, 396, p 1623-1634. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.10.155>
64. **Alidokht, S.A., Munagala, V.N.V., & Chromik, R.R.** 2017. "Role of Third Bodies in Friction and Wear of Cold-Sprayed Ti and Ti-TiC Composite Coatings," *Tribol. Lett.*, 65(3), p 1-15. <https://doi.org/10.1007/s11249-017-0899-4>

65. **Yin, S., Ekoi, E.J., Lupton, T.L., Dowling, D.P., & Lupoi, R.** 2017. "Cold Spraying of WC-Co-Ni Coatings Using Porous WC-17Co Powders: Formation Mechanism, Microstructure Characterization and Tribological Performance," *Mater. Des.*, 126, p 305-313. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.04.040>
66. **Goldbaum, D., Poirier, D., Irissou, E., Legoux, J. G., & Moreau, C.** (2015). Review on cold spray process and technology US patents. In *Modern Cold Spray* (pp. 403-429), Editor: Julio Villafuerte, ISBN 978-3-319-16771-8, Springer International Publishing, Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16772-5_12
67. **Champagne, V. K. Jr, Champagne, V. K. III & Widener, C.** 2018. Cold Spray Applications. In *Cold-Spray Coatings* (pp. 25-56), Editor: Cavaliere, P. , ISBN: 978-3-319-67182-6, Springer, Cham.
68. **Slattery, K. T.** (2008). Sprayed preforms to forming structural members. U.S. Patent No. 7,381,446 B2,3 June.
69. **Heinrich, P., Richter, P., Höll, H., & Bahr, E.** 2012. Method for producing a pipe. US Patent No. 8,316,916 B2, 27 November.
70. **Payne, D. A., & Garland, P. E.** 2008. Method of repair of thin wall housings. US Patent No. 7,367,488 B2, 6 May.
71. **Calla, E., Pabla, S., & Goetze, R.** 2012. Turbine rotor fabrication using cold spraying. US Patent No. 8,261,444 B2, 11 Sep.
72. **Jensen, J. D., Klingemann, J., Krüger, U., Körtvelyessy, D., Lüthen, V., Reiche, R., & Stier, O.** 2013. Method for repairing a component by coating. U.S. Patent No. 8,343,573 B2, 1 Jan.
73. **Schmid, R. K., & Doesburg, J. C.** 2010. Material and method of manufacture of a solder joint with high thermal conductivity and high electrical conductivity. US Patent No. 7,758,916 B2, 20 June.
74. **Miller, S. A., Shekhter, L. N., & Zimmerman, S.** 2011. Methods of joining protective metal-clad structures. US Patent No. 8,002,169, 23 Aug.
75. **Ohno, H.** 2013. Semiconductor device. US Patent No. 8,436,461 B2, 7 May.
76. **Schaeffer, J. C., Anand, K., Amancherla, S., & Calla, E.** 2013. Titanium aluminide application process and article with titanium aluminide surface. U.S. Patent No. 8,475,882 B2, 2 July.
77. **Ajdelsztajn, L., Ruud, J. A., & Hanlon, T.** 2013. Cold spray deposition method. US Patent No. 8,591,986 B1, 26 Nov.
78. **Raybould, D., Madhava, M. N., Chung, V., Duffy, T. R., & Floyd, M.** 2008. Methods for coating a magnesium component. US Patent No. 7,455,881 B2, 25 Nov.
79. **Bunting, B. W., DeBiccari, A., Vargas, C., Kinstler, M. D., & Anderson, D. W.** 2013. Corrosion protective coating through cold spray. US Patent No. 8,597,724 B2, 3 Dec.
80. **Miyamoto, N., & Hirano, M.** 2011. Bearing material coated slide member and method for manufacturing the same. US Patent No. 7,964,239 B2, 21 June.
81. **Haynes, J. D., DeBiccari, A., & Shubert, G.** 2012. Cold sprayed porous metal seals. U.S. Patent No. 8,192,792 B2, 5 June.



82. **Schlichting, K. W., & Freling, M.** 2012. Porous protective coating for turbine engine components. US Patent No. 8,147,982 B2, 3 April.
83. **Barker, M. H., Hyvärinen, O., & Osara, K.** 2011. Method for forming an electrocatalytic surface on an electrode and the electrode. U.S. Patent No. 7,871,504 B2, 18 Jan.
84. **Miyamoto, N., & Tsuzuki, Y.** 2011. Method of forming a metal powder film a thermal conduction member, power module, vehicle inverter, and vehicle formed thereof. US Patent No. 8,025,921 B2, 27 Sep.
85. **Tsuzuki, Y., & Miyamoto, N.** 2013. Method for manufacturing heat transfer member, power module, vehicle inverter, and vehicle. U.S. Patent No. 8,499,825 B2, 6 Aug.
86. **Kruger, U., & Ullrich, R.** 2011. Cold gas spraying method. U.S. Patent No. 8,012,601 B2, 6 Sep.
87. **Doye, C., Krüger, U., & Pyritz, U.** 2012. Method for producing a coating through cold gas spraying. U.S. Patent No. 8,241,702 B2, 14 Aug.
88. **Kramer, P. A.** 2009. Method and apparatus for spray processing of porous medical devices. U.S. Patent No. 7,514,122 B2, 7 Apr.
89. **Van Steenkiste, T. H., Drew, G. A., Gorkiewicz, D. W., & Gillispie, B. A.** 2004. Kinetic sprayed electrical contacts on conductive substrates. U.S. Patent No. 6,685,988 B2, 3 Feb.
90. **Elmoursi, A. A., Lautzenhiser, F. P., Campbell, A. B., & Smith, J. R.** 2009. Copper circuit formed by kinetic spray. U.S. Patent No. 7,476,422 B2, 13 Jan.
91. **Teets, R. E., VanSteenkiste, T. H., Kruger, D. D., Beer, R. C.** 2011. Secure physical connections formed by a kinetic spray process. U.S. Patent No. 7,900,812 B2, 8 Mar.
92. **Ginder, J., McCune, R., & Leonardi, F.** 2007. Method of manufacturing electromagnetic devices using kinetic spray. U.S. Patent No. 7,244,512 B2, 17 Jul.
93. **Ogilvie, W.** 2005. Method and Apparatus for the Manufacture of Electric Circuits. International Publication No. WO 2005/053367 A2, 9 June.
94. **Kosarev, V. F., Klinkov, S. V., & Sova, A. A.** 2007. "Recently patented facilities and applications in cold spray engineering," *Recent Patents on Engineering*, 1(1), 35-42. <https://doi.org/10.2174/187221207779814716>
95. **Eden, T. J., Wolfe, D. E., Champagne, V., & Widener, C.** 2016. "Cold Spray Applications in the Defense Industry," *J High Pressure Cold Spray: Principles and Applications*, 227-251. <https://doi.org/10.31399/asm.tb.hpcspa.t54460227>
96. **Stoltenhoff, T., Zimmermann, F., Gorris, K., Burger, H.,** 2009. Process for the repair and restoration of dynamically stressed components comprising aluminium alloys for aircraft applications. Patent No. US 2009/0148622 A1, 11 June.



Bir Gaz Türbin Motoru Kompresör Palesinin Ti6Al4V Alaşımından Eklemeli Üretim Yöntemi ile İmalatı ve Boyutsal Doğrulaması

Tamer Saraçyakupoğlu¹

ÖZ

Bu çalışmada, bir gaz türbin motoruna ait kompresör palesinin, Ti6Al4V alaşımından Eklemeli Üretim (EÜ) yöntemiyle üretimi ve boyutsal doğrulama ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Havacılık endüstrisinde yaygın kullanılan Direkt Metal Lazer Sinterleme (DMLS) yöntemi seçilmiştir. İmalattan sonra her bir palede 87 adet olmak üzere toplam 174 yüzey ölçümü gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde, katı modele oranla, 1 Nu'lu palede ortalama +0,0944/-0,0809 mm arasında, 2 Nu'lu palede ortalama +0,1093/-0,0978 mm değişim olduğu belirlenmiştir. Her iki paledeki geometrik değişimin birbiri ile tutarlı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, bir uçar-parçanın uçağa takılmasına yönelik uçuşa elverişlilik çalışmaları konusuna girmeden, bir gaz türbin motoru kompresör palelerinin Ti6Al4V alaşımından EÜ yöntemi ile üretilebileceği ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Gaz Türbin motor, eklemeli üretim, boyutsal doğrulama, direkt metal lazer sinterleme (dmls), kompresör palesi

Manufacture and Dimensional Verification of a Gas Turbine Engine Compressor Blade Produced via Additive Manufacturing Method using Ti6Al4V

ABSTRACT

In this study, the production of a compressor blade belonging to a gas turbine engine via Additive Manufacturing (AM) method using Ti6Al4V alloy and dimensional verification measurements were performed. The Direct Metal Laser Sintering (DMLS) method, which is widely used in the aviation industry was chosen. After manufacturing, a total of 174 surface measurements were made, 87 on each blade. In the measurement, it was determined that there is an average deviation of +0.0944/-0.0809 mm in the 1st blade and +0.1093/-0.0978 mm in the 2nd blade compared to the 3D solid model. It was observed that the geometric deviation of the two blades is consistent with each other. As a result, it has been demonstrated, that compressor blades of a gas turbine engine can be produced via AM method using Ti6Al4V without dealing with the airworthiness studies for manufacturing the airborne part.

Keywords : Gas turbine engine, additive manufacturing, dimensional verification, direct metal laser sintering (DMLS), compressor blade

Geliş/Received : 20.01.2021

Kabul/Accepted : 12.03.2021

¹ Dr., İstanbul Gelişim Üniversitesi, Uçak Mühendisliği Bölümü, İstanbul
dr.tamer@tamersaracyakupoglu.com.tr
Orcid: 0000-0001-5338-726X

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

In this study, it is aimed to make a geometric accuracy study of turbojet engines high-pressure compressor blades that have been additively manufactured with Ti6Al4V material. Turbojet engines are the most familiar engines in the aviation industry. In a turbojet engine, there are cold and hot sections. The compressor blade which works under high pressure and cyclic loads were aimed to produce. On the other hand, the parts that are made of Titanium alloys are frequently used in turbojet engines. Because of the relatively lower melting point, the titanium alloy parts are generally used in the cold sections of the engine while nickel and cobalt alloys are preferred in the hot sections. With its layerwise manufacturing technique, the additive manufacturing technology has been selected for this study since it has been widely used in the aviation industry since it provides the ability of complex-shaped parts. Direct Melting Laser Sintering (DMLS) is a method of additive manufacturing. The DMLS has been selected since it is one of the most popular additive manufacturing technology currently used widely in the aviation industry.

2. Research Purpose

The objective of this research study is to understand the manufacturability of a turbojet engine high-pressure compressor blade using EOSM290 Direct Melting Laser Sintering (DMLS) machine. While focusing on the manufacturability of the blades the limits of the EOSM290 machine was also examined in terms of manufacturing performance. A blade was selected since it has a relatively complex shape, containing curves and sharp edges. During the study, a First Article Inspection (FAI) activity was also performed in accordance with the reference documents provided by EOS company. In terms of manufacturability, not only the additive manufacturing machine but also the heat treatment oven and sand-blasting machines were also examined.

3. Methods/ Methodology

Before manufacturing, a work-flow chart was prepared with the coordination of the machine manufacturer and test center. Later on, a work control document that includes the steps was prepared based on the information of the mentioned work-flow chart. Simultaneously, a 3D CAD model of a generic blade that is used on a turbojet engine's high-pressure compressor stage has been created with Catia software. During CAD model preparation, the tight tolerances and outer surface features have been taken into account. It was planned to manufacture two blades for comparing and cross-check the parts with each other. During machining, the layer thickness, laser scan speed, laser power, and hatch distance parameters were used as default values prepared and provided by EOS. After manufacturing, a heat treatment process has been applied to the blades. After heat treatment, the parts were sent to an independent test center for having information about geometrical accuracy and dimensional verification. The independent test center where has a three-dimensional verification system made the inspections in detail. For inspections, the 3D CAD model's data has been provided to the test center.

4. Results/ Findings

At the end of the geometrical inspections, it was observed that the two parts are very close to each other in terms of outer shape dimensions. In another meaning, additive manufacturing, sand-blasting, and heat treatment process were providing results promptly. From the open literature studies, it was known that 11%-12% shrinkage is one of the natural results of sintering and needed to be optimized for having the demanded geometrical features and surface roughness. In this manner, it can be claimed that the results were as predicted.

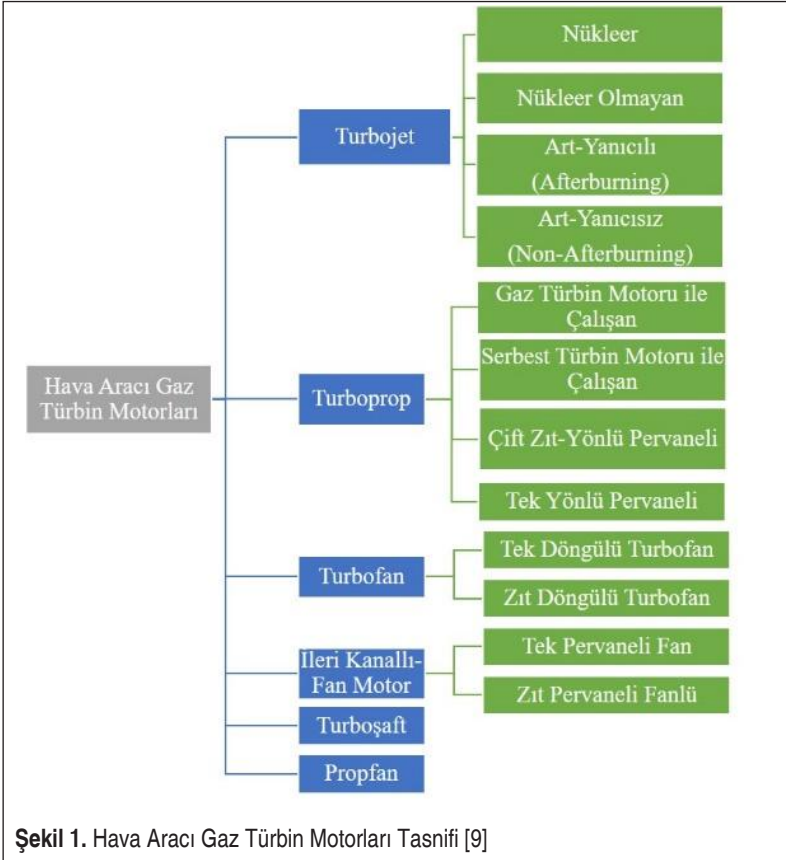


5. Discussion and Conclusions

It was found that the two additively manufactured blades are very close to each other in terms of geometrical features. It can be considered as self-proof of this research study. It is noteworthy, that the steps of the additive manufacturing process and post-process activities are manageable since the results are coherent to each other. For the future studies, with the evaluation of the shrinkage percentage, the 3D model may be modified with bigger sizes on basis of the calculations. Besides, the layer thickness, laser scan speed, laser power, and hatch distance parameters can be optimized in terms of having the prompt part which is demanded. A Hot Isostatic Press (HIP) process may be used for final shaping instead of the heat-treatment oven. Eventually, with additive manufacturing technology, it is possible to produce the parts for turbojet engines. During this process, titanium alloys are eligible for cold sections such as compressors. Other than blades, the vanes, stators, and other engine parts are strong candidates for additive manufacturing technology and titanium alloys. The increasing demand for usage of additively manufactured parts for air vehicle engines gives clues about future implementations.

1. GİRİŞ

Hava araçları zorlu şartlarda görev yapmak üzere tasarlanmaktadır. Ortalama bir yolcu uçağının seyrüsefer irtifasında dış ortam sıcaklığı $-55 / -60$ °C iken uçağın motorundaki sıcak bölgede ortalama sıcaklık 1600 °C'dir [1,2]. Etiyopya'daki Erta'Ale Lava Lake yanardağından çıkan lavın 1187 °C [3] olduğu göz önüne alındığında bir uçak motoruna yönelik üretim yapılırken nasıl ileri bir teknolojiye gereksinim duyulduğu anlaşılabilir. Kullanım amaçlarına göre askeri, ticari-yolcu, ambulans, yangın söndürme ve zirai ilaçlama uçakları gibi birçok kategoriye sahip olan hava taşıtlarının ortak paydası, üretim yöntemlerinin karmaşık mühendislik hesaplamalarıyla hayata geçirilmiş olmasıdır. Bu sebeple, havacılık sektöründe üretim yapmak, ülkelerin endüstriyel gelişmişliklerinin göstergesi olarak nitelendirilmektedir [4,5]. Havacılık sektöründe üretim yapmak için gerekli olan kurallar ulusal ve uluslararası havacılık otoriteleri tarafından yönergelerle belirlenmiştir. Söz konusu üretim süreci Üretim Organizasyon Onayı (ÜOO, Product Organization Approval-POA) gereklilik-



Şekil 1. Hava Aracı Gaz Türbin Motorları Tasnifi [9]

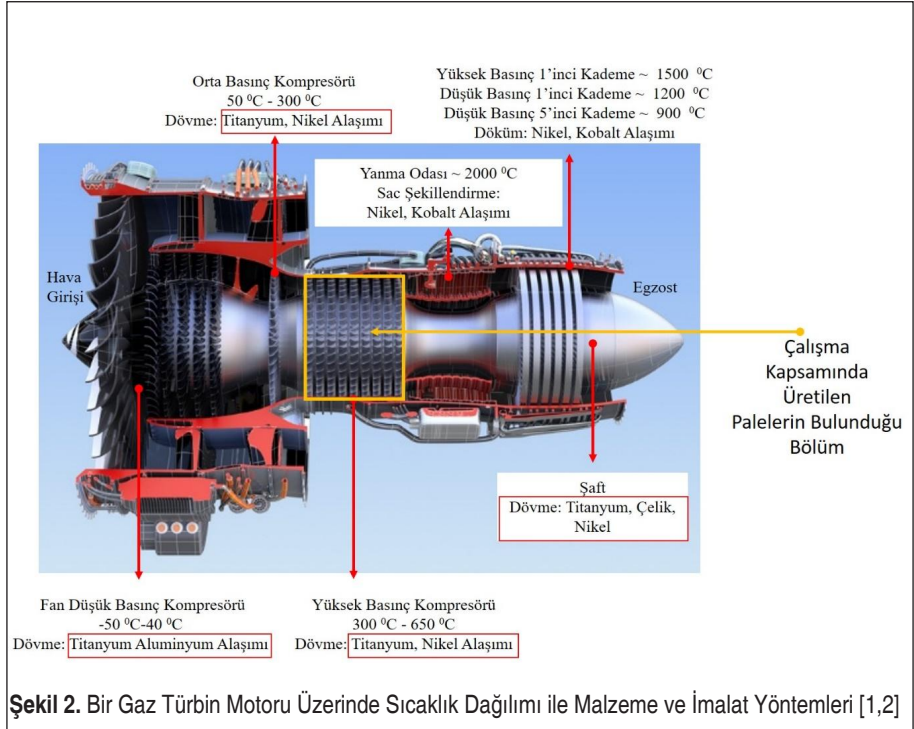


leri olarak Part 21-G şeklinde ifade edilmektedir [6,7,8]. Söz konusu onay sürecinde, üretim yapılan fabrika ortamından, çalışan personelin bilgi donanımı ve tecrübesine kadar bütün gereklilikler dokümanite edilmiştir. Bu çalışmanın odağında ÜOO gereklilikleri yer almamakta; sadece imal edilebilirliğe yönelik analizler yapılmaktadır.

Gaz türbin motorları, çalışma şartları ve sistem gereksinimlerine göre kategorize edilmektedir. Şekil 1’de görüldüğü üzere çalışma şartları ve itki üretme yöntemlerine bağlı olarak birçok değişik tipte gaz türbin motoru kullanımı söz konusudur.

Gaz türbin motorları esas olarak kompresör, yanma odası ve türbin modüllerinden oluşmaktadır. Kompresör, motor içerisinde soğuk bölge olarak isimlendirilen kısımda yer alırken, yanma odası ve türbin kısımları ise sıcak bölge adı verilen kısımdadır. Şekil 2’de görüldüğü üzere sıcaklık ve basınç dağılımına bağlı olarak her bir modül ve kısımda farklı malzemeler kullanılması zorunluluğu ortaya çıkmaktadır.

Ti-Al alaşımları motorun kompresör kısmının düşük basınç bölgesinde yer almaktadır. Bu çalışmada üretilen paleler Ti-Al alaşımlarının havacılık ve medikalde en yaygın kullanılanı olan Ti6Al4V malzemesidir. Söz konusu alaşım yüksek mukavemet değeri, görece hafif olması, üstün korozyon direncine sahip olması gibi özellikleri nedeniyle gaz türbin motorlarında kullanım için oldukça uygundur [10,11]. Talaşlı



imalat gibi geleneksel yöntemlerle, karmaşık şekilli Ti6Al4V malzemelerini işlemek, termal iletkenliğinin düşük olması, yüksek sertliğe sahip olması, yüksek kimyasal reaksiyon özelliği ve aynı zamanda da atık olarak geriye kalan talaşların maliyetinin yüksek olması nedeniyle verimli değildir [12,13]. Bu nedenle bu çalışmada EÜ yöntemi ile üretim tercih edilmiştir.

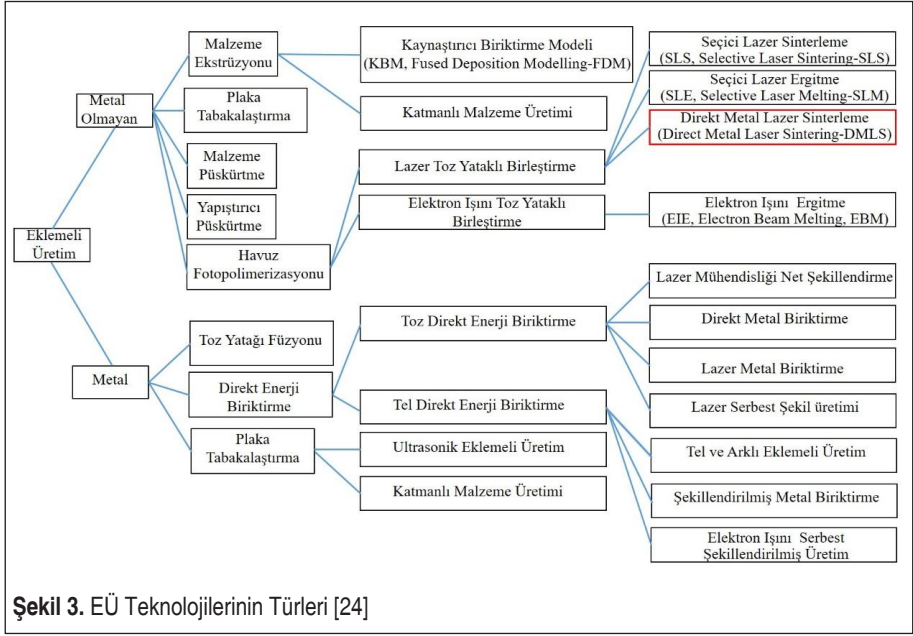
Yapılan literatür çalışmalarında; EÜ ile Ti6Al4V ile jet motorlarındaki kompresör çarkı (impeller) ve pale gibi parçaların üretim süreçlerinin olgunlaştığı gözlemlenmektedir. [14,15]. Ti6Al4V alaşımı ile yapılan üretimler medikal alanda da yaygınlaşma süreci içerisinde [16,17,18]. Diğer taraftan pale gibi karmaşık şekilli parçaların Ti6Al4V malzeme ile üretimi ve geometrik doğrulamasına yönelik yapılan literatür taramasında Tel Erozyon (Wire Electric Discharge Machine-WEDM) ile yapılan bir çalışma karşımıza çıkmaktadır. Yapılan çalışmada dışbükey (Konveks) yüzeylerde 8 μ , içbükey yüzeylerde ise 6 μ yüzey hassasiyeti ile parça üretimi söz konusudur. Diğer taraftan, boyutsal doğrulama açısından hareketli telin üçüncü boyutta hareket ettirilmesi güç olduğundan, WEDM teknolojisinin dikey ekseninde değişim gösteren yüzey profillerinde kullanılması mümkün olmadığı gözlemlenmiştir [19]. Bir başka çalışmada, Directed Energy Deposition (DED-Direkt enerji biriktirme) yöntemi ile Ti6Al4V alaşım kullanılarak silindirik geometriye sahip bir deney parçası üretilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda yüzey hassasiyetinin $\pm 2,5$ mm tolerans değerinde olduğu görülmüştür [20]. Bu durumun sebebinin DED prosesinin tel eritmeye dayalı çalışma yönteminden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Bu nedenle WEDM ve EÜ yöntemlerinden DED metodu gibi teknolojilerin pale benzeri karmaşık yüzeye sahip parçalarda kullanılmayacağı değerlendirilmektedir. EÜ ile Ti6Al4V malzemelerin geometrik doğrulamasına yönelik yapılan çalışmalar genel olarak artık gerilmelere (residual stress) bağlı çarpıklık ve yüzey deformasyonlarını önlemeye yönelik çalışmalardır. Bununla beraber EÜ ile Ti6Al4V parçalardaki boyutsal değişimlerin incelendiği çalışmalarda kullanılan parçaların ya küp şekline sahip basit formda ya da ince duvarlı parçalar olduğu gözlemlenmektedir [21].

Bu çalışmada ise literatürde karşılaşılan araştırmalardan farklı olarak gaz türbinli motorun kompresör bölgesinde kullanılan paleler örnek alınarak Ti6Al4V alaşımı ile EÜ yöntemi üretilmiş ve geometrik doğrulama çalışmaları yapılmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1 Havacılık Endüstrisinde EÜ Uygulamaları

Daha önceden bahsedildiği üzere EÜ ile üretim sadece havacılık sektöründe değil; medikal, uzay ve otomotiv gibi diğer sektörlerde de hızla yer edinmektedir. 1980'li yıllarda ilk patent çalışmaları yapılan EÜ teknolojileri ile yapılan üretimlerin yıllar içinde pazar payını artırdığı gözlemlenmektedir. Bu kapsamda, Wohlers Associates ta-



Şekil 3. EÜ Teknolojilerinin Türleri [24]

rafından yayımlanan yıllık EÜ dünya pazarı raporuna göre; EÜ'nün pazar payı 2012 yılında 2,25 Milyar ABD Doları, 2016 yılında 6 Milyar ABD Doları iken 2020 yılında 21 Milyar ABD Doları seviyesine çıkacağı öngörülmüştür [22]. Bu hızlı büyümenin, EÜ'nün geleneksel üretim yöntemlerinin yerini alabilecek tümünden değişimci bir yöntem olmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir [23]. EÜ teknolojilerinin kendi içinde birçok farklı türü mevcuttur. Şekil 3'te EÜ teknolojilerinin türleri sunulmaktadır. Sahadaki uygulamalara bağlı olarak, her bir EÜ teknolojisinin kendine özgü avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Bu makaleye konu olan kompresör palesinin üretimi, havacılık alanında yaygın kullanıma sahip olan DMLS yöntemi ile gerçekleştirilmiştir.

Talaşlı üretime kıyasla atık miktarının az olması, EÜ teknolojilerinin hava araçları ve hava araçları motorlarında kullanımının avantajlarından bir tanesidir. Uçak motorlarında kullanılan malzemelerin genellikle maliyeti yüksektir. Bu nedenle atık miktarının az olması oldukça önemlidir [25]. "Ham Malzeme" / "Uçağa Takılmaya Hazır Ürün Ağırlığı" (Buy-to-Fly-Ratio) oranının düşük olmasından dolayı, EÜ'nün uçak motor parçalarında kullanımının daha da yaygınlaşacağı öngörülmektedir [26,27]. Malzeme tasarrufu ve ağırlık azaltmanın yanı sıra hava yolu işletmecilerinin, uçak motorlarında aradığı en önemli özelliklerin güvenlik ve verimlilik olduğu bilinmektedir. EÜ, son ürünün kalitesini olumlu açıdan etkileyebilen tekli veya çoklu malzeme kullanımları, ısı, basınç gibi birçok değişkenin kontrol edilebilmesine olanak sağlaması nedeniyle güvenlik ve verimliliğe katkı sağladığı değerlendirilmektedir [28]. İlave olarak, EÜ teknolojileri, sadece üretim aşamasında değil Bakım, Onarım ve

Yenileme (BOY, Maintenance, Repair and Overhaul-MRO) a¸amasında da geniş bir kullanım alanına sahiptir [29]. Bir hava aracının ömür devri boyunca ortaya çıkan maliyetin %20-40 arası tedarik ve %60-80 arası BOY faaliyetlerine harcandığı göz önüne alındığında [7,30] EÜ teknolojilerinin havacılık endüstrisinde kullanımının hem üretim hem de devam eden destek (Follow-on-Support) fazında maliyet etkin bir çözüm sunduğu ortaya çıkmaktadır.

2.2 Havacılık Endüstrisinde Ti6Al4V Uygulamaları

Ti6Al4V alaşımı, ilk olarak, 1950'li yıllarda uçak yapısal parça uygulamaları için üretilmiştir. ASTM F1472 [31] ve ASTM 2924 [32] standartlarına göre Ti6Al4V alaşımı malzeme kompozisyonu, %90 Ti, %5.48 Al, %4.22% V, %0.369 C, %0.112 Fe, %0.0625 Sn, %0.00386 Nb, %0,0099 Cr olarak belirlenmektedir. Üretimde kullanılacak olan tozun içeriğine yönelik, üreticiden alınan Uygunluk Sertifikası (Certificate of Conformance-CoC) ile bahsi geçen standartlarda yer alan verilerin birbiri ile örtüştüğü doğrulanmıştır. Ti6Al4V alaşımın yoğunluğu 4,3 gr/cm³ olarak bilinmektedir. Düşük yoğunluk, yüksek mekanik dayanım, yüksek korozyon direnci ve bio-uyumluluk özelliği Ti6Al4V alaşımını oldukça cazip kılmaktadır [33,34].

2.3 Direkt Metal Lazer Sinterleme (DMLS)

EÜ yöntemlerinden olan DMLS metodu, bir toz yatağı içerisine serilen tozların lazer ışını ile sinterlenmesi prensibine dayanmaktadır. Her bir toz taneciği üzerine lazerin çarpma süresi 0,5-25 milisaniyedir. Bu zaman zarfında, tozlar kısmen ergiyip soğutulularak, istenilen parçayı meydana getirmek üzere katmanlar halinde birbirine bağlanmaktadır [35]. Yüksek soğuma hızından dolayı, EÜ ile imal edilen parçaların çekme özellikleri ve sertliklerinin, talaşlı imalat ya da döküm yöntemi ile üretilmiş malzemelere göre daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir [36]. Diğer taraftan, EÜ ile üretilen parçaların yüzey pürüzlülüğü geleneksel yöntemlere kıyasla daha yüksektir. Söz konusu yüksek yüzey pürüzlülüğü, gerilim yoğunlaşmasının artmasına ve dolayısıyla parçanın yorulma etkisine daha erken maruz kalmasına yol açmaktadır. İlave olarak, parçada meydana gelen gözeneklilik ve katmanlar arasındaki yetersiz birleşme, yorulmayı daha öne çekebilmektedir. Bu nedenle, üretimden sonra, Sıcak İzostatik Presleme (SİP, Hot Isostatic Press-HIP) ile parçanın yoğunluğunda artış sağlanması sayesinde yorulma mukavemetinin yükseltilmesi sağlanmaktadır [37]. DMLS ile üretilen Ti6Al4V parçalarının maksimum çekme kuvvetlerinin belirlenmesine yönelik yapılan çalışmada, hiç ısıl işlem yapılmamış numunede 1150 Mpa olan maksimum çekme kuvveti, gerilim giderme ısıl işlemi sonrasında 1230 Mpa olarak belirlenmiştir. HIP işlemi sonrasında ise 960 Mpa olarak belirlenmiştir [38]. Bu çalışmada ısıl işlem uygulaması 800 °C gerçekleşmiş olup söz konusu değer, toz üreticisi firma tarafından sağlanan bir referans değerdir. EÜ yöntemi ile Ti6Al4V alaşımı kullanılarak üretilen parçaların geometrisi ve mekanik özellikleri üzerinde birçok faktörün yer aldığı bilin-



mektedir. Kompresör palesinin EÜ yöntemi ile üretiminde, imalat kalitesini etkileyen ve değiştirilebilir faktörler aşağıda yer almaktadır:

- Katman kalınlığı,
- Lazer gücü,
- Tarama hızı,
- Tarama deseni,
- İnşa yönü,
- Yanal kayma aralığı.

2.3.1 Katman Kalınlığı

EÜ üretim yönteminin çalışma sistematığı eşit aralıklara sahip katmanların üst üste getirilmesidir. Özellikle iç ve dış yüzeylerinde karmaşık bileşenler için alternatif bir çözüm ortaya koyan, ideal birleştirme malzemesi aracılığıyla katmanlar halinde imal edilmesini sağlayan gelişmiş bir üretim tekniğidir [35-37,39]. Katman kalınlığı limitler dâhilinde azaltılabilir ancak daha ince katman kalınlıklarının daha ince olması parçanın üretim süresini uzatmakta ve dolayısıyla parça maliyetini artırmaktadır [40]. Diğer bir ifade ile katman kalınlıklarının arttırılması üretim zamanının ve sonuçta üretim maliyetinin azaltılmasını sağlamaktadır. Ancak katmanlar kalınlaştıkça, basamak etkisinden (stair step) dolayı pozitif bir korelasyon içerisinde yüzey pürüzlülüğü de artmaktadır [41]. İlave olarak, katman kalınlığı arttıkça parça içerisindeki ergimemiş toz partikülleri ve gözenek boşlukları gibi süreksizlikler de ortaya çıkmaktadır [42]. Söz konusu süreksizlikler, parçanın yoğunluğunun azalmasına neden olmaktadır. Düşük yoğunluk ise parçanın başta akma dayanımı olmak üzere mekanik özelliklerinde düşüşe sebep olmaktadır [43]. Yoğunluk azalmasının bir başka sonucu da sertliğin azalması olarak ortaya çıkmaktadır. Genel değerlendirmede, katman kalınlığının tarama hızı ve lazer gücü ile bir optimizasyon içerisinde olması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Aksi takdirde, ergimemiş toz partikülleri ve gözenek boşluklarından kaynaklanan süreksizlikler, yoğunluk azalması ve akma dayanımının düşmesi gibi olumsuz sonuçları ortaya çıkarmaktadır. Süreksizliklerin bertaraf edilmesi amacıyla yapılan çalışmalarda, azaltmanın birim hacimdeki enerji yoğunluğu ile bağıntılı olduğu ve yeterince enerji sağlandığında tam ergimenin meydana geldiği, dolayısıyla boşlukların oluşmadığı belirlenmektedir [44].

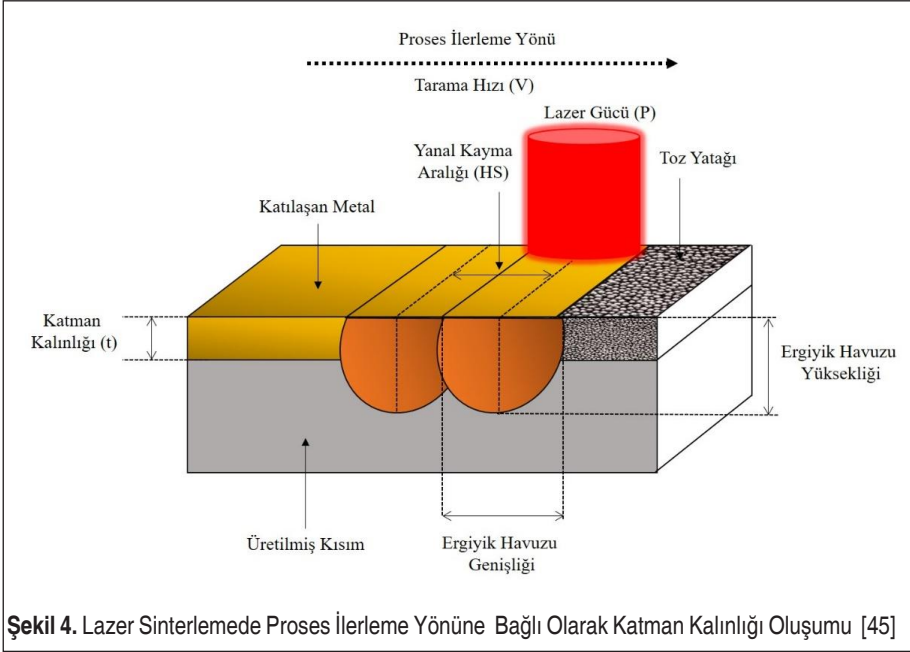
2.3.2 Lazer Gücü

EÜ yöntemlerinden biri olan DMLS, temelde toz partiküllerinin lazer gücü ile ergitilmesi prensibine dayanmaktadır. Burada enerji yoğunluğu önemli bir parametredir. Enerji yoğunluğu, lazer gücünün (P), katman kalınlığı (t), tarama hızı (V) ve Yanal Kayma Aralığı (Hatch Space-HS) çarpımına oranı olarak belirlenmektedir [44].

Eşitlik (1)'de verilen, "Andrew Sayısı" ampirik eşitlik olarak enerji yoğunluğunu ifade etmektedir.

$$A_N = \frac{P}{H_s \times v} \quad (1)$$

Bu bağıntıya göre enerji yoğunluğu, lazer gücü arttıkça artmakta, tarama mesafesi ve tarama hızı azaldıkça azalmaktadır. Şekil 4'te gösterildiği üzere lazer gücüne bağlı olarak, lazer ışını tarafından taşınan enerji daha önceden sinterlenmiş kısımla, yeni tozu bir araya getirmektedir. Bu sayede, katmanların yanal düzlemde birbirlerine bağlanması (bonding) işlemi gerçekleşmektedir.



Şekil 4. Lazer Sinterlemede Proses İlerleme Yönüne Bağlı Olarak Katman Kalınlığı Oluşumu [45]

Yüzey hassasiyetinin ilerleme hızı, katman kalınlığı ve lazer gücünün kontrolü ile sağlandığı bilinmektedir [46]. Palelerin üretildiği EOSM290 DMLS (EOS GmbH, Almanya) makinesinin azami lazer gücü 400 Watt'tır. Lazer gücünün az, ilerleme hızının yüksek olduğu durumlarda ergime tam oluşmamakta ve bu durumda yapı içerisinde süreksizliklerin oluşması ve var olanların artması, ilave olarak yüzey hatalarının çoğalması durumu söz konusu olmaktadır [47]. Diğer taraftan, yüksek lazer gücü ve düşük ilerleme hızında anahtar deliği (keyhole) şeklinde gözenek oluşumu söz konusu olmaktadır [48].

2.3.3 Tarama Hızı

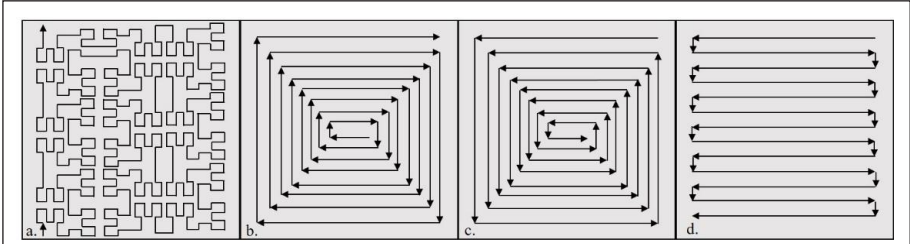
Tarama hızı, eş zamanlı ergitilen toz partiküllerinin miktarını belirleyen bir değer olarak tanımlanabilmektedir [49]. Tarama hızı, enerji yoğunluğu parametresi içerisinde



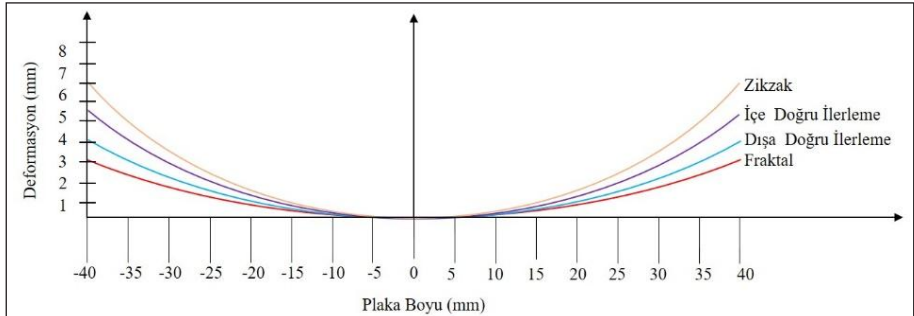
oldukça önemli bir faktördür. Daha önce bahsedildiği üzere lazer enerji yoğunluğu, bir katmanın taranması sırasında malzemenin hacmi başına uygulanan ortalama enerjinin bir ölçüsüdür. Lazer enerji yoğunluğu, enerji girişini ölçen ve parçanın yüzey kalitesini etkileyen önemli bir faktördür. Artırılmış bir lazer gücü, daha yüksek hızlarda ergime oluşmasına ve ısı penetrasyonunun daha derine ulaşmasına olanak sağlamaktadır. Tarama hızının artırılması, ısının yükselmesi için ihtiyaç duyulan zamanın kısılması, ergiyik havuzunun daralması ve Isı Etkisi Altında Kalan Bölge (ITAB)'nin küçülmesine yol açmaktadır [50]. Sonuç itibarıyla tarama hızının artırılması yoğunluğun azalmasına sebebiyet vermektedir. Tarama hızı ve lazer gücü arasında istenilen mekanik özellikler ve yüzey hassasiyetine yönelik parametreleri değiştirerek bir optimum noktanın bulunması gerekmektedir [51].

2.3.4 Tarama Deseni

Tarama deseni, lazer ışınının katman üzerinde ilerleme şeklini ifade etmektedir. Farklı tarama desenleri, parçaların geometrik ve mekanik özellikleri üzerinde etki meydana getirmektedir. Şekil 5'te görüldüğü üzere farklı tarama desenleri mevcuttur. Tarama modelinin uygun seçilmesi artık gerilmelerin (Residual Stress) ve termal etkiden kaynaklanan herhangi bir bozulmanın meydana gelme olasılığını azaltmaktadır. Yüzey deformasyonu ve süreksizlik açısından, Şekil 5.a.'da yer alan fraktal tarama deseni, en düşük yüzey deformasyonu ve süreksizlik oluşturan modeldir. Aynı değerlendirme



Şekil 5. Tarama Desenleri a. Fraktal, b. Dışa Doğru İlerleme, c. İçe Doğru İlerleme, d. Zikzak [52]



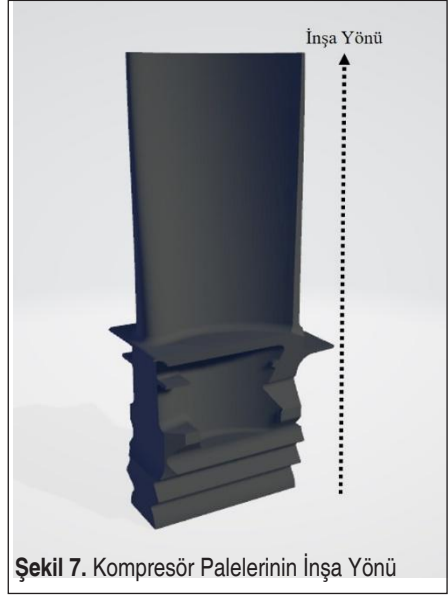
Şekil 6. Tarama Desenlerine Bağlı Olarak Oluşan Yüzey Deformasyonları (çarpıklıklar) [53]

erevesinde, Œekil 5.b.'de yer alan dışa doğru ilerleme (Off-Set Out) deseni ikinci sırada, Œekil 5.c.'de yer alan içe doğru ilerleme (Off-Set In) deseni unc sırada ve Œekil 5.d.'de yer alan zikzak deseni ise dördüncü sırada yer almaktadır.

Œekil 6'da tarama desenlerine bağlı olarak dış düzlem distorsiyonları (deformasyonları) görülmektedir. Burada "0" noktası plakanın orta noktasını ifade etmekte olup, bu noktadan pozitif ve negatif yöne doğru distorsiyonların olduğu görülmektedir.

2.3.5 İnaŐa Yn

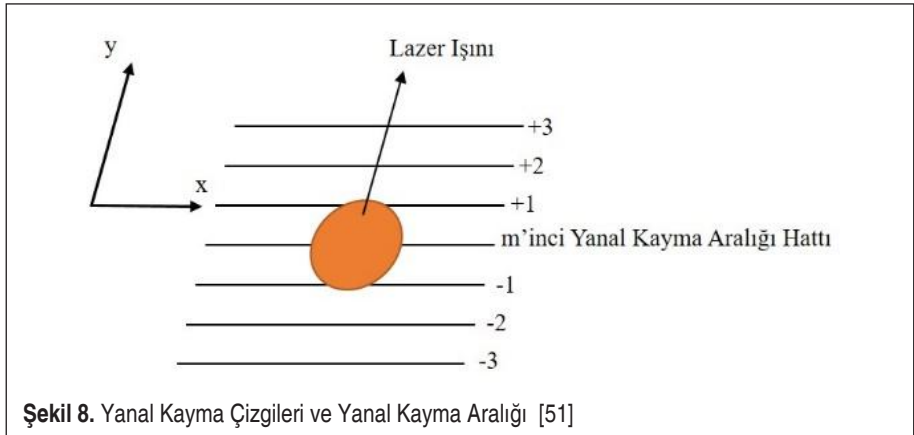
İnaŐa yönü, parçanın uzunlamasına ekse- ni ile dikey eksen arasındaki dar aıdır. Parçanın inşa yönü, aynı katman üzerinde farklı soğuma oranları oluŐturacađı için parçanın mikro yapısı ve mekanik özel- liklerini etkileyen bir faktördür. Dikey inşa yönünde daha iyi dayanım ve uzama değerleri elde edilmektedir. Genel olarak, dikey inşa yönünde daha iyi dayanım ve uzama değerleri elde edilmektedir [42, 54]. Œekil 7'de bu makaleye konu olan kompresör palelerinin inşa yönü grl- mektedir.



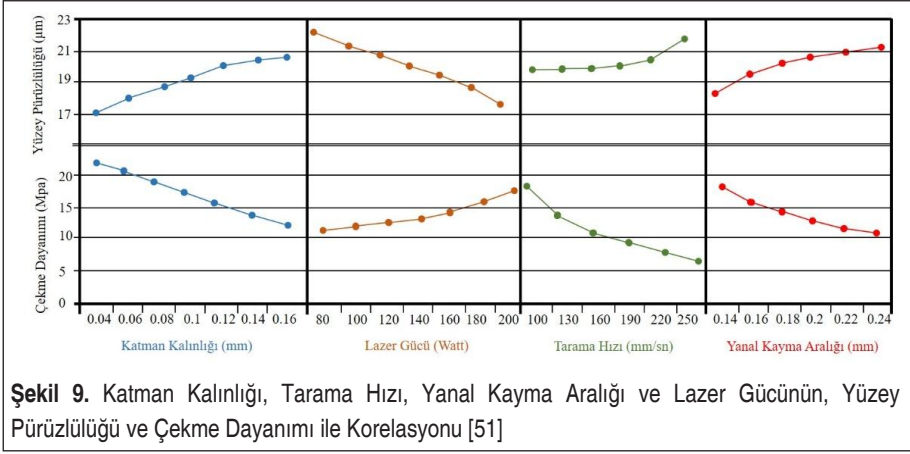
Œekil 7. Kompresör Palelerinin İnaŐa Yn

2.3.6 Yanal Kayma Aralığı

Yanal kayma aralığı, iki komŐu tarama çizgisi arasındaki mesafe olarak tanımlanmak- tadır. Diğer bir ifade ile katmanlar inşa edilirken, tarama desenleri arasındaki geçiş mesafesidir. Œekil 8'de grldğu üzere her iki çizgi arasındaki mesafedir. Üretim



Œekil 8. Yanal Kayma çizgileri ve Yanal Kayma Aralığı [51]



geometrisi içerisinde lazer ışını x ekseninde ilerlemekte, yanal kayma aralığı kadar y eksenine geçmekte ve yeniden x ekseninde rotası boyunca ilerlemektedir.

Bu mesafe, lazer ışınlarının üst üste geldiklerinde lazer gücüne bağlı olarak enerji dağılımı ve dolayısıyla sürekli sinterleme yapılan bölgenin oluşumunda etkili olmaktadır.

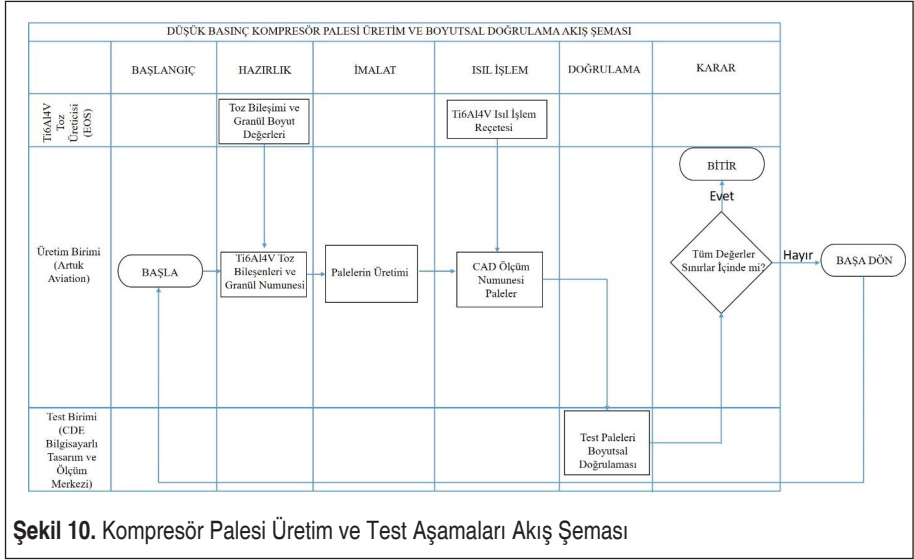
Genel değerlendirmede; Şekil 9'da görüldüğü üzere yüzey pürüzlülüğü katman kalınlığı, tarama hızı ve yanal kayma aralığı ile pozitif korelasyon; lazer gücü ile negatif korelasyon içerisinde. Benzer bir kıyaslama çekme dayanımı için de yapılmıştır. Çekme dayanımı katman kalınlığı, tarama hızı ve yanal kayma aralığı ile negatif korelasyon; lazer gücü ile pozitif korelasyon içerisinde.

3. KOMPRESÖR PALELERİNİN ÜRETİM SÜRECİ

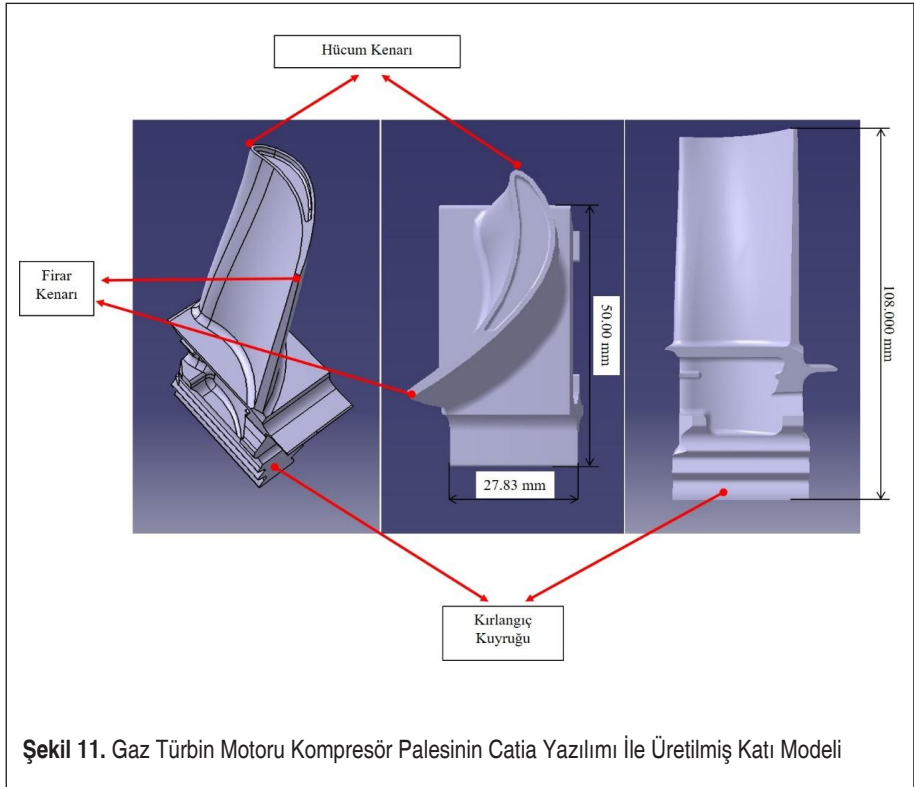
Şekil 10'da üretim ve test sürecinin akış şeması sunulmaktadır. Söz konusu şemada üretime yönelik toz ve tezgâh parametreleri, üretimin gerçekleşeceği birim ve bağımsız test biriminde gerçekleşmesine yönelik iş adımları yer almaktadır.

Şekil 11'de, EÜ-DMLS yöntemi ile Ti6Al4V toz kullanarak EOSM290 tezgâhında üretimi gerçekleştirilen palelerin, Catia (Dassault Systèmes, Fransa) bilgisayar destekli tasarım yazılımı ile üretilen katı model görülmektedir. Söz konusu katı modelin üretiminde, halen gaz türbin motorlarının kompresör bölgesinde kullanılan palelerin boyutsal ölçüleri esas alınmıştır.

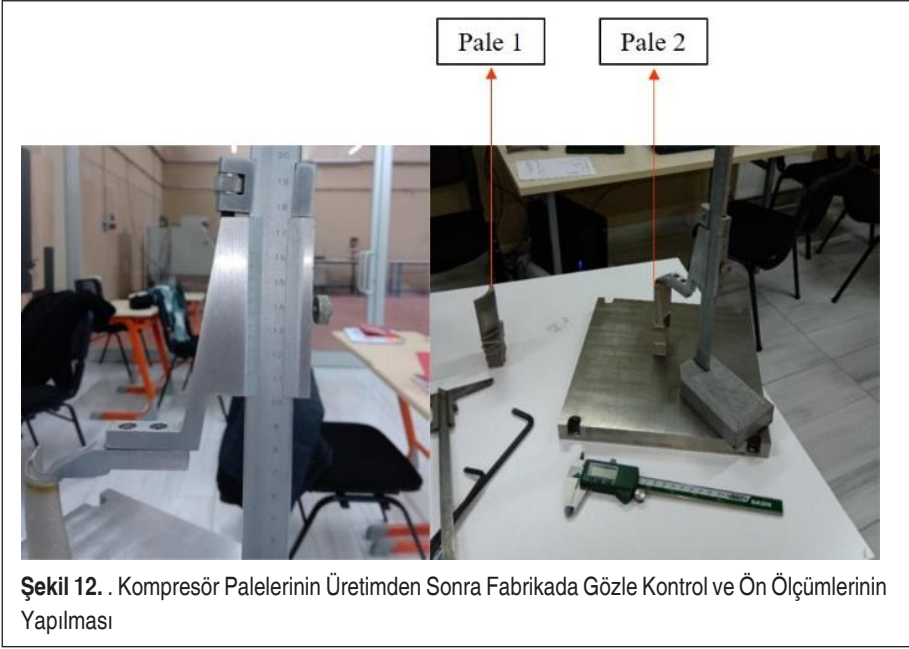
Üretim parametreleri olarak katman kalınlığı 60µ, lazer gücü 200 Watt ve hacimsel enerji yoğunluğu 9 mm³/sn değerleri kullanılmıştır. Tarama deseni olarak dışa doğru ilerleme parametresinin kullanıldığı gözlemlenmiştir. Yaklaşık 7,5 saat süren üretimden sonra Şekil 12'de görüldüğü üzere, ön ölçümler ve gözle kontrol (visual inspection) gerçekleştirilmiştir.



Şekil 10. Kompresör Palesi Üretim ve Test Aşamaları Akış Şeması



Şekil 11. Gaz Türbin Motoru Kompresör Palesinin Catia Yazılımı İle Üretilmiş Katı Modeli



Şekil 12. . Kompresör Palelerinin Üretimden Sonra Fabrikada Gözle Kontrol ve Ön Ölçümlerinin Yapılması

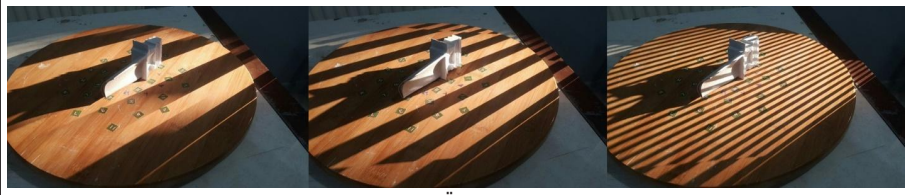
Ön ölçümlerin olumlu sonuç vermesinin ardından, ısıl işlem yapılması safhasına geçilmiştir. Üretici firmadan, Ti6Al4V alaşımının sinterleme sonrasında yapısında ardıl işlem olarak alınan öneriler ve yapılan kaynak taramaları [55,56,57] sonucunda fırın kontrol panelinden, 2 saat içinde oda sıcaklığından (22 ± 2 °C), 800°C'ye kadar, 2 saat 800 °C'de tutulması ve ardından da aynı seyir ile soğutulması sağlanmıştır. Proses sırasında, fırın haznesinde argon gazı kullanılmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Boyutsal Doğrulamaya Yönelik Fotogrametrik Tabanlı Veri Seti Elde Etme Yöntemi

Üretim safhasının tamamlanmasının ardından, bu analiz çalışmasının odağında bulunan boyutsal doğrulama aşamasına geçilmiştir. Söz konusu doğrulama işlemi için, 1 μ hassasiyetle ölçüm yapabilen Breuckmann Smartsan3D (Breuckmann GmbH, Almanya) tezgahı kullanılmıştır. Kamera ile yapılan ölçüm öncesinde, palelerin yüzeylerindeki parmak izi gibi kalıntıların arındırılması amacıyla kimyasal temizleme işlemi yapılmıştır. Şekil 13'te görüldüğü üzere, paleler sırayla geometrik doğrulama işlemi için bir döner tabla üzerine yerleştirilmiştir.

Söz konusu ölçüm tezgahının çalışma prensibi EÜ için üretilen 3 boyutlu katı model ile üretilmiş olan parçanın geometrik kıyaslamasının yapılması esasına dayanmakta-



Şekil 13. Kompresör Palelerinin Smartscan 3D Ölçüm Cihazında Geometrik Doğrulama Verilerinin Alınması

Tablo 1. Fotogrametrik Analizlere Yönelik Elde Edilen Veriler

#	1 Nu'lu Pale Basınç Yüzü	2 Nu'lu Pale Basınç Yüzü	1 Nu'lu Pale Basınç Yüzü Kırılmaç Kuyruğu Bölgesi	2 Nu'lu Pale Basınç Yüzü Kırılmaç Kuyruğu Bölgesi	1 Nu'lu Pale Emme Yüzü	2 Nu'lu Pale Emme Yüzü	1 Nu'lu Pale Emme Yüzü Kırılmaç Kuyruğu Bölgesi	2 Nu'lu Pale Emme Yüzü Kırılmaç Kuyruğu Bölgesi
1	-0,0627	-0,0725	-0,072	-0,1117	0,0435	-0,2204	-0,0422	-0,1141
2	-0,0682	-0,0805	-0,1511	-0,1361	-0,007	0,0275	-0,053	-0,1223
3	0,0201	-0,015	-0,1525	-0,134	-0,1067	-0,1273	0,0284	-0,0053
4	-0,1697	-0,1543	0,2177	0,2177	-0,1172	-0,1194	0,0398	0,0276
5	0,0041	-0,0399	0,2397	0,3269	-0,1075	-0,122	-0,0272	-0,0793
6	-0,1709	-0,1549	-0,1286	-0,1136	-0,1086	-0,1122	-0,1558	-0,1775
7	-0,1392	-0,1314	-0,1032	-0,1076	0,1231	0,0335	-0,1354	-0,1509
8	-0,0054	-0,007	-0,175	-0,2005	-0,1078	-0,1882	-0,0877	-0,0995
9	0,153	0,1449	0,0288	-0,0075	-0,1431	-0,1553	0,1818	0,0181
10	0,2733	0,3124	-0,0865	-0,1404	0,0331	0,0537	0,1678	-0,0476
11	-0,1471	-0,1725	-0,0009	-0,041	-0,1644	-0,1326	-0,098	-0,0624
12	-0,1465	-0,2004	0,0037	-0,0575	0,1195	0,1235	-0,1081	-0,0777
13	0,1188	0,115	0,0908	0,0492	0,0501	0,0323	-0,103	-0,0725
14	0,1323	0,1042	-0,0157	-0,0984	0,0604	0,038	-0,1153	-0,0949
15	0,0707	0,0621	-0,1582	-0,1267	0,0331	0,0522	-0,1169	-0,0791
16	0,0415	0,0133	-0,1478	-0,1627	0,1058	0,0858	-0,104	-0,0946
17	0,081	0,1051	-0,0772	-0,1475	0,1433	0,157	-0,0883	-0,0879
18	0,0517	0,0705	0,3061	0,3308	0,1737	0,2197	0,636	0,1034
19	-0,1567	-0,1585	0,2651	0,3133	0,2734	0,3017	0,2418	0,3094
20	-0,1665	-0,1464	-0,0808	-0,0984	-0,057	-0,0611	0,1496	0,0439
21	-0,0786	-0,0978			-0,0953	-0,0971	0,0797	0,0322
22	0,1596	0,1466			-0,1276	-0,0895	0,0837	0,0293
23	0,0029	-0,0092						



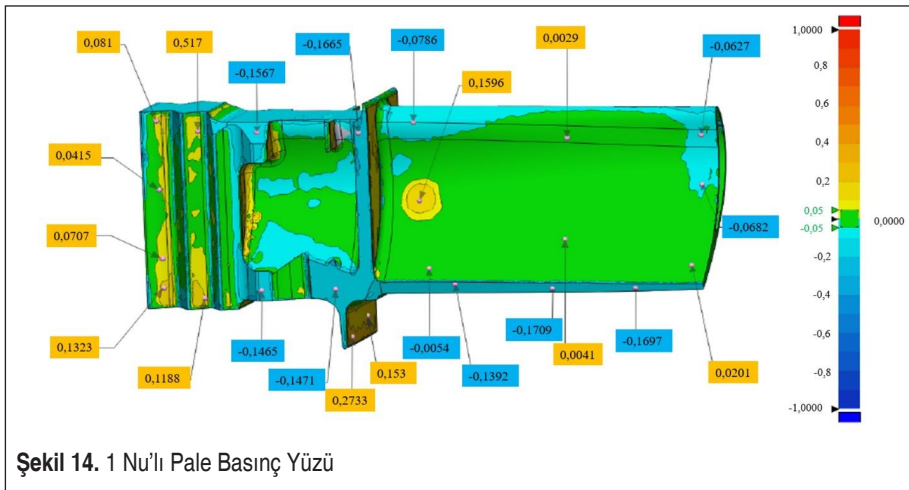
dır. Benzer bir pale üzerinde yapılan boyutsal doğrulama çalışmasında basınç yüzeyinden 57, emme yüzeyinden 57 olmak üzere toplam 114 adet noktadan elde edilen verinin karar verme sürecinde yeterli mesnet sağladığı gözlemlenmiştir [21]. Bu çalışmada, Tablo 1’de görüldüğü üzere toplam 174 adet veriden oluşan bir doğrulama veri seti elde edilmiştir. Söz konusu veriler, palelerin basınç yüzü üzerinden 23 adet, basınç yüzü kırlangıç kuyruğu bölgesinden 20 adet, emme yüzü üzerinden 22 adet ve emme yüzü kırlangıç kuyruğu bölgesinden 22 adet olmak üzere her bir pale için toplam 87 noktadan gerçekleştirilmiştir. Mavi renkte olan değerler katı modele kıyasla negatif; turuncu renkli olanlar ise pozitif değişimleri göstermektedir. Toplamda 103 adet negatif değişim ve 71 adet pozitif değişim görülmektedir.

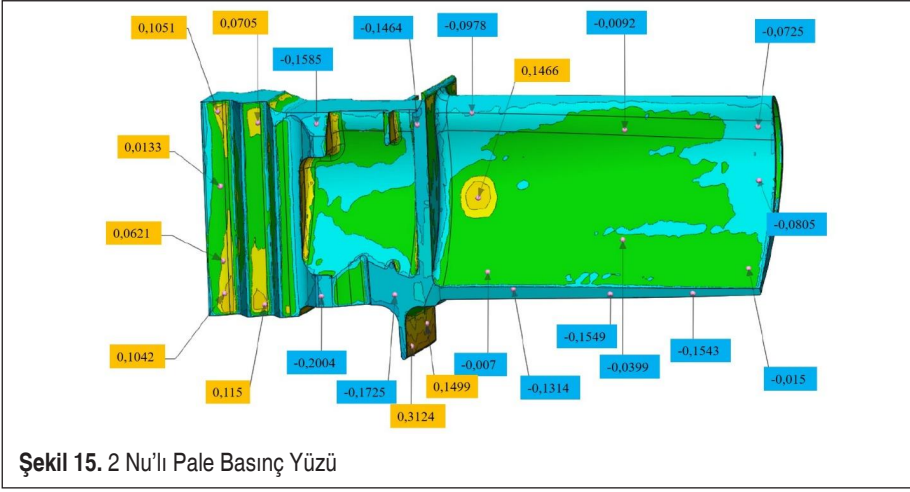
4.2 Fotogrametrik Analiz Sonuçları

Boyutsal doğrulama için 3 boyutlu katı model referans olarak kullanılmıştır. Ölçümler her iki pale için de aynı noktalardan yapılmıştır.

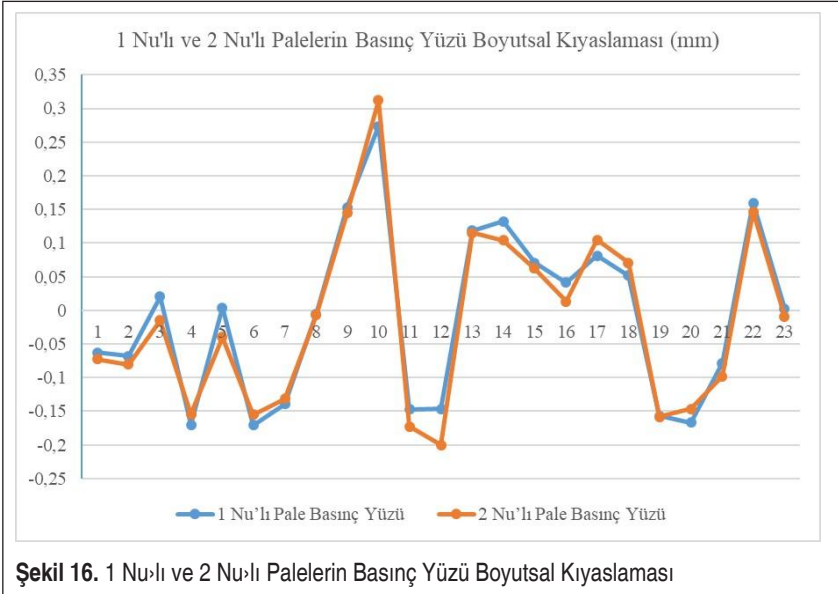
Smartscan3D ölçüm tezgâhında yapılan incelemeler sonucunda elde edilen veriler, palenin içbükey basınç yüzeyi (pressure surface) ve dışbükey emme yüzeyi (suction surface), verilerin gösterdiği değişime bağlı olarak renk skalasında büyüklük göstergesi olarak ifade edilmektedir.

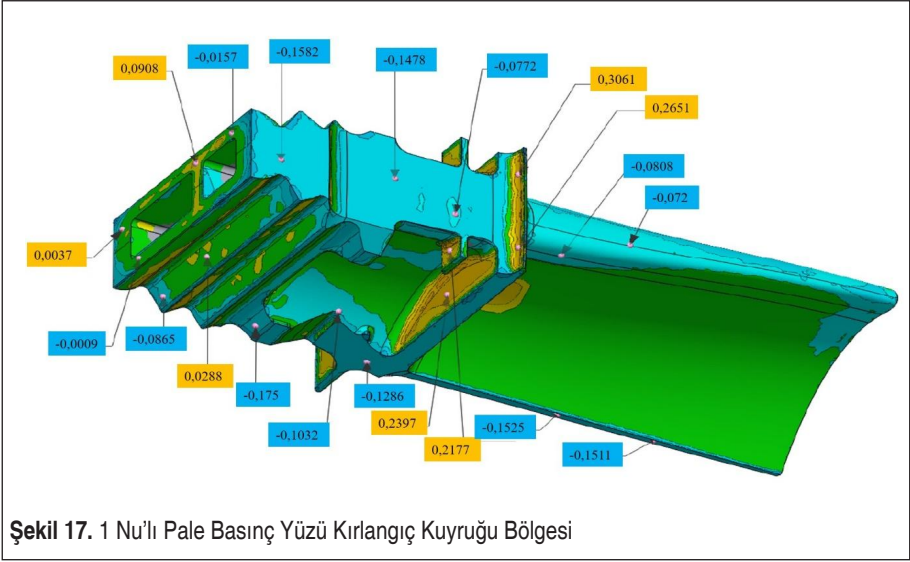
Büyüklük göstergesi sütununda sarı ve kırmızı pozitif sapmayı (Expansion), mavi ise negatif sapmayı (Shrinkage) temsil etmektedir. Değişim ne kadar fazla olursa, renk o denli koyulaşmaktadır. İki palede yer alan renk dağılımının uyumu, üretim stratejisinin doğruluğu hakkında ipuçları vermektedir. Yeşil alanlar katı model ile palelerin ölçülerinin $\pm 0,05$ mm limiti dâhilinde olduğunu gösteren yerlerdir. Şekil 14’te 1. Nu’lu pale ve Şekil 15’te 2 Nu’lu palelerin basınç yüzlerine ait fotogrametrik ölçümler sunulmuştur.





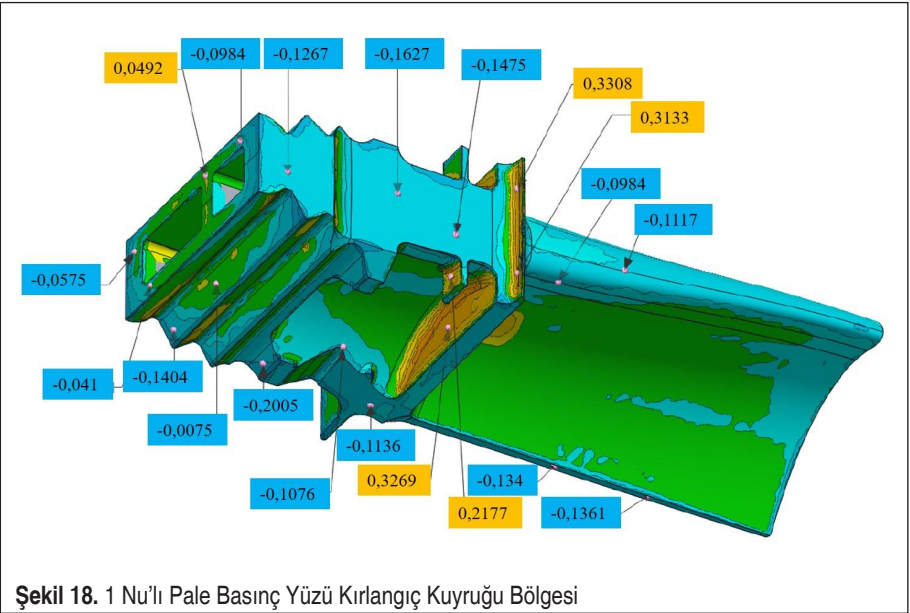
Palelerin basınç yüzleri üzerinde gerçekleştirilen 46 adet ölçümden, 25 adet negatif değişimin ortalaması 0,11923 mm, 21 adet ise pozitif değişimin ortalaması ise 0,103953 mm olarak gerçekleşmiştir. Şekil 16' da yer alan kıyaslama grafiğinde görüldüğü üzere 1 ve 2 Nu'lu palelerin basınç yüzlerinin geometrik olarak birbirlerine çok yakın bir profile sahip olduğu görülmektedir. Yapılan hesaplama sonucunda her iki palenin basınç yüzünde gerçekleşen ortalama değişim 0,007117 mm (7,117 μ) olarak belirlenmiştir.

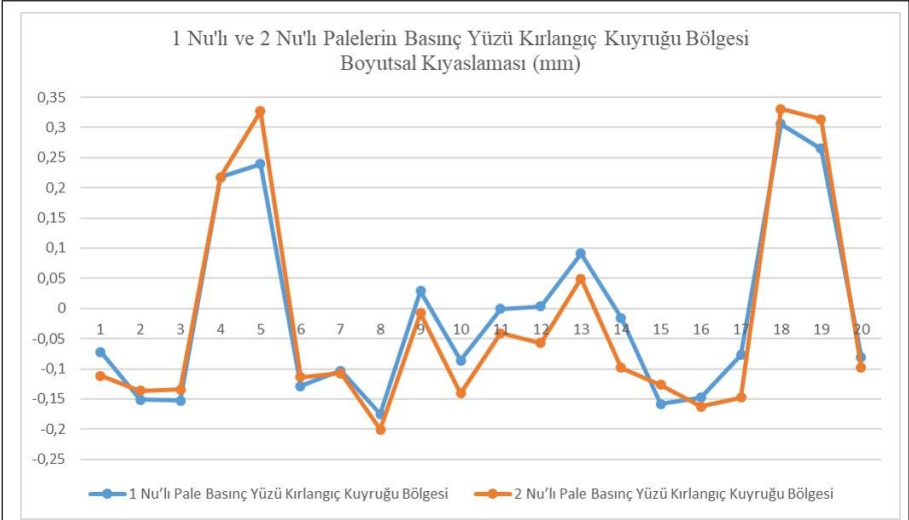




Şekil 17’de 1 Nu’lu pale ve Şekil 18’de 2 Nu’lu palelere ait basınç yüzü kırlangıç bölgelerine ait fotogrametrik ölçümler sunulmuştur.

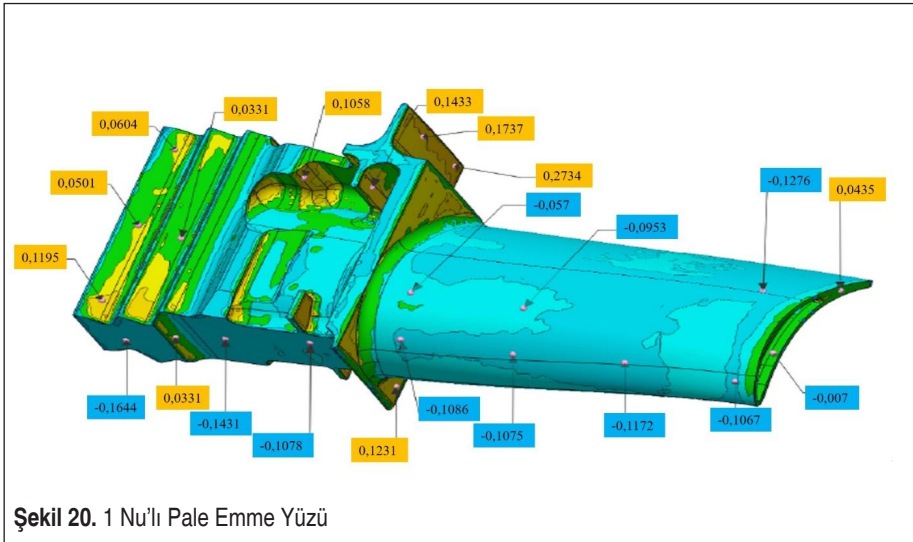
Şekil 19’ da sunulan kıyaslama grafiğinde görüldüğü üzere 1 ve 2 Nu’lu paleye ait basınç yüzü kırlangıç bölgelerinin geometrik olarak birbirlerine çok yakın bir profi-



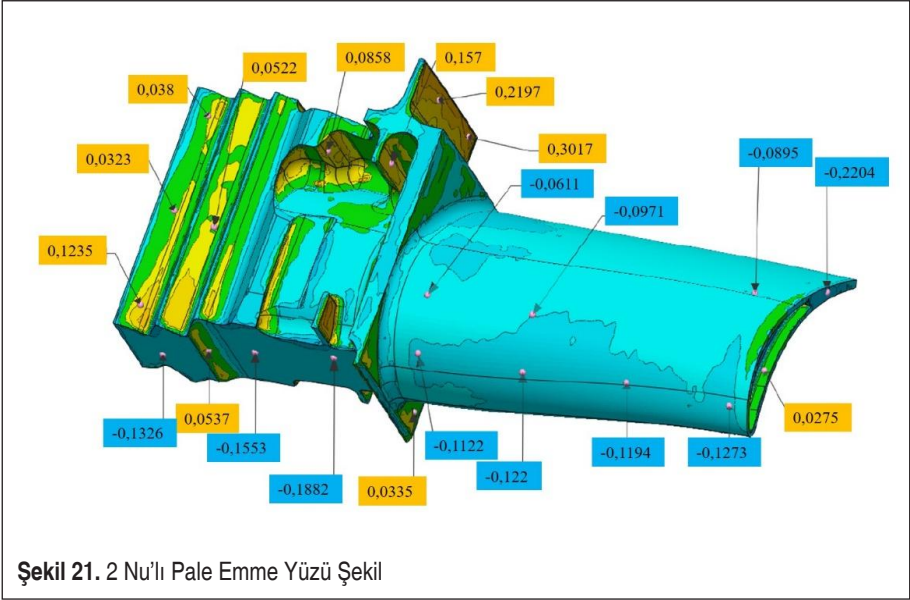


Şekil 19. 1 Nu'lu ve 2 Nu'lu Palelerin Basınç Yüzü Kırlangıç Kuyruğu Bölgesi Boyutsal Kıyaslaması

le sahip olduğu görülmektedir. Palelerin basınç yüzü kırlangıç bölgesi üzerinde elde edilen verilere göre; 40 adet ölçümden, 28 adet negatif değişimin ortalaması 0,10833 mm, 12 adet pozitif değişimin ortalaması ise 0,19915 mm olarak gerçekleşmiştir. Her iki palenin basınç yüzü kırlangıç bölgelerinde meydana gelen değişim 0,012405 mm (12,405 μ) olarak gerçekleşmiştir.

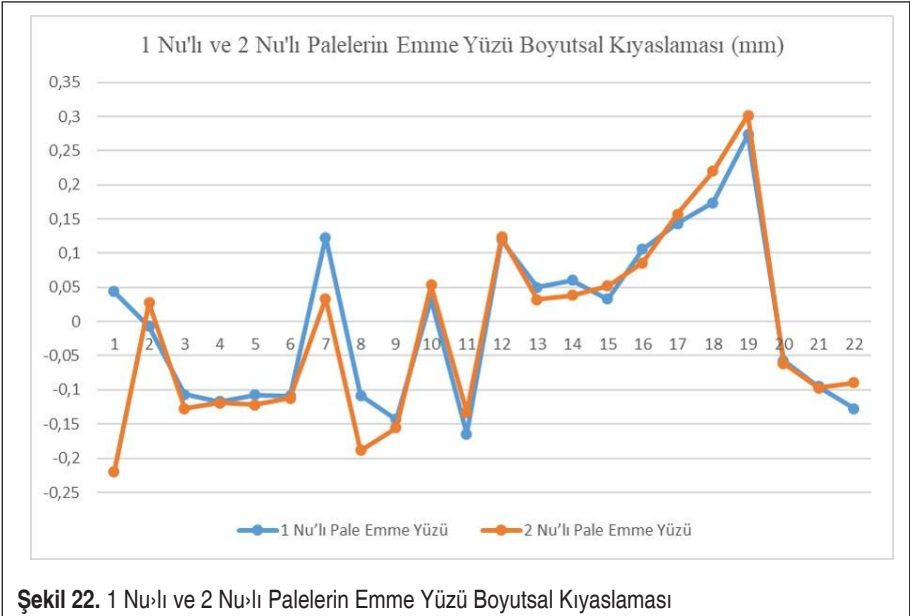


Şekil 20. 1 Nu'lu Pale Emme Yüzü

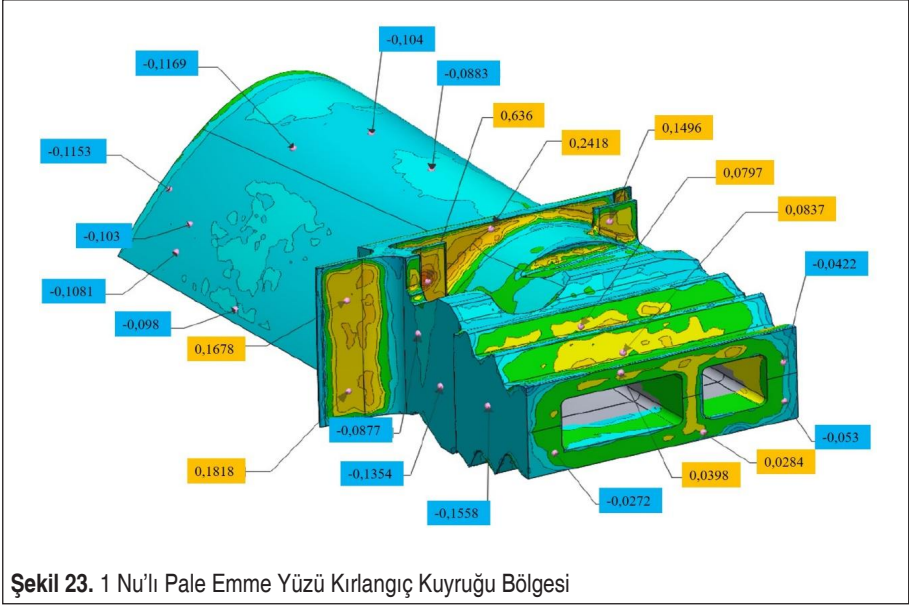


Şekil 21. 2 Nu'lu Pale Emme Yüzü Şekil

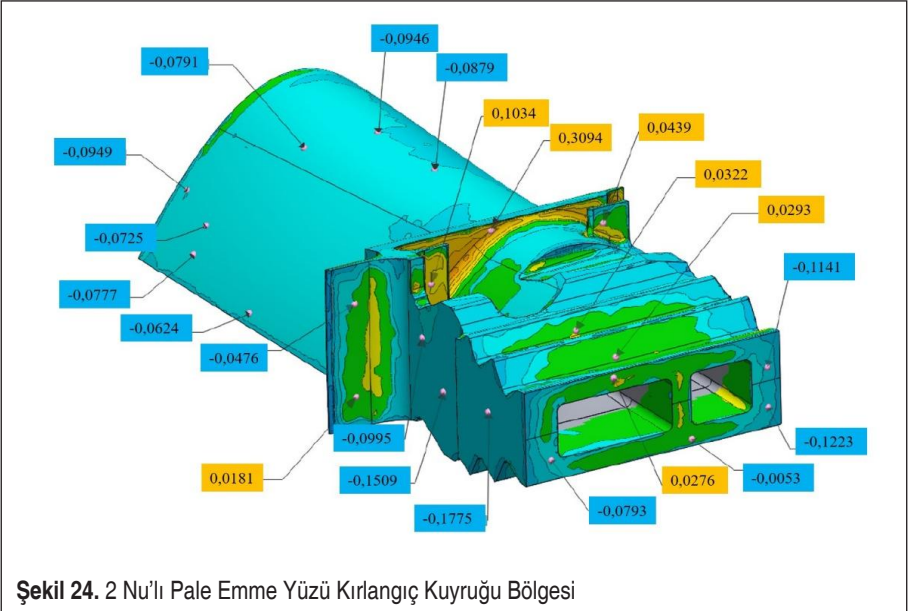
Şekil 20'de 1 Nu'lu pale ve Şekil 21'de 2 Nu'lu paleye ait emme yüzü bölgelerine ait fotogrametrik ölçümler sunulmuştur. Şekil 22'de sunulan kıyaslama grafiğinde görüldüğü üzere 1 ve 2 Nu'lu paleye emme yüzü bölgelerinin geometrik olarak birbirlerine çok yakın bir profile sahip oldukları görülmektedir.

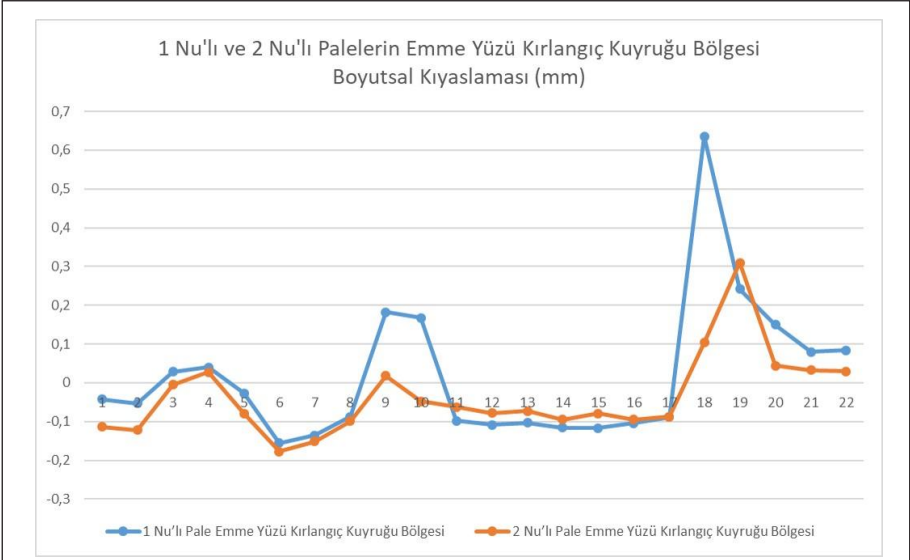


Şekil 22. 1 Nu'lu ve 2 Nu'lu Palelerin Emme Yüzü Boyutsal Kıyaslaması

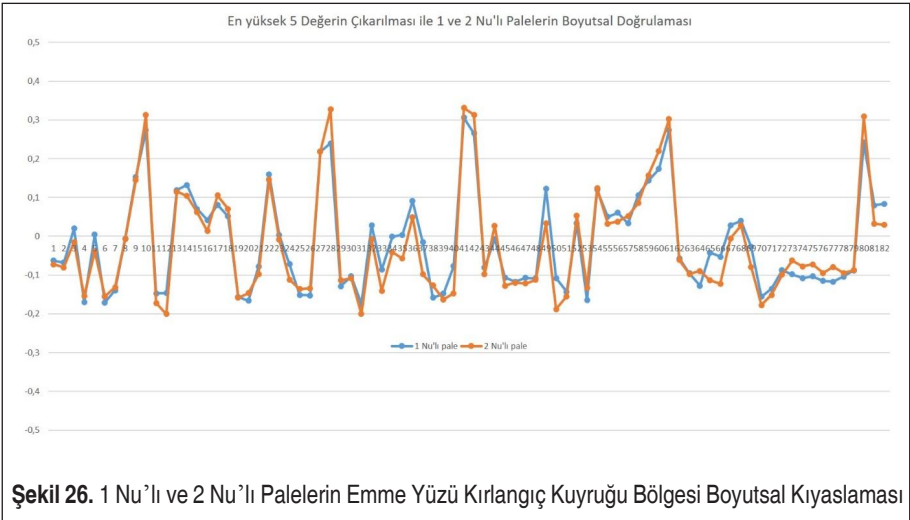


Palelerin emme yüzü üzerinde elde edilen verilere göre; 44 adet ölçümden, 22 adet negatif değişimin ortalaması 0,1167 mm, 22 adet pozitif değişimin ortalaması ise 0,103814 mm olarak gerçekleşmiştir. Her iki palenin basınç yüzü kırangıç bölgelelerinde meydana gelen değişim 0,013873 mm (13,873 μ) olarak gerçekleşmiştir.





Şekil 25. 2 Nu'lu Pale Emme Yüzü Kırlangıç Kuyruğu Bölgesi



Şekil 26. 1 Nu'lu ve 2 Nu'lu Palelerin Emme Yüzü Kırlangıç Kuyruğu Bölgesi Boyutsal Kıyaslaması

Şekil 23'te 1 Nu'lu pale ve Şekil 24'de 2 Nu'lu palelerin emme yüzü kırlangıç bölgelerine ait fotogrametrik ölçümler sunulmuştur.

Palelerin emme yüzü kırlangıç bölgesi üzerinde elde edilen verilere göre; 44 adet ölçümden, 28 adet negatif değişimin ortalaması 0,09288 mm, 14 adet pozitif değişimin ortalaması ise 0,155179 mm olarak gerçekleşmiştir. Her iki palenin basınç yüzü

kırlangıç bölgelerinde meydana gelen değişim 0,050159 mm (50,159 μ) olarak gerçekleşmiştir. Şekil 25'te sunulan kıyaslama grafiğinde görüldüğü üzere 1 ve 2 Nu'lu paleye ait emme yüzü kırlangıç kuyruğu genel itibarıyla geometrik olarak birbirlerine yakın bir profile sahip olduğu gözlemlenmektedir.

İki geometri arasındaki farkın en büyük olduğu 5 değer 4'ü emme yüzeyi kırlangıç kuyruğu bölgesinde sırasıyla 0,5326 mm, 0,2154 mm, 0,1637 mm ve 0,1057 mm ile 1 tanesi de emme bölgesi yüzeyinde 0,2639 mm olarak belirlenmiştir. Bu değerler hesaplamadan çıkarıldıktan sonra edilen grafik Şekil 26'da sunulmuş olup bu durumda, değişim değeri ortalama 0,007596 mm (7,59 μ) olarak belirlenmiştir.

5. SONUÇLAR

Bir gaz türbin motoru kompresör palelerinin üretimi ve boyutsal doğruluğunun belirlenmesine yönelik çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıdaki verilmiştir.

- Genel boyutsal kıyaslamada, negatif değişim gösteren 103 ölçümde ortalama 0,10634 mm ve pozitif değişim gösteren 71 ölçümde ortalama 0,127173 mm (127,173 μ) mm olarak değişim görülmüştür.
- Negatif değişim en düşük 0,0009 mm, en yüksek 0,2204 mm olarak belirlenmiştir. Pozitif değişim ise 0,0029 mm en yüksek 0,636 mm olarak belirlenmiştir. Palelerin birbirine ortalama 0,02187 mm (21,87 μ) değerinde yakınsadığı hesaplanmıştır.
- Ölçümlerde, katı modele oranla, 1 Nu'lu palede ortalama +0,0944/-0,0809 mm arasında, 2 Nu'lu palede ortalama +0,1093/-0,0978 mm değişim olduğu belirlenmiştir.
- Pozitif ve yüksek değerli farklılıkların palelerin eğimli (Curved) yüzeylerinden daha ziyade düz (Flat) bölgelerinde gerçekleştiği görülmüştür. Bu durumun dikey inşa yönünde EÜ karakteristiklerinin daha kararlı sonuçlar vermesinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir.
- Her iki palenin katı modele göre kıyaslamasında $\pm 0,05$ mm limiti dâhilinde olduğu yeşil bölgelerin fazla olması üretimde tutarlılık açısından bir gösterge olarak nitelendirilmektedir.
- Müşteri talepleri doğrultusunda söz konusu veriler limit dâhilinde kabul edilmesi mümkündür. Ayrıca başka bir çalışmada tamamen mukavemet değerlerine odaklanarak deneyler gerçekleştirilmesi uygun olacaktır.
- Ortaya çıkan boyutsal farklılıkların bertaraf edilmesi ve istenen boyutsal değerlerde parça imalatı için katman kalınlığı, lazer gücü, tarama hızı, yanal kayma kalınlığı gibi parametrelerin tezgâh ile uyumlu olarak optimize edilmesi ve enerji yoğunluğu eşitliğini esas alarak üretim gerçekleştirilmesi önerilmektedir.



- Bir hipotez olarak, daha sonraki üretimlerde, bu üretim sırasında desen olarak kullanılan dışa doğru ilerleme (Off-Set Out) yerine, fraktal desenin seçilmesinin Şekil 6’da verilen yüzey deformasyonlarının minimize edilmesi açısından fayda sağlayacağı ön görülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Artuk Aviation Ltd. Şti tarafından ilk ürün kontrolü çalışmaları kapsamında gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın gerçekleştirilmesinde verilen destek için Artuk Aviation Ltd. Şti.’ne teşekkür ederim.

KAYNAKÇA

1. **Peter, S.** 2003. “Gas turbine technology”, *Physics Education*, vol: 38, p. 504-511, DOI:10.1088/0031-9120/38/6/002
2. **Mitsubishi, T., Masashi K.** 2014. “Making Lighter Aircraft Engines with Titanium Aluminide Blades”, *IHI Engineering Review*, vol:47, p. 10-13
3. **Burgi, Y. P., Caillet, M., & Haefeli, S.** 2002. “Field temperature measurements at Erta’Ale Lava Lake, Ethiopia”, *Bulletin of Volcanology*”, vol: 64, p. 472-485. doi:10.1007/s00445-002-0224-3
4. **Ma, F., Cao, W., Luo, Y., Qiu Y.** 2016. “The review of manufacturing technology for aircraft structural part”, *Procedia CIRP*, vol: 56, p. 594–598, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.10.117>.
5. **Noh, H.M., Benito A., Alonso G.** 2016, “Study of the current incentive rules and mechanisms to promote biofuel use in the EU and their possible application to the çivil aviation sector” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol: 46, p. 298–316, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.04.007>.
6. **Kenaroğlu, Y.** 2010. “Hava Araçlarının Uçuşa Elverişlilik Sertifikasyonu”. *Mühendis ve Makina*. 52, 614, 16-28.
7. **Saraçyakupoğlu, T.** 2020. *Emniyet İrtifasından Bilgiler: Genel Havacılık, Üretim ve Bakım Süreçleri*. ISBN: 978-625-402-030-8, Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara.
8. Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü (SHGM), 2018, “Havacılıkta Parça ve Cihaz Sertifikasyonu Rehber Dokümanı”, p. 14
9. **Şöhret Y.,Ekici S.,Altuntaş Ö., Hepbaşlı A., Karakoç T.H.** 2016, “Exergy as a useful tool for the performance assessment of aircraft gas turbine engines: A key review”, *Progress in Aerospace Sciences*, Vol: 83, p. 57-69, <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2016.03.001>
- 10 **Zhang, L., & Chen, L.** 2019. “A Review on Biomedical Titanium Alloys: Recent Progress and Prospect”. *Advanced Engineering Materials*. Vol: 21, p. 1-29, doi:10.1002/adem.201801215

11. **Shuhui, H., Yingying, Z., Debin, S.** 2013. "Application of thermohydrogen processing to Ti6Al4V alloy blade isothermal forging". *Materials Science and Engineering: A*, Vol: 561, p. 17–25. doi:10.1016/j.msea.2012.10.056
12. **Zhuang, J.-R., Lee, Y.-T., Hsieh, W.-H., & Yang, A.-S.** 2018. "Determination of melt pool dimensions using DOE-FEM and RSM with process window during SLM of Ti-6Al4V powder". *Optics & Laser Technology*, vol: 103, p. 59–76. doi:10.1016/j.optlas-tec.2018.01.013
13. **Greitemeier, D., Palm, F., Syassen, F., & Melz, T.** (2017). Fatigue performance of additive manufactured TiAl6V4 using electron and laser beam melting. *International Journal of Fatigue*, Vol: 94, p. 211–217. doi:10.1016/j.ijfatigue.2016.05.001
14. **Liu, R., Wang, Z., Sparks, T., Liou, F., & Newkirk, J.** 2017. "Aerospace applications of laser additive manufacturing". *Laser Additive Manufacturing*, p. 351–371. doi:10.1016/b978-0-08-100433-3.00013-0
15. **Han, P.** 2017. "Additive Design and Manufacturing of Jet Engine Parts". *Engineering*, vol:3(5), p. 648–652. doi:10.1016/j.eng.2017.05.017
16. **Xu, X., Lu, Y., Li, S., Guo, S., He, M., Luo, K., Lin, J.** 2018. "Copper-modified Ti-6Al4V alloy fabricated by selective laser melting with pro-angiogenic and anti-inflammatory properties for potential guided bone regeneration applications". *Materials Science and Engineering: C*, vol: 90, p. 198–210. doi:10.1016/j.msec.2018.04.046
17. **Urtekin, L., Keleş, Ö.** 2019. "Biyomedikal Uygulamalar İçin TiN Kaplı Ti6Al4V Alaşıımının Mekanik Özelliklerinin Araştırılması". *Savunma Bilimleri Dergisi*. vol: 18 (2), pp. 91-108. DOI: 10.17134/khosbd.642142
18. **Seabra, M., Azevedo, J., Araújo, A., Reis, L., Pinto, E., Alves, N., Santos R., Mortágua, J. P.** 2016. "Selective laser melting (SLM) and topology optimization for lighter aerospace components". *Procedia Structural Integrity*, Vol: 1, p. 289–296. doi:10.1016/j.prostr.2016.02.039
19. **Farooq, M.U., Ali, M.A., He, Y., Khan, A.M., Pruncu, C.I., Kashif, M., Ahmed, N., Asif, N.** 2020. "Curved profiles machining of Ti6Al4V alloy through WEDM: investigations on geometrical errors". *Journal of Materials Research and Technology*, vol: 9 (6), p. 16186-16201, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.11.067>
20. **Garmendia, I., Flores, J., Madarieta, M., Lamikiz, A., Uriarte, L.G., Soriano, C.** 2020. "Geometrical control of DED processes based on 3D scanning applied to the manufacture of complex parts." 11th CIRP Conference on Photonic Technologies. 7-10 Eylül 2020, Almanya.
21. **Li, M., Li, J., Yang, D., He.** 2020. Dimensional Deviation Management for Selective Laser Melted Ti6Al4V Alloy Blade". *Frontiers in Materials*. vol:7, p.1-10
22. **Annamaria, G., Kazarian M., Martina F., Mehrpouya M.** 2019, "Metal additive manufacturing in the commercial aviation industry: A review", *Journal of Manufacturing Systems*, vol: 53, p. 124-149, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.08.005>
23. **Sarac¸yakupoğlu, T.** 2019. "Havacılık Endüstrisinde 3 Boyutlu Üretim Uygulamalarının Uçuşa Elverişlilik Kural ve Düzenlemelerine Göre Değerlendirilmesi", *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, vol: 4, p. 53-65



24. **Yusuf S.M., Cutler S., Gao N.** 2019. "Review: The Impact of Metal Additive Manufacturing on the Aerospace Industry.", *Metals*, Vol: 9, p. 1286, doi:10.3390/met9121286
25. **Gibson, I., Rosen, D., Stucker B.** 2015. "Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing", ISBN 978-1-4939-2112-6, DOI 10.1007/978-1-4939-2113-3, Springer, New-York
26. **Yamanaka, K., Saito, W., Mori, M., Matsumoto, H., Chiba, A.** 2015. "Preparation of weak-textured commercially pure titanium by electron beam melting", *Additive Manufacturing*, vol: 8, p.105–109, <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.addma.2015.09.007>
27. **Barroqueiro, B., Andrade-Campos, A., Valente, R.A.F.** 2019. "Designing Self Supported SLM Structures via Topology Optimization" *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol:3, p. 68, <https://doi.org/10.3390/jmmp3030068>
28. **Rizzo, A., Goel, S., Luisa, G.M., Iglesias, R., Jaworska, L., Lapkovskis, V., Novak, P., Postolnyi, B.O., Valerini, D.** 2020. "The Critical Raw Materials in Cutting Tools for Machining Applications: A Review.", *Materials*. vol: 13, p. 1377, <https://doi.org/10.3390/ma13061377>
29. **Poyraz, Ö., Kuşhan M.C.** 2018. "Havacılık Komponentlerinin Bakım Uygulamalarında Katmanlı İmalat Teknolojilerinin Kullanımı.", *Mühendis ve Makina*, Vol. 59 (691), p. 59-69
30. **Ateş, H., Düzgün M.** 2020. "İnsansız Hava Araçları (İHA) Temel Bilgiler ve Kullanım Alanları", p. 144, ISBN: 978-625-406-738-9 Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara
31. American Society for Testing and Materials (ASTM) 1472, Standard Specification for Wrought Titanium -6Aluminum -4Vanadium Alloy (UNS R56400) for Surgical Implant Applications
32. American Society for Testing and Materials (ASTM) 2924, Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium with Powder Bed Fusion
33. **Jiménez, M., Romero, L., Domínguez, I.A., Espinosa, M.M., Domínguez, M.** 2019. "Additive Manufacturing Technologies: An Overview about 3D Printing Methods and Future Prospects", *Complexity*, Vol: 2019, p.30, <https://doi.org/10.1155/2019/9656938>
34. **Liu, S., Shin, Y.C.** 2019. "Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review", *Materials and Design*, Vol:164, p. 107552, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.107552>
35. **Wang, M., Lin, X., Huang W.** 2016. "Laser additive manufacture of titanium alloys", *Materials Technology*, Vol: 31, p. 90-97, DOI: 10.1179/1753555715Y.0000000079
36. **Körner, C.** 2016. "Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting — a review", *International Materials Reviews*, Vol: 61, p. 361-377, DOI: 10.1080/09506608.2016.1176289
37. **Herzog, D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C.** 2016. "Additive manufacturing of metals", *Acta Materialia*, Vol: 117, p. 371-392, <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019>
38. **Becker, T., Mathias, B., Cornie, S.** 2015. "Microstructure and mechanical properties of direct metal laser sintered TI-6AL-4V". *South African Journal of Industrial Engineering*,

vol. 26. P. 1-10. 10.7166/26-1-1022.

39. **Zhu, J., Zhou, H. Wang, C., Zhou L., Yuan S., Zhang W.** 2021. “A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges”, Chinese Journal of Aeronautics, Vol: 34, Issue 1, p. 91-110, <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.09.020>
40. **Shamsdini, S., Shakerin, S., Hadadzadeh, A., Amirkhiz, B. S., Mohammadi, M.** 2020. “A trade-off between powder layer thickness and mechanical properties in additively manufactured maraging steels”. Materials Science and Engineering: A, vol: 776, p. 139041. doi:10.1016/j.msea.2020.139041
41. **Shi, X., Ma, S., Liu, C., Chen, C., Wu, Q., Chen, X., Lu, J.** 2016. “Performance of High Layer Thickness in Selective Laser Melting of Ti6Al4V”, Materials , vol:9, p. 975, <https://doi.org/10.3390/ma9120975>
42. **Mierzejewska, Ż.A., Hudák, R., Sidun, J.** 2019, “Mechanical Properties and Microstructure of DMLS Ti6Al4V Alloy Dedicated to Biomedical Applications”, Materials, vol: 12, p.176, <https://doi.org/10.3390/ma12010176>
43. **Agius, D., Kourousis, K.I., Wallbrink, C.** 2018, “A Review of the As-Built SLM Ti-6Al-4V Mechanical Properties towards Achieving Fatigue Resistant Designs”, Metals, Vol: 8, p. 75, <https://doi.org/10.3390/met8010075>
44. **Poyraz, Ö., Kuşhan, M.C.** 2017. “Metallerin lazer katmanlı imalatında farklı proses parametrelerin etkisinin incelenmesi “, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, Vol: 33, 729-742, DOI:10.17341/gazimmfd.416479
45. **Sola, A., Nouri, A.** 2019. “Microstructural porosity in additive manufacturing: The formation and detection of pores in metal parts fabricated by powder bed fusion”, Vol: 1, p. 10021, DOI: 10.1002/amp2.10021
46. **Bandyopadhyay A., Bose S.** 2020. “Additive Manufacturing”, ISBN: 978-1-138-60925-9, Taylor & Francis Group, New-York
47. **Khairallah S.A., Anderson A.T., Rubenchik A., King W.E.** 2016. “Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones”, Acta Materialia, Vol: 108, p.36-45, <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.02.014>
48. **Vilardell, A.M., Yadroitsev, I., Yadroitsava, I., Albu, M., Takata, N., Kobashi, M., Krakhmalev, P., Koupryanoff, D., Kothleitner, G., Plessis, A.D.** 2020. “Manufacturing and characterization of in-situ alloyed Ti6Al4V(ELI)-3 at.% Cu by laser powder bed fusion”, Additive Manufacturing, Vol:36, p. 101436, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101436>
49. **Guo, Q., Zhao, C., Qu, M., Xiong, L., Escano, L.I., Hojjatzadeh, S.M.H., Parab, N.D., Fezzaa, K., Everhart, W., Sun, T., Chen, L.** 2019. “In-situ characterization and quantification of melt pool variation under constant input energy density in laser powder bed fusion additive manufacturing process”, Additive Manufacturing, Vol:28, p. 600-609, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.04.021>



50. **Kusuma, C., Ahmed, S.H., Mian, A., Srinivasan R.** 2017. “Effect of Laser Power and Scan Speed on Melt Pool Characteristics of Commercially Pure Titanium (CP-Ti)”. *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol: 26, p. 3560–3568, <https://doi.org/10.1007/s11665-017-2768-6>
51. **Yu, N.** 2005. *Process Parameter Optimization for Direct Metal Laser Sintering (DMLS)*, Doktora tezi, National University of Singapore, Singapur
52. **Shamsaei, N., Yadollahi, A., Bian, L., Thompson, S.M.** 2015. “An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part II: Mechanical behavior, process parameter optimization and control”, *Additive Manufacturing*, vol:8, p. 12-35, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.07.002>
53. **Yu, J., Lin, X., Ma, L., Wang, J., Fu, X., Chen, J., Huang, W.** 2011. “Influence of laser deposition patterns on part distortion, interior quality and mechanical properties by laser solid forming (LSF)”, *Materials Science and Engineering: A*, vol: 528, p. 1094-1104, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.09.078>
54. **Guzanová, A., Ižaríková, G., Brezinová, J., Živčák, J., Draganovská, D., & Hudák, R.** 2017. “Influence of Build Orientation, Heat Treatment, and Laser Power on the Hardness of Ti6Al4V Manufactured Using the DMLS Process”, *Metals*, Vol: 7(8), 318. doi:10.3390/met7080318
55. **Leuders, S., Thöne, M., Riemer, A., Niendorf, T., Tröster, T., Richard, H. A., Maier, H. J.** 2013. “On the mechanical behaviour of titanium alloy TiAl6V4 manufactured by selective laser melting: Fatigue resistance and crack growth performance”. *International Journal of Fatigue*, Vol: 48, p. 300–307. doi:10.1016/j.ijfatigue.2012.11.011
56. **Flower, H. M.** 1995. “High performance materials in Aerospace”. ISBN: 978-94-010-4296-3. DOI:10.1007/978-94-011-0658-6. Springer. Londra, İngiltere.
57. **Malefane, L.B.** 2019. “Determination of the fatigue properties of Ti6Al4V (ELI) parts built by a direct metal laser sintering system with standard process parameters followed by post-processing treatments”, Central University of Technology, Free State

2020 YILI DEĞERLENDİRMESİ

Geren YILMAZ ARAS

Mühendis ve Makina, toplumun, ülke sanayisinin, Odamıza üye meslek disiplinlerinin ve meslektaşlarımızın ihtiyaçlarını karşılamak üzere TMMOB Makina Mühendisleri Odası tarafından 1957’den bugüne değin yayımlanmaktadır.

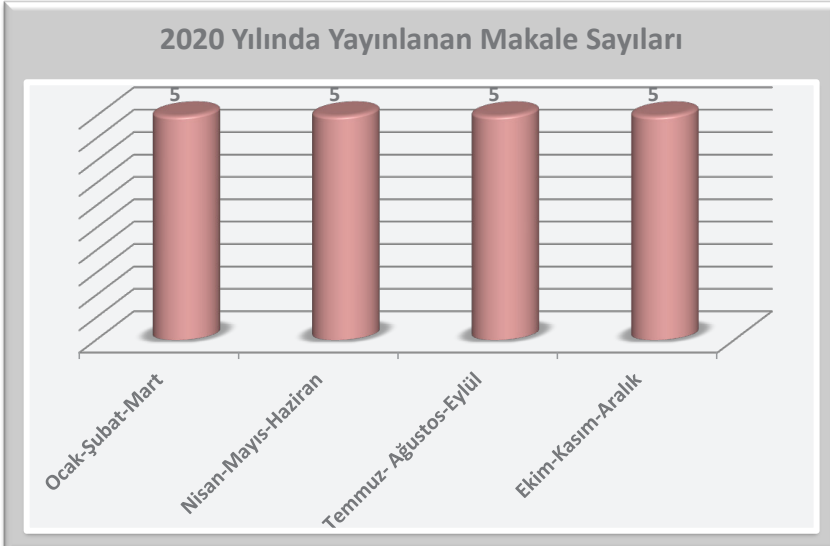
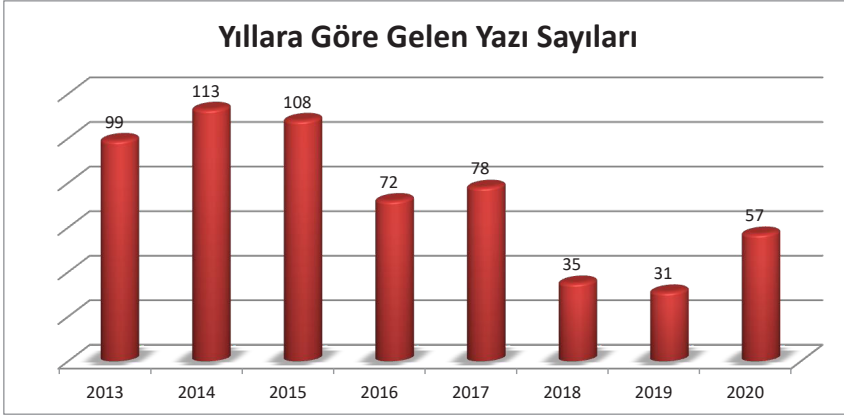
Dergimiz akademik süreli yayıncılıkta, uluslararası kalite ve standartlara uygun olarak süreçlerini düzenlemektedir. “Mühendis ve Makina” 3 aylık periyotlarda (Mart, Haziran, Eylül, Aralık) yayımlanan hakemli (Kapalı İnceleme Süreci) bir dergidir. Ayrıca, ULAKBİM–TRDizin, EBSCO, Index Copernicus, UDLedje, SIS (Scientific Indexing Services), COPAC, SCHOLAR, ACADEMIC RESOURCINDEX, WORLDCAT, EUROPUB Index, InfoBase Index veri tabanlarında düzenli olarak taranmaktadır. Bu çevrimiçi tam metin veritabanları, 120’den fazla ülkede kullanılmakta olup, bu veri tabanları sayesinde dergimizin dünya genelinde daha geniş bir kitleye ulaşması ve tanınması sağlanmaktadır. Ayrıca Ulusal ve Uluslararası diğer veri tabanlarına başvurularına devam etmektedir.

Ülkemizin konusunda önde gelen dergilerinden biri olan Mühendis ve Makina, 2017 yılı Nisan ayına kadar aylık, sonra ise en az beş makale sayısı, üç aylık periyoduyla, yeni teknolojileri, bilimsel araştırma ve inceleme konularını ve mühendisliğe ilişkin birikimleri sayfalarına taşıyarak Oda üyelerine ve ilgili kesimlere bu birikimlerini ulaştırma çabasıdır.

MAKALELER

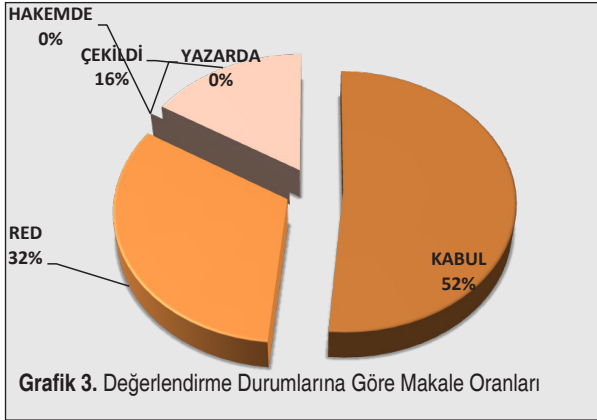
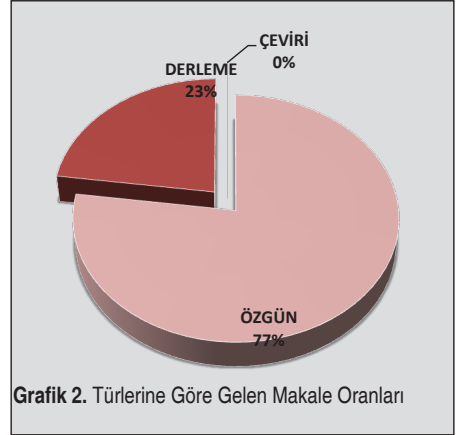
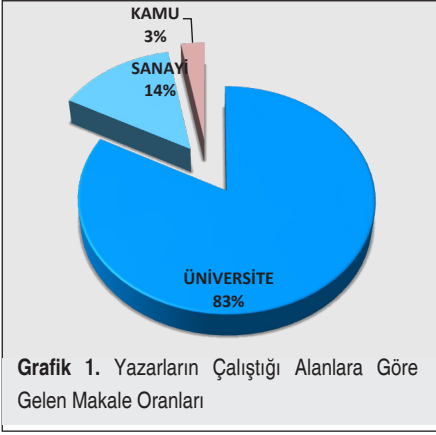
Mühendis ve Makina dergisine 2020 yılında 57 makale gelmiştir. Makalelerin hakemler tarafından değerlendirilmesi sonucu ortaya çıkan kabul ve ret oranına baktığımızda, 35 tanesi kabul edilmiş ve 22 tanesi reddedilmiştir. 2020 yılında kabul edilen makalelerden 20 tanesi yayımlanmış, 15 tanesi yayımlanmaya hazırdır. Kabul edilen makalelerin yazarlarının çalıştığı kurum ve kuruluşlara bakıldığında, yüzde 82’lik payı üniversiteler, yüzde 3’lük payı kamu kurum ve kuruluşlar, yüzde 15’lik payı sanayi ve özel sektör oluşturmaktadır. 2020 yılında sanayi kuruluşları ile üniversite ortaklığında yazılan makalelerin devamlılığının sağlanması, meslek odası – üniversite – sanayi ilişkisinin güçlendirilmesi açısından oldukça önemlidir.

Dergimize gelen makaleler nitelikleri bakımından özgün, çeviri ve derleme olmak



üzere üç kategoride değerlendirilmektedir. 2020 yılında kabul edilen 35 makalenin, 27 özgün, 8 derleme makaledir.

Dergimiz, TÜBİTAK ULAKBİM çatısı altında, Türkiye’de yayınlanan akademik hakemli dergiler için elektronik ortamda barındırma ve editoryal süreç yönetimi hizmeti sunan, ulusal akademik dergilerin standartlara uygun olarak varlık kazanmasına ve uluslararası görünürlüğünün artırılmasına destek olan Dergipark alt yapısını kullanmaktadır. Makalelerin <https://dergipark.org.tr/tr/pub/muhendis-makina> adresinde yer alan Dergipark’a kayıt yapılarak gönderilmesi, süreçlerin



takibini kolaylaştırmış, yazar-editör ve editör-hakem arasında makale ve ileti gönderimini hızlandırarak kabul edilen makalelerin güncelliğini yitirmeden yayımlanması sağlanmıştır.

SONUÇ

Dergimiz, tercih eden üyelerimize posta ile ulaştırılırken www.mmo.org.tr/muhendismakina adresinden de ihtiyacı olan herkesin erişimine sunulmaktadır. Daha etkin bir web sayfası için çalışmalarımız sürmektedir.

Geçmişte olduğu gibi bugün de bizlere destek olan tüm kişi, kurum ve kuruluşlara, hakemlerimize, yazarlarımıza, yayın kurulumuza, yayın danışma kurulumuza ve yayın çalışanlarına özverili çalışmalarından dolayı teşekkür ederiz.

makale article

- Eklemeli İmalatla Üretilen İşlevsel Olarak Derecelendirilmiş Metal Yapılar** 1
Metal Additive Manufactured Functionally Graded Structures
Orhan GÜLCAN, Uğur ŞİMŞEK, Barış KAVAS
- Çatı Tipi Paket Klima Cihazı için Kondenser Tarafında** 23
Evaporatif Soğutma Uygulaması
Investigation of "Evaporative Pad" Application on the Condenser
Nisa ÖZÇAKIR, Hüseyin GÜNERHAN
- Çift Ağlı Hidrojellerin Basma Yükü Altında Gerilme Gevşemesi Davranışı** 45
Stress Relaxation Behavior of Double Network Hydrogels under
Compressive Loading
Necmi DÜŞÜNCELİ
- TIG Kaynağı Yapılan Alüminyum Bir Sac Parçanın Çarpılma** 55
Miktarının İncelenmesi
Investigation of the Impact Amount of an Aluminum Sheet With TIG Welding
Tugay KARAGÖZ
- Güneş Enerjisi Depolama Malzemelerinin Bugünü, Yarını ve Geleceği** 70
Today, Tomorrow, and the Future of Energy Storage Materials for Solar Energy
Dawar ALİ , Mehmet Fatih KAYA, Levent ŞENDOĞDULAR
- Yenilikçi Ürün Tasarımında Fonksiyon Analizi ve Budama Yöntemi** 91
Function Analysis and Trimming Method in Innovative Product Design
Ali KILIÇ, Orhan ERSÜRMEİ, Bahattin DABANIYASTI, Sadettin KAPUCU
- Soğuk Püskürtme Teknolojisi ve Uygulamaları** 106
Cold Spray Technology and its Applications
Elif TEKİN, Serden UYUM, Buğra KARAHAN, Kadir Cihan TEKİN,
Uğur MALAYOĞLU
- Bir Gaz Türbin Motoru Kompresör Palesininti6Al4V Alaşımından** 151
Eklemeli Üretim Yöntemi ile İmalatı ve Boyutsal Doğrulaması
Manufacture and Dimensional Verification of a Gas Turbine Engine Compressor Blade
Produced via Additive Manufacturing Method using Ti6Al4V
Tamer SARAÇYAKUPOĞLU