MAKİNE MÜHENDİSLİĞİNDE İLERİ ARAŞTIRMALAR

Editör: Doç.Dr. Emre ARABACI

yaz
yayınları

Makine Mühendisliğinde İleri Araştırmalar

Editör

Doç. Dr. Emre ARABACI

yaz yayınları

2024

yaz
yayınları

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİNDE İLERİ ARAŞTIRMALAR

Editör: Doç. Dr. Emre ARABACI

© YAZ Yayınları

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

E_ISBN 978-625-6171-59-6

Aralık 2024 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar/AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

info@yazyayinlari.com

İÇİNDEKİLER

Magnezyum Matrisli Kompozit Malzemeler 1
Fevzi KELEN

Lınear Actuators Utılızıng Shape Memory Materıals 22
Feyza Nisan KAĞNICI, Emre ARABACI

Temel ve Reküperatörlü Organik Rankine Çevrimlerinin Termodinamik Açıdan Karşılaştırılması 47
Erhan KIRTEPE

Bınder Jettıng Addıtıve Manufacturıng Process 60
Ali BALBAY, İlhan ASİLTÜRK

A Revıew Of Lamınated Composıte Fılms..... 80
Sakine KIRATLI

Tasarım ve İmalatta Görüntü İşleme Uygulamaları 103
Kadir SARI, Hakan DİLİPAK

Max Fazları: Gelişim Süreci, Yapısal Özellikler ve Uygulamalar 130
Semih DURAN, Hikmet ÇİÇEK

Lıfe Cycle Cost Analysıs Based On The External Walls of a Hospıtal Buıldıng 146
İsmail CANER, Nadir İLTEN

Pla, Pla Kompozit ve Karışımlarının Uygulama Alanları ve Üretim Yöntemleri..... 154
Hakan KAZAN

Kayıt Formu.....

Alüminyum Dökümünde Kullanılan Alaşım Elementlerinin Etkisi 177
Murat ÇOLAK

örnektir

Advanced Technıques For Effıcıency Improvement of Dıesel Engınes 199
Hasan Üstün BAŞARAN

Parameters Affectıng Combustıon Effıcıency ın Cırculatıng Fluıdızed Bed Systems 221
Oğuzhan ERBAS, Halit ARAT

Korozif Ortamlar İçin Makine Elemanlarının Tasarım Prensipleri 235
Tuğçe TEZEL, Volkan KOVAN

Fonksiyonel Dereceli Eklemeli İmalat (Fgam) Teknolojilerinin Gelişimi ve Mühendislik Uygulamaları 255
Tuğçe TEZEL, Volkan KOVAN

Tribolojik Uygulamalarda Biyo-Bozunabilir Yağlayıcıların Kullanılması 277
M. Salih GÜL, Sena KABAVE KILINÇARSLAN

Polimer Malzemelerin Yaşam Döngüsü ve Karbon Ayak İzi 294
Sena KABAVE KILINÇARSLAN, M. Salih GÜL, M. Hüseyin ÇETİN

Sıze Effects On Vıbratıons Of Cracked Mıcrobeams 313
Duygu ATCI

Wnd Tunnels And Desıgn Detaıls 331
Mustafa Arif ÖZGÜR, Samet Giray TUNCA, Kadir OLCAY, Onur KOŞAR

Endüstriyel Isıl Prosesler İçin Atık Isı Geri Kazanımlı Yüksek Sıcaklıklı Isı Pompaları 350
Ahmet ÇAĞLAR

örnektir

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir."

MAGNEZYUM MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER

Fevzi KELEN[1]

1. GİRİŞ

Benzinli, dizel, hibrit ve elektrikli karayolları taşıtlarında enerji ekonomisi son derece hayati bir parametre olarak değerlendirilmektedir. Özellikle petrol kökenli yakıtların verimsiz kullanımdan kaynaklanan hammadde rezervlerinin israfı ve yanma sonucu ortaya çıkan zararlı emsiyonların atmosfer ve canlılar üzerindeki olumsuz etkileri otomotiv üreticileri üzerinde ciddi baskı oluşturmaktadır. Diğer taratan elektrikli araçlarda karşılaşılan kısa menzil sorunları çözülmesi gereken başka bir problem olarak husul etmektedir. Bu mühim sıkıntılar araştırma ve geliştirme çalışmalarına önemli bir ivme kazandırarak dikkatleri otomobil ağırlığına yönlendirmiştir. Zira taşıtlarda yakıt sarfiyatının büyük bir bölümü yapı yükünden meydana gelmektedir. Dolayısıyla araç ağırlığını azaltma yakıt tasarrufuna oldukça ehemmiyetli bir katkı sağlamaktadır. Ayrıca yapıda oluşan hafifleme doğrudan çevreye salınan toksit içerikli egzoz gazlarını da azaltmaktadır. Hibrit ve elektrikli taşıtlarda ise düşük ağırlık enerji etkinliğinde kritik bir rol oynamaktadır. Bunların yanı sıra kütledeki hafifleme ivmelenme süresi, frenleme mesafesi ve manevra yeteneğine pozitif yansımaktadır (Eliezer vd., 1998, Friedrich ve Schumann 2001, Kelen 2014). Metalik malzemeler içerisinde magnezyum, polimerlerinkine yakın olan düşük yoğunluğu ile ün kazanmıştır. Magnezyumun

1 Dr. Öğretim Üyesi, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van Meslek Yüksekokulu, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, fkelen@yyu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-3900-4503.

ağırlığı araç yapımında oldukça sık tercih edilen demir ve çeliğin ağırlığının yaklaşık beşte birine, alüminyumun ağırlığının ise ortalama üçte ikisine denk gelmektedir. Dahası yüksek dayanım/ağırlık oranı, servis şartlarında oluşan titreşim ve gürültüyü soğurma kapasitesi ve yeniden kullanma özelliği gibi karakteristikleri magnezyumu eşsiz kılmaktadır. Bu niteliklerden dolayı ulaşım, savunma, yapı, elektronik, kimya, tıp ve diğer pek çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca yeni bir saha olarak adlandırılan şarj edilebilir pillerin imalatında da sarf edilmeye başlanmıştır. Fakat mukavemet ve süneklik gibi mekanik davranışlarda gözenen kalıtsal yetersizlikler ve korozyon dayanımındaki zayıf direnç endüstriyel uygulama sayılarını büyük ölçüde düşürmektedir. Bu sakıncaları gidermek ve kullanım hacimlerini artırmak amacı ile birçok alaşım grubu geliştirilmiştir. Alüminyum, çinko, mangan, nadir toprak elementleri ve silisyum gibi elementleri ihtiva eden alaşım sınıflarının ya yüksek sıcaklık özelliklerinin kötü olması ya da yüksek maliyetleri çok az tercih edilmelerine neden olmuştur. Diğer katışık unsurlarını içerenler ise beklentilerin son derece uzağında kalmıştır. Bu kapsamda yapılan çalışmalar yoğun olarak devam etmektedir (Luo vd., 1995, Kubota vd., 1999, Albright vd., 2002, Li 2004, Dobrzański vd., 2011). Öte taraftan farklı malzeme grupları denenerek kompozit malzeme yönteminden faydalanma yoluna gidilmiştir. Minimum iki türden meydana gelen mevcut yaklaşımda metalik, seramik ve polimer esaslı malzemeler güçlendirici olarak sarf edilmiştir.

Yapısal ve fonksiyonel özelliklerin iyileştirildiği yeni metotta magnezyum ve magnezyum esaslı malzemelerin zayıf yönlerini geliştirmede kullanılan takviye elemanlarına, aynı materyalin dahi mekanik davranışları üzerinde önemli değişikliğe neden olan üretim tekniklerine ve son olarak üstün nitelikleri ile geleneksel malzemelerle kıyaslanabilir düzeyde bir

seçenek oluşturup kullanıldıkları alanlara aşağıda detaylı olarak yer verilmiştir.

2. TAKVİYE MATERYALLERİ

Alaşım öğelerinin kullanımı ile bertaraf edilemeyen dezavantajlar farklı malzeme türlerinin üstün karakteristikleri ile ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır. İlk olarak parçacık veya elyaf şeklinde polimerlerin sarf edilmesi gündeme gelmiştir. Yüksek darbe direnci, mükemmel süneklik ve hafiflik gibi avantajlara karşın yüksek sıcaklıklarda kötü mukavemet, düşük geri dönüşüm oranı ve yüksek maliyet gibi dezavantajlar tüketimlerini ciddi miktarda kısıtlamıştır. Bu malzemelerin literatür çalışmalarında ya bizatihi ya da türevleri şeklinde kullanımları hala mevcuttur (Chelliah vd., 2017). Seramik kökenli malzemeler bol hammadde kaynakları, göreceli düşük yoğunlukları, yüksek dayançlı olmaları ve mükemmel korozyon mukavemeti gibi niteliklerinden dolayı takviye elemanı olarak oldukça yaygın tercih edilmiştir. Fakat iki malzeme özellikleri arasındaki büyük farklılıklar ciddi dezavantaj teşkil etmiştir. Metal esaslılar ise nispeten iyi karakteristiklerinin yanı sıra magnezyum ile benzer fiziksel davranışlar sergilemeleri nedeni ile yoğun bir şekilde kullanılmıştır. Takviye elemanlarının tekli ilavelerinde her ne kadar dayançta iyileşmeler gözlense de ya zayıf gerinim, ya yüksek porozite içeriği ya da oda sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda düşük mukavemet nihai malzeme özelliklerinin kötüleşmesine yol açmıştır. Bu sebeple takviye elemanlarının bir arada kullanımına gidilerek çoklu tüketimi benimsenmiştir. Hibrit yöntem olarak adlandırılan bu yeni metotta esas malzemenin dayanımı ile birlikte birim şekil değişiminin de geliştirilmesi amaçlanmıştır. Böylece magnezyum ve magnezyum esaslı malzemelerin mekanik özelliklerinin endüstriyel gereksinimleri kolaylıkla karşılayacak düzeye getirilebileceği öngörülmüştür. Matris malzemesinin kalıtsal yetersizliğini ortadan kaldırmak için karbür (SiC, B_4C, TiC, ZrC),

oksit (Al_2O_3, SiO_2, TiO_2, ZrO_2), borür (TiB_2, ZrB_2), nitrür (BN, AIN, TIN, ZrN) ve metal (Cu, Ti Ni, TiNi ve Ti+Ni (hibrit)) gibi faklı türdeki takviye materyalleri sıklıkla sarf edilmiştir.

2.1. Karbür Esaslı Güçlendiriciler

Magnezyum matrisli kompozitlerin dezavantajlarını iyileştirmede en çok tercih edilen güçlendirici grubu olan karbür esaslılar yüksek elastik modül, yüksek akma mukavemeti, yüksek çekme ve basma dayanımı ve mükemmel korozyon direnci gibi etkileyici karakteristiklere sahiptir. Tablo 1'de genel özellikleri verilen bu materyaller ile yapılan takviyelerde iyi dayanç elde edilmesine karşın birim şekil değişiminin kritik değerler altında kaldığı saptanmıştır. Bu kompozitlerin morfolojik analizlerinde matris güçlendirici arasında oluşan bağın yeterince iyi olmadığı, mikroyapıda istenmeyen sert ve kırılgan karakterdeki ikincil fazların yanı sıra gözenek ve mikro çatlakların yer aldığı belirlenmiştir. Ayrıca takviye partiküllerin yer yer topaklanarak heterojen bir dağılım sergiledikleri tespit edilmiştir. Bu olumsuzlukların sadece sünekliği değil aynı zamanda elastik modül, akma mukavemeti, çekme dayanımı vb. mekanik özellikleri de kötü etkilediği ifade edilmiştir (Poddar vd., 2007, Poddar vd., 2009, Trojanová vd., 2009, Wang vd., 2014, Esmaily vd., 2016, Kumar vd., 2022). Dolayısıyla karbür esaslı malzemeler ile yapılan takviyelerde zayıf süneklik ciddi bir dezavantaj teşkil etmiştir.

Tablo 1. Karbür esaslı takviye materyallerin genel özellikleri

Özellik	SiC	B_4C	TiC	ZrC
Erime Noktası (°C)	2300	2450	3140	3420
Yoğunluk ($g \cdot cm^{-3}$)	3.21	2.52	4.93	6.60
Isıl genleşme katsayısı ($10^{-6}K$)	5.00	6.00	7.40	6.70
Elastisite Modulü (GPa)	480	450	320	390
Isıl iletkenlik (W/mK)	59	29	29	19

Kaynak: Kainer 2003.

2.2. Oksit Esaslı Güçlendiriciler

Oksit esaslı güçlendiriciler üstün karakteristik niteliklerinden (Tablo 2) dolayı yaygın kullanıma sahiptir. Bu malzemeler ile yapılan takviyelerde ara yüzeyde meydana gelen ince oksit tabaka zayıf bağ oluşumuna yol açmaktadır. Ayrıca ikincil fazların varlığı ıslatabilirliği önemli derecede kötüleştirmektedir. Özellikle makro boyuttaki kullanımlarında düzensiz geometrik şekildeki güçlendirici parçacık uçları çatlak başlangıcı görevi görerek mikroyapıda gevrek kırılmalara neden olmaktadır. Fraktografi analizlerinde deformasyonun kaba ve iri takviye partiküllerde gerçekleştiği yükün güçlendirici faza etkin bir biçimde aktarılmadığı tespit edilmiştir. Bu nedenlerden dolayı nano ölçekte kullanımları tercih edilmiştir. Her ne kadar mikron altı boyutlardaki ilavelerinde nispeten yüksek elastik modül, yüksek akma mukavemeti, yüksek çekme dayanımı, yüksek sertlik ve aşınma direnci gibi iyi mekanik özelliklere ulaşılsa da morfolojik incelemelerde takviye fazın yüksek topaklanma eğilimi, heterojen dağılım ve toz karışım işlemlerinde yüksek maliyetli araç ve gereç gereksinimi ciddi bir dezavantaj oluşturmuştur (Hassan ve Gupta 2006, Habibnejad-Korayem vd., 2009, Zaid vd., 2020, Emadi vd., 2022). Diğer taraftan nano boyuttaki toz kullanımı kompozit malzeme üretim sürecini oldukça güçleştirmektedir.

Tablo 2. Oksit esaslı takviye materyallerin genel özellikleri

Özellik	Al_2O_3	SiO_2	TiO_2	ZrO_2
Erime Noktası (°C)	2050	1700	1870	2715
Yoğunluk ($g \cdot cm^{-3}$)	3.99	2.2	4.23	5.89
Isıl genleşme katsayısı ($10^{-6}K$)	8.30	0.55	9	5.5
Elastisite Modulü (GPa)	410	71.7	244	171
Isıl iletkenlik (W/mK)	25	1.4	8.4	6.53

Kaynak: (Kainer 2003, El-Mahallawi vd., 2015).

2.3. Borür Esaslı Güçlendiriciler

Metal bazlı borürler oksitlere kıyasla daha yüksek elektrik ve termal iletkenliğe sahiptir. Bu takviye elemanları ile yapılan güçlendirmelerde karbür esaslı olanlarınki kadar yüksek dayanım değerlerine ulaşılmamasına rağmen süneklikte aksi bir durum gözlenmiştir. Borür materyal ilavelerinde dayanımın gelişmesine karşın ara yüzeyde oluşan nispeten iyi bir bağın sonucu süneklikte ciddi bir azalmanın meydana gelmediği ifade edilmiştir. Bu durum matris malzemesi ile aynı kristal yapıya sahip olmalarına atfedilmiştir. Zira hekzagonal kristal yapı matris ile güçlendirici arasında ıslatabilirliği iyileştirerek birim şekil değişiminde teşekkül eden düşüşün sınırlı olmasını sağlamaktadır. Ayrıca kompozitlerin kırılma yüzeylerinde yapılan mikroskobik incelemelerde sünek davranış izleri ile karşılaşılmıştır. Fakat artan güçlendirici içeriklerinde sünekliğin olumsuz etkilendiği ve arayüzey bağının zayıfladığı görülmüştür. Yüksek takviye ilavesi kırılma birim şekil değişiminin yanı sıra aşınma direnci ve sürtünme mukavemeti gibi özelliklerin düşmesine yol açarak mekanik karakteristiklerin kötüleşmesine neden olmuştur (Ren vd., 2010, Borovinskaya vd., 2017, Venkatesan vd., 2024). Magnezyum matrisli kompozitlerin kötü mekanik özelliklerini iyileştirmede yaygın olarak sarf edilen metal esaslı borürlerin genel özellikleri Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. Borür esaslı takviye materyallerin genel özellikleri

Özellik	TiB_2	ZrB_2
Erime Noktası (°C)	3225	3040
Yoğunluk ($g \cdot cm^{-3}$)	4.52	6.08
Isıl genleşme katsayısı ($10^{-6}K$)	6.4 – 9.2	5.9
Elastisite Modulü (GPa)	560	451
Isıl iletkenlik (W/mK)	60 - 120	24.27

Kaynak: (Munro 2000, Stadelmann 2013).

2.4. Nitrür Esaslı Güçlendiriciler

Yüksek ısıl iletkenlik, mükemmel elektriksel direnç, yüksek termal kararlılık, iyi sürünme ve yorulma dayanımı, yüksek sertlik, mükemmel kimyasal stabilite ve iyi korozyon direnci gibi nitelikleri ihtiva eden nitrür esaslı güçlendiriciler magnezyum matrisli kompozitlerde nispeten nadir kullanıma sahiptir. Bu malzemeler ile yapılan iyileştirmelerde matris ile takviye materyali arasında kimyasal reaksiyonların meydana gelmediği ifade edilmiştir. Morfolojik incelemelerde gözeneksiz ve düzgün bir dağılım içeren mikroyapı husulünün gerçekleştiği gözlenmiştir. Ayrıca kompozit malzemelerin aşınma ve sürünme dirençlerinin geliştiği artan takviye miktarlarında ise daha yüksek dayanım sergiledikleri belirlenmiştir. Fakat mekanik testlerde saptanan düşük kırılma enerji soğurma kapasiteleri kırılma birim şekil değişimini kötü etkilemesinin yanı sıra mekanik özelliklerde de sınırlı gelişime neden olmuştur (Paramsothy vd., 2013, Zhang vd., 2018, Kumar vd., 2024). Tablo 4'te genel özellikleri verilen takviye materyalleri ile nispeten yüksek mekanik değerler elde edilmesine karşın nihai kompozit karakteristiklerinin istenilen düzeyde olmadığı ifade edilmiştir. Dolayısıyla hibrit kullanım yoluna gidilerek farklı türdeki güçlendiriciler ile bir arada sarf edilmeleri denenmiştir. Böylece final malzeme özelliklerinde daha yüksek değerlere ulaşılması hedeflenmiştir.

Tablo 4. Nitrür esaslı takviye materyallerin genel özellikleri

Özellik	BN	AIN	TIN	ZrN
Erime Noktası (°C)	2973	2500	2930	2952
Yoğunluk ($g \cdot cm^{-3}$)	2.25	3.26	5.22	7.09
Isıl genleşme katsayısı ($10^{-6}K$)	7.5	5.5	9.35	7.24
Elastisite Modulü (GPa)	90	350	251	374
Isıl iletkenlik (W/mK)	10	1.4	67.8	20

Kaynak: (Hedenqvist 1988, Friedrich 2006).

2.5. Metal Esaslı Güçlendiriciler

Metal bazlı takviye elemanları yüksek elastik modül, yüksek erime sıcaklığı, mükemmel korozyon direnci, yüksek tokluk, iyi yorulma ve sürtünme mukavemeti, yüksek akma dayanımı gibi üstün özelliklerinin yanı sıra matris malzeme ile benzer fiziksel nitelikleri ile dikkat çekmektedir. Bu avantaj diğer takviye materyallerine kıyasla yüksek dayanım ile birlikte süneklikte de iyileşme sağlamaktadır. Takviye parçacıkların matris içerisinde homojen dağılım sergilemesi, gözeneksiz bir mikroyapı, ara yüzeyde istenmeyen sert ve kırılgan ikincil fazların bulunmaması mukavemet ile birlikte birim şekil değişimini de geliştirmiştir. Dahası artan güçlendirici oranlarında gerinimdeki düşüşün sınırlı gerçekleştiği ifade edilmiştir. Metalik bazlı takviyeler bu sebeplerden dolayı yaygın kullanıma sahiptir (Kelen vd., 2018, Kelen 2023a, 2023b). Tablo 5'te karakteristik özellikleri verilen bu malzemelerin göreceli yüksek yoğunlukları ciddi bir dezavantaj olarak değerlendirilmektedir. Zira matrisi diğer yapısal malzemelerden ayıran en önemli faktör düşük öz kütlesidir. Dolayısıyla bu malzemelerin kullanımında hafiflik kritik bir parametre teşkil etmektedir. Fakat magnezyumun zayıf mekanik özelliklerini geliştirmede oldukça sık tercih edilen bu materyallerin düşük kullanım oranları ile sarf edilmesi bu sakıncayı giderebilir.

Tablo 5. Metal esaslı takviye materyallerin genel özellikleri

Özellik	Cu	Ti	Ni	TiNi
Erime Noktası (°C)	1085	1668	1455	1310
Yoğunluk ($g \cdot cm^{-3}$)	8.96	4.5	8.9	6.45
Isıl genleşme katsayısı ($10^{-6}K$)	16.64	9.68	12.83	6.6-11
Elastisite Modulü (GPa)	128	116	200	75-83
Isıl iletkenlik (W/mK)	401	2.9	90.9	10-18

Kaynak: (Friedrich 2006, Rao vd., 2015).

3. ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Magnezyum matrisli kompozit malzemelerin üretiminde seçilecek yöntem nihai karakteristik özellikler dikkate alınarak saptanır. Kompozitin mikroyapı ve mekanik davranışı üzerinde önemli etkiye sahip imalat tekniği ürünün boyutsal özellikleri, servis koşullarında maruz kalacağı sıcaklık ve gerilmeler, takviye materyalinin geometrik yapısı, matris ile takviye arasındaki uyum, üretim sonrası ikincil işlem gereksinimleri, ara yüzeyde meydana gelebilecek muhtemel kimyasal reaksiyonlar, takviye fazın morfolojideki, topaklanma, heterojen veya düzgün bir dağılım sergileme eğilimi, gözenek ve mikro çatlak teşekkülü, matris ile güçlendirici arasında yeteri ıslatılabilirliğin oluşarak güçlü ve temiz bir arayüzey oluşumu gibi kriterlere bağlı olarak belirlenir. Ayrıca üretim giderleri de bağlayıcı diğer bir faktördür (Czerwinski 2008, Suresh 2013). Uygulamada düşük, orta ve yüksek maliyetli olarak nitelendirilebilecek toz metalürjisi, difüzyonla bağlama, sıvı metal infiltrasyonu, sıkıştırmalı döküm, püskürtme ve kompo döküm gibi birçok farklı metot bulunmaktadır. Bunlar içerisinde infiltrasyon (sızdırma), toz metalürjisi, karıştırmalı döküm ve difüzyonla bağlama sırası ile en çok tercih edilenler arasındadır. Bu yöntemler genellikle levha, mil, valf, piston, sökülebilir bağlantı elemanları, rot, silindir üst kapağı, kesme ve taşlama gereçleri gibi otomotiv, uzay, spor ve endüstriyel ekipman ve aksamların imalatında kullanılmaktadır. Magnezyum matrisli kompozitlerin üretiminde yaygın olarak tercih edilen bu yöntemler genel olarak katı ve sıvı faz üretim teknikleri olarak iki ana grupta incelenmektedir. Katı faz üretim yöntemleri toz metalürjisi ve difüzyonla bağlama metotlarından oluşur iken sıvı faz üretim yöntemleri ise sıvı metal infiltrasyonu, sıkıştırmalı döküm, sıvı metal karıştırma ve plazma püskürtme metotlarından meydana gelmektedir. Bu imalat tekniklerinin üstün yönlerine ve dezavantajlarına aşağıda detaylı olarak değinilmiştir.

3.1. Katı Faz Üretim Teknikleri

Katı faz üretim tekniklerinden toz metalürjisi yönteminde matris ve takviye malzemeler nano veya mikro boyutlardaki parçacıklar şeklinde belirli oran ve miktarlarda birbiri içerisine katılarak çeşitli süre ve sıcaklıklarda sinterlenmektedir. Bu metotta genellikle kontrollü bir atmosferde gerçekleştirilen üretimlerde, düşük proses sıcaklığı, döküm yöntemlerine kıyasla takviye tozlarda düşük deformasyon miktarı, homojen bir mikroyapı teşekkülü, matris güçlendirici arasında zayıf kimyasal tepkime eğilimi ve ikincil fazlardan yoksun morfoloji yaygın olarak kullanımını sağlamaktadır. Ayrıca toz metalürjisi tekniği birçok farklı malzeme grubuna uygulana bilmektedir. Diğer taraftan imalat sonrası elde edilen yüksek boyutsal doğruluk ve düzgün yüzey ikincil yöntemlere olan gereksinimi azaltmaktadır. Dolayısıyla bu durum üretim yöntemini ekonomik kılmaktadır. Fakat bu teknikte kullanılan matris ve takviye materyallerin toz halinde sarf edilmesi büyük bir dezavantaj oluşturmaktadır. Dahası tozları karıştırma işleminde karşılaşılan zorluk ve tehlike diğer sakıncalardır. Bu dezavantajlara karşın toz metalürjisi ile yüksek mekanik özelliklere sahip modern malzemeler elde edilebilmektedir. Magnezyum matrisli kompozit malzemelerin yanı sıra alüminyum, titanyum, bakır ve bunların alaşımlı kompozitlerinin üretiminde de oldukça sık tercih edilmektedir. Bu yöntem takviye materyali olarak her ne kadar geniş bir tercih spektrumu sağlasa da karbür esaslılar yaygın bir biçimde kullanılmaktadır (Chang ve Zhao 2013, Angelo vd., 2022). Difüzyonla bağlama yönteminde ise takviye materyal istenilen yön ve oranlarda metal tabaka üzerine nüfus ettirilerek erime sıcaklığına yakın sıcaklıklarda presleme veya haddeleme ile ara yüzeyde bağ oluşturulmaktadır. Ancak yöntem ekonomik olmaktan çok uzak olduğundan nadir olarak kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra metot oldukça kısıtlı malzeme sınıfına uygulanabilmektedir.

3.2. Sıvı Faz Üretim Teknikleri

İmalat süreçlerinde yaygın olarak kullanılan sıvı faz yöntemleri ile kompleks ve karmaşık geometrik yapılı parçalar üretilebilmektedir. Bu metotlarda matris malzeme ergime sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda belirli bir şekle sahip kalıp içerisine ya dökülerek soğumaya bırakılmakta ya kuvvet yardımı ile nüfus ettirilerek basınç altında katılaşması sağlanmakta ya da atomize halde takviye parçacıklarına püskürtülmesi vasıtası ile üretim yapılmaktadır. Sıvı faz imalatlarda gözeneksiz bir mikro yapı oluşumu ve matris ile takviye arasında güçlü bir bağ teşekkülü elde etmek amacıyla güçlendirici partiküller preform olarak nitelendirilen bir yapı içerisinde belli açı ve doğrultularda yönlendirildikten sonra ön ısıtmaya tabi tutulmaktadır. Diğer taraftan sıkıştırmalı döküm gibi bazı tekniklerde eriyik metalin ıslatabilirlik kabiliyetini geliştirmek için içerisine katışık elemanları ilave edilmektedir. Ayrıca bu yöntemlerde imalat inert ortamlarda gerçekleştirilerek oksitlenme ve benzeri kirlenme riskleri en aza indirgenmektedir. Bu metotların ekonomik ve seri üretime uygun olması önemli avantaj sağlamaktadır. Dahası son malzeme formuna yakın şekil imkânı diğer bir üstün özellik olarak ön plana çıkmaktadır (Bratukhin ve Bogolyubov 1994, Balasubramanian 2014, Gay 2022). Fakat takviye fazda ısıtma sırasında oluşan deformasyon, yüksek topaklanma eğilimi, morfolojideki heterojen dağılım, gaz sıkışmasından kaynaklanan gözenek teşekkülü, matris ile güçlendirici arasında meydana gelen kimyasal tepkimeler başlıca dezavantajlar olarak dikkat çekmektedir. Ayrıca bu yöntemlerde eriyik haldeki matrisin ıslatabilirlik yeteneği, takviye parçacıkların şekli, boyutu, miktarı, kimyasal afinitesi, üretim şartları, sıcaklık ve süre gibi parametreler proses sürecini doğrudan etkilemektedir. Diğer taraftan bu metotlardan püskürtme yöntemleri ile yapılan imalatlarda zayıf ara yüzey

bağı ve üretim maliyetlerinin pahalılığı ciddi bir sorun oluşturmaktadır.

4. KULLANIM ALANLARI

4.1. Tıp

Magnezyum ve alaşımları biyouyumluluk özelliklerinden dolayı tıbbi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu karakteristikleri ile doku yenilenmesi ve fonksiyonel işlevlerin tekrardan kazanılması için gerekli olan geçici tıbbi gereçlerin üretimlerini mümkün kılmaktadır. Genellikle stent, kemik veya ortopedik implantlar ve mikro klipslerin yapımında tercih edilerek vücut içerisinde oluşabilecek tahriş, inflamasyon ve toksisite tehlikesi bertaraf edilmektedir. Kırılma tokluğu hidroksiapatit gibi seramik esaslı biyomalzemelere kıyasla daha yüksektir. Ayrıca elastisite modülü ve akma mukavemeti bu uygulamalarda kullanılan materyallere göre doğal kemiğinkine daha yakındır. Diğer taraftan magnezyum esaslı implantlar, çelik ve titanyum bazlı geleneksel implantlara nazaran daha ekonomiktir. Fakat yüksek kimyasal reaktivite ve düşük korozyon direnci ciddi bir dezavantaj oluşturmaktadır (Witte 2013).

4.2. Havacılık

Spesifik karakteristikleri nedeni ile havacılıkta oldukça sık tercih edilen magnezyum ve alaşımlarının Boeing 727 jet uçağında yaklaşık 1200 adet uygulaması bulunmaktadır. Bu hava aracında kapılar, kokpit panelleri ve dümen aksamları tamamen magnezyum esaslı malzemelerden imal edilmektedir. Ayrıca farklı üretim teknikleri ile elde edilen sac, levha, dövme, ekstrüzyon ve boru şeklinde askeri uçakların gövdesi, kanat kaplamaları, gövde panelleri, kompresör kutusu, dişli muhafazaları, braketler, iniş takımı aksamları, çerçeve

bileşenleri gibi parçalarda kullanımları mevcuttur. Ancak bunların yüksek sıcaklık dayanımlarının kötü olması tüketim miktarlarını oldukça kısıtlamaktadır (Sillekens 2014, Dziubińska vd., 2016, Mathaudhu ve Nyberg 2016).

4.3. Otomotiv

Yakıt sarfiyatı ve zararlı egzoz bileşenlerinin asgari düzeye indirgenmesinde oldukça önemli rol oynayan magnezyum ve alaşımlarının otomotiv endüstrisinde birçok uygulaması vardır. Taşıtların iç donanım, karoseri, şasi, güç aktarma organları ve araç ön alanı gibi temel bileşenlerinin imalatında kullanımları bulunmaktadır. Araç ağırlığını azaltmada kritik bir faktör olan bu malzemelerin otomotiv parçalarındaki uygulama sayısı her geçen gün artmaktadır. Genellikle yüksek yük ve sıcaklıklara maruz kalmayan direksiyon sistemi parçaları, gösterge aksamları, fren braketleri, koltuk çerçeveleri, yakıt deposu kapağı ve torpido gözü gibi bileşenler magnezyum ve alaşımlarından üretilmektedir. Ancak bu malzemelerin zayıf mekanik özellikleri tüketim oranlarını büyük ölçüde engellemektedir. Dezavantajları sadece otomotiv kullanımlarını değil aynı zamanda diğer birçok alandaki sarfiyatlarını da düşürmektedir (Mordike ve Ebert 2001, Blawert vd., 2004). Dolayısıyla magnezyum ve alaşımlarının yetersiz karakteristiklerinin iyileştirilmesi hayati önem kesbetmektedir. Zira bu malzemeler hafiflikleri ile yapı yükünü azaltarak enerji verimliliğine son derece kritik bir katkı sağlamaktadır.

4.4. Diğer

Magnezyum ve alaşımlarının tıp, havacılık ve otomotiv gibi sektörlerin dışında bilgisayar, elektronik, haberleşme, spor, hidrojen depolama, inşaat ve endüstriyel aletler gibi farklı alanlarda pek çok uygulamaları bulunmaktadır. Bu malzemeler taşınabilir bilgisayarların kasaları, cep telefonları, kamera, şarj edilebilir piller, yakıt hücreleri ve batarya gibi parçaların

imalatında yaygın olarak kullanılmakladır. Diğer taraftan yüksek dayanç, hafiflik ve kolay tasarımlarından dolayı döküm esaslılar inşaat dalındaki gereçlerde tercih edilmektedir. Bu malzemelerin endüstrideki tüketimleri sürekli yükselme eğilimindedir.

5. SONUÇ

Enerji verimliliği hammadde kaynaklarının ekonomik kullanımı açısından oldukça kritik önem arz etmektedir. Zira doğal rezervler sürdürülebilir bir yaşamın temelini oluşturmaktadır. Bu nedenlerden dolayı etkin kullanımları elzemdir. Endüstriyel uygulamalarda doğru tasarım tercihleri ile enerji sarfiyatı en aza indirgenebilir. Ayrıca ergonomik yaklaşımlar ile konstrüksiyon yükü azaltılabilir. Böylece modern yapılar ile enerji ekonomisi geliştirilebilir. Petrol menşeli yakıtların büyük bir bölümü içten yanmalı motorlarda sarf edilmektedir. Bu ürünlerin sınırlı menbaları ve yanmadan sonra açığa çıkan toksit özellikteki egzoz bileşenleri otomotiv endüstrisini kaçınılmaz olarak yeni temalara yönlendirmiştir. Bu bağlamada yapılan ar-ge çalışmaları taşıt ağırlığına odaklanmıştır. Lakin yakıt tüketiminin artan araç ağırlığı ile doğrusal olarak arttığı saptanmıştır. Taşıt kütlesinde meydana gelen hafifleme yakıt tasarrufuna doğrudan katkı sağlamaktadır. Bu nedenle otomotiv aksamlarının imalatında düşük yoğunluklu malzeme kullanımı ile hem yakıt sarfiyatı hem de emisyon salınımı minimum seviyelere çekilebilir. Yapısal malzemeler içerisinde magnezyum ve alaşımları plastiklerinkine yakın yoğunlukları ile dikkat çekmektedir. Ayrıca yüksek dayanım/ağırlık oranı, mükemmel absorbsiyon yeteneği ve tekrardan kullanma özelliği gibi nitelikler bu malzemeleri eşsiz kılmaktadır. Fakat düşük elastisite modülü, yetersiz akma mukavemeti, zayıf süneklik ve kötü korozyon ve sürünme direnci gibi kalıtsal dezavantajları gerek otomotiv gerekse de hafifliğin etken olduğu diğer

endüstrilerde tüketimlerini ciddi oranda engellemektedir. Magnezyum esaslı malzemelerin sakıncaları ya alaşımlama ya da kompozit malzeme yöntemi ile ortadan kaldırılması gerekmektedir. Özellikle dayanç ve süneklik üzerinde olumlu etkiye sahip takviye materyallerinin bir arada kullanımı ile mekanik karakteristikler geliştirilip otomotiv ve endüstriyel uygulama sayıları artırılmalıdır.

Örnektir

6. KAYNAKÇA

Albright, D. L., Bergeron, F., Neelameggham, R., & Luo, A. (2002). Magnesium Technology 2002, part II: Wrought products, alloy processing R&D strategies, corrosion, welding. JOM, 54(8), 22.

Angelo, P. C., Subramanian, R., & Ravisankar, B. (2022). Powder metallurgy: science, technology and applications. PHI Learning Pvt. Ltd..

Balasubramanian, M. (2014). *Composite materials and processing* (Vol. 711). Boca Raton: CRC press.

Blawert, C., Hort, N., & Kainer, K. U. (2004). Automotive applications of magnesium and its alloys. Trans. Indian Inst. Met, 57(4), 397-408.

Borovinskaya, I. P., Gromov, A. A., Levashov, E. A., Maksimov, Y. M., Mukasyan, A. S., & Rogachev, A. S. (Eds.). (2017). Concise encyclopedia of self-propagating high-temperature synthesis: History, theory, technology, and products. Elsevier.

Bratukhin, A. G., & Bogolyubov, V. S. (Eds.). (1994). Composite manufacturing technology (Vol. 1). Springer Science & Business Media.

Chang, I., & Zhao, Y. (Eds.). (2013). Advances in powder metallurgy: properties, processing and applications. Elsevier.

Chelliah, N. M., Singh, H., Raj, R., & Surappa, M. K. (2017). Processing, microstructural evolution and strength properties of in-situ magnesium matrix composites containing nano-sized polymer derived SiCNO particles. Materials Science and Engineering: A, 685, 429-438.

Önekur

Czerwinski, F. (2008). Magnesium injection molding (pp. 1-79). New York, NY, USA, Springer.

Dobrzański, L. A., Tański, T., Malara, S., Król, M., & Domagała-Dubiel, J. (2011). Contemporary forming methods of the structure and properties of cast magnesium alloys. Magnesium Alloys-Design, Processing and Proper-ties. Rijeka: InTech, 321-350.

Dziubińska, A., Gontarz, A., Dziubiński, M., & Barszcz, M. (2016). The forming of magnesium alloy forgings for aircraft and automotive applications. Advances in Science and Technology. Research Journal, 10(31).

Eliezer, D., Aghion, E., & Froes, F. H. (1998). Magnesium science, technology and applications. Advanced Performance Materials, 5, 201-212.

El-Mahallawi, I. S., Shash, A. Y., & Amer, A. E. (2015). Nanoreinforced cast Al-Si alloys with Al2O3, TiO2 and ZrO2 nanoparticles. Metals, 5(2), 802-821.

Emadi, P., Andilab, B., & Ravindran, C. (2022). Processing and properties of magnesium-based composites reinforced with low levels of Al2O3. International Journal of Metalcasting, 16(4), 1680-1692.

Esmaily, M., Mortazavi, N., Svensson, J. E., Halvarsson, M., Wessén, M., Johansson, L. G., & Jarfors, A. E. (2016). A new semi-solid casting technique for fabricating SiC-reinforced Mg alloys matrix composites. Composites Part B: Engineering, 94, 176-189.

Friedrich, H. E. (2006). Magnesium Technology.

Friedrich, H., & Schumann, S. (2001). Research for a “new age of magnesium” in the automotive industry. Journal of Materials Processing Technology, 117(3), 276-281.

örnek

Gay, D. (2022). Composite materials: design and applications. CRC press.

Habibnejad-Korayem, M., Mahmudi, R., & Poole, W. J. (2009). Enhanced properties of Mg-based nano-composites reinforced with Al2O3 nano-particles. Materials Science and Engineering: A, 519(1-2), 198-203.

Hassan, S. F., & Gupta, M. (2006). Effect of particulate size of Al2O3 reinforcement on microstructure and mechanical behavior of solidification processed elemental Mg. Journal of alloys and compounds, 419(1-2), 84-90.

Hedenqvist, P. (1988). Wear mechanisms of high speed steel and the effect of TiN-coating on wear resistance.

Kainer, K. U. (Ed.). (2003). Magnesium alloys and technology. John Wiley & Sons.

Kelen, F. (2014). Motorlu taşıt emisyonlarının insan sağlığı ve çevre üzerine etkileri. Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 19(1-2), 80-87.

Kelen, F. (2023a). Fabrication, microstructure and mechanical properties of novel titanium and nickel micro-particulates reinforced AZ91D magnesium alloy metal matrix hybrid composites. Journal of Alloys and Compounds, 968, 171999.

Kelen, F. (2023b). Novel magnesium matrix hybrid composites manufactured through powder metallurgy technique. Materials Today Communications, 35, 106348.

Kelen, F., Gavgali, M., & Aydogmus, T. (2018). Microstructure and mechanical properties of a novel TiNi particulate reinforced AZ91 metal matrix composite. Materials Letters, 233, 12-15.

Örnekir

Kubota, K., Mabuchi, M., & Higashi, K. (1999). Review processing and mechanical properties of fine-grained magnesium alloys. Journal of Materials Science, 34, 2255-2262.

Kumar, A., Kumar, S., Mukhopadhyay, N. K., Yadav, A., & Sinha, D. K. (2022). Effect of TiC reinforcement on mechanical and wear properties of AZ91 matrix composites. International Journal of Metalcasting, 16(4), 2128-2143.

Kumar, T. S., Thankachan, T., Bhowmik, A., Makki, E., Giri, J., & Das, S. (2024). Development and characterization of AZ91/AlN magnesium matrix composites via friction stir processing. AIP Advances, 14(6).

Li, Y. Y. (2004). The present and future of the magnesium alloy researches. China Foundry, 1-6.

Luo, A., Renaud, J., Nakatsugawa, I., & Plourde, J. (1995). Magnesium castings for automotive applications. Jom, 47(7), 28-31.

Mathaudhu, S. N. & Nyberg, E. A. (2016). Magnesium alloys in US military applications: past, current and future solutions. Essential readings in magnesium technology, 71-76.

Mordike, B. L., Ebert, T. (2001). Magnesium: properties—applications—potential. Materials Science and Engineering: A, 302(1), 37-45.

Munro, R. G. (2000). Material properties of titanium diboride. Journal of Research of the National institute of standards and Technology, 105(5), 709.

Paramsothy, M., Chan, J., Kwok, R., & Gupta, M. (2013). Nitride nanoparticle addition to beneficially reinforce hybrid magnesium alloys. Metallurgical and Materials Transactions A, 44, 1123-1138.

Poddar, P., Mukherjee, S., & Sahoo, K. L. (2009). The microstructure and mechanical properties of SiC reinforced magnesium based composites by rheocasting process. Journal of materials engineering and performance, 18, 849-855.

Poddar, P., Srivastava, V. C., De, P. K., & Sahoo, K. L. (2007). Processing and mechanical properties of SiC reinforced cast magnesium matrix composites by stir casting process. Materials Science and Engineering: A, 460, 357-364.

Rao, A., Srinivasa, A. R., & Reddy, J. N. (2015). Design of shape memory alloy (SMA) actuators (Vol. 3). Cham: Springer International Publishing.

Ren, Z., Zhang, X. G., Sui, L., Zhang, T., Pang, L., & Jin, J. Z. (2010). Fabrication of ZrB2 particles reinforced AZ31 magnesium matrix composite by powder metallurgy and subsequent hot extrusion. Materials Research Innovations, 14(3), 206-209.

Sillekens, W. H. (2014). Magnesium Alloys In US Military Applications: Past, Current and Future Solutions. Essential Readings in Magnesium Technology, 71.

Stadelmann, R. (2013). Mechanical properties and thermal residual stresses of ZrB2-SiC ceramic composites for hypersonic vehicle applications.

Suresh, S. (Ed.). (2013). Fundamentals of metal-matrix composites. Elsevier.

Trojanová, Z., Gärtnerová, V., Jäger, A., Námešný, A., Chalupová, M., Palček, P., & Lukáč, P. (2009). Mechanical and fracture properties of an AZ91 Magnesium alloy reinforced by Si and SiC particles. Composites Science and technology, 69(13), 2256-2264.

Venkatesan, R., Harikrishna, K. L., & Sivashanmugam, N. (2024). Microstructure and mechanical properties of friction stir welded AZ31 magnesium alloy reinforced with ZrB2. Materials Research Express, 11(4), 046517.

Wang, X. J., Wang, N. Z., Wang, L. Y., Hu, X. S., Wu, K., Wang, Y. Q., & Huang, Y. D. (2014). Processing, microstructure and mechanical properties of micro-SiC particles reinforced magnesium matrix composites fabricated by stir casting assisted by ultrasonic treatment processing. Materials & Design, 57, 638-645.

Witte, F. (2013). Applications: use of magnesium in medical applications. Fundamentals of Magnesium Alloy Metallurgy, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK, 342.

Zaid, H. M. A., Abed, A. R. N., & Hasan, H. S. (2020). Improvement of mechanical properties of magnesium (Mg) matrix composites reinforced with nano alumina (Al2O3) particles. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 671, No. 1, p. 012162). IOP Publishing.

Zhang, B., Yang, C., Zhao, D., Sun, Y., Wang, X., & Liu, F. (2018). Microstructure characteristics and enhanced tensile properties of in-situ AlN/AZ91 composites prepared by liquid nitriding method. Materials Science and Engineering: A, 725, 207-214.

LINEAR ACTUATORS UTILIZING SHAPE MEMORY MATERIALS[1]

Feyza Nisan KAĞNICI[2]

Emre ARABACI[3]

1. INTRODUCTION

Shape memory materials (SMMs) have emerged as future materials in the fields of engineering and materials science by revolutionizing the discipline with their ability to dynamically respond to external stimuli and recover predetermined shapes. These materials can undergo shape changes and self-recovery through complex physical mechanisms such as thermal expansion, phase transformations, and energy storage. The remarkable potential of SMMs in smart structures and systems has extended their application spectrum to a wide range of fields, including aerospace, biomedical technologies, automotive industries, and robotics systems (Otsuka and Ren, 1999; Jani et al., 2014; Wayman, 1993).

The history of shape memory materials dates back to the 1930s when the phenomenon was first observed in gold-cadmium (Au-Cd) and copper-zinc (Cu-Zn) alloys. However, due to their limited mechanical properties, these materials were not considered viable solutions for commercial applications. The

1 This study was supported as a project under the TÜBİTAK 2209-A "University Students Research Projects Support Program" in the 2022/2 call period.

2 Undergraduate Student, Pamukkale University, Faculty of Technology, Department of Automotive Engineering, Pamukkale/Denizli, nsnkagnc@gmail.com, ORCID: 0009-0005-6137-828X.

3 Assoc. Prof. Dr., Pamukkale University, Faculty of Technology, Department of Automotive Engineering, Pamukkale/Denizli, earabaci@pau.edu.tr, ORCID: 0000-0002-6219-7246.

discovery of nickel-titanium (NiTi) alloy in the 1960s marked a turning point in the development of modern SMMs. Developed by engineers at the Naval Ordnance Laboratory, this alloy, later named "Nitinol," revolutionized SMM research with its superior mechanical properties, exceptional shape memory capability, and superelastic behavior (Otsuka and Kakeshita, 2002; Lobo et al., 2015; Fremond and Miyazaki, 2014) (Figure 1).

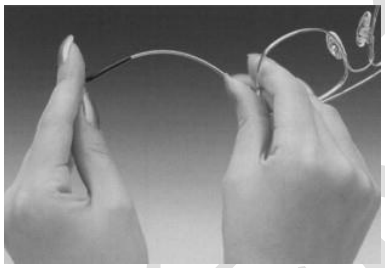


Figure 1. Superelastic eyeglass temple

Reference: Yamauchi et al., 2011.

During the 1970s and 1980s, the properties of Nitinol and other shape memory alloys were extensively studied, confirming their suitability for engineering applications. Particularly in the biomedical field, applications such as stents and orthodontic wires demonstrated the true potential of these materials. Concurrently, research on shape memory polymers (SMPs) began, revealing their advantages as lightweight, flexible, and cost-effective alternatives (Machado and Savi, 2003; Lexcellent, 2013; Kumar and Lagoudas, 2008; Petrini and Migliavacca, 2011).

From the 1990s onward, SMM technology advanced rapidly, expanding beyond metal alloys to include polymers, ceramics, and composite materials. During this period, the application of SMMs in microelectronics, spacecraft, and adaptive mechanisms increased, and materials sensitive to

magnetic and electric fields were developed. Today, SMMs are widely used in various fields, including impact absorbers and energy management systems in the automotive sector, deployable satellite antennas in space exploration, and specialized biomedical devices in medicine (Otsuka and Wayman, 1999; Kumar and Lagoudas, 2008).

This historical development has established shape memory materials as a significant research area in both fundamental science and engineering. The ability of SMMs to provide innovative solutions has enabled their integration into numerous sectors. SMMs are considered a continuously evolving class of materials closely aligned with modern technology, expected to have an even broader range of applications in the future (Van Humbeeck, 2001; Kumar and Lagoudas, 2008; Otsuka and Kakeshita, 2002).

Shape memory materials (SMMs) are categorized into different types based on their structure and working principles. These types are optimized to meet specific engineering and design requirements, each offering distinct advantages and disadvantages. The most commonly used SMMs include shape memory alloys (SMAs), shape memory polymers (SMPs), and other classes of smart materials (Lendlein and Kelch, 2007; Hager et al., 2015; Holman et al., 2021; Ghosh et al., 2013).

Shape Memory Alloys (SMAs) are metal-based materials distinguished by their shape memory and superelastic properties. Among the most popular SMAs is the nickel-titanium (NiTi) alloy, which is widely preferred for its exceptional shape recovery, high flexibility, and biocompatibility. The thermal shape memory of NiTi is achieved through phase transformations between martensite and austenite phases, enabling the material to return to its original shape. Superelastic behavior, on the other hand, allows the material to undergo

significant deformation and recover its original shape without plastic deformation (Parlinski and Parlinska, 2002; Plummer et al., 2022; Zupanc et al., 2018).

Other SMAs include copper-based alloys, such as Cu-Al-Ni and Cu-Zn-Al. While these alloys offer cost advantages, they do not match the high performance of NiTi. SMAs are commonly used in biomedical devices, adaptive structures, aerospace, and automotive industries (Dar et al., 2016; Segui et al., 1990).

Shape Memory Polymers (SMPs), in contrast, are lighter, more flexible, and cost-effective compared to metal alloys. These polymers, classified as thermoplastic or thermoset, respond to environmental stimuli such as heat, light, electric fields, or humidity to change their shape. Due to their ability to tolerate very high levels of deformation, SMPs provide solutions tailored to diverse design requirements. They are particularly popular in wearable technology, flexible electronics, and medical devices (Behl and Lendlein, 2007; Hager et al., 2015).

One of the most notable advantages of SMPs is their ease of processing and compatibility with manufacturing processes. However, their mechanical strength and shape recovery speeds are more limited compared to SMAs. Thus, SMPs are typically suitable for applications requiring low load-bearing capacities (Ehrmann and Ehrmann, 2021; Pilate et al., 2016).

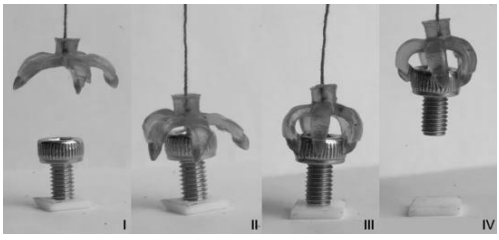


Figure 2. Shape memory polymer.
Reference: Ge et al., 2016.

Magnetostrictive and electroactive materials are sensitive to magnetic or electrical stimuli, making them valuable for use in sensor and actuator designs. Magnetostrictive materials can change shape under the influence of a magnetic field and are employed in applications requiring high precision. Electroactive materials, on the other hand, respond to electric fields by altering their shape and are commonly used in microelectronic devices (Olabi and Grunwald, 2008; Calkins et al., 2007) (Figure 3).

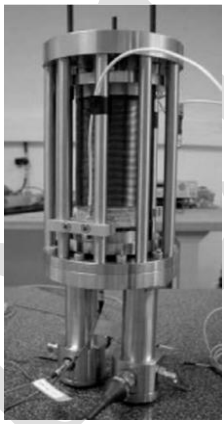


Figure 3. Magnetostrictive actuator.

Reference: Cedrat Technologies, 2020.

In recent years, shape memory ceramics and composites have become integral to innovative research in this field. Shape memory ceramics offer exceptional thermal resistance in high-temperature applications and can operate under extremely harsh environmental conditions. However, their brittleness limits their mechanical durability. Composite materials combine the properties of different types of shape memory materials, offering a broader range of applications. For instance, hybrid material solutions have been developed by integrating the flexibility of shape memory polymers (SMPs) with the mechanical strength

of shape memory alloys (SMAs) (Lai et al., 2013; Erb et al., 2023; Zheng et al., 2024).

Different types of shape memory materials provide a wide range of solutions to the engineering and scientific communities. Each type possesses optimized characteristics tailored to its application area and performance requirements. In the future, more efficient and cost-effective production of these materials is expected to lead to the discovery of new applications across various industries.

The fundamental working mechanisms of shape memory materials (SMMs) are based on transformations within the material's crystal structure and its responses to external stimuli. These mechanisms enable properties such as shape memory and superelasticity. Although their operating principles vary depending on the material type (metal alloy, polymer, or ceramic), they generally rely on energy storage, phase transformations, and dynamic movements of the molecular structure.

The shape memory and superelastic properties of SMAs are primarily governed by martensite-austenite phase transformations occurring between thermodynamic equilibrium states (Zhao et al., 2023).

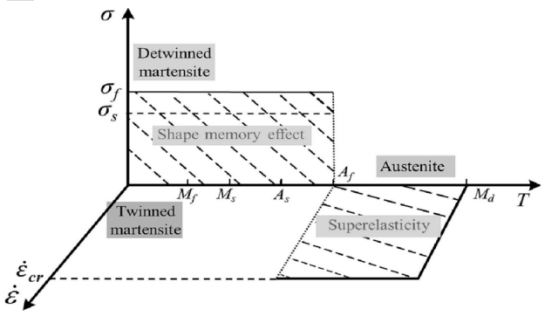


Figure 4. Phase transformation in shape memory materials.
Reference: Zhao et al., 2023.

At low temperatures and energy levels, the martensite phase exhibits a structure that is easily deformable. In this phase, due to the slip movements between atomic planes, the material deforms beyond its elastic limits. Although a permanent deformation may appear during the shape change, this deformation is temporary due to the unique crystal structure of martensite. At higher temperatures and energy levels, the austenite phase emerges. This phase represents the state where the material has a regular and stable crystal structure. The shape memory material transitions from the martensite phase to the austenite phase with an increase in temperature, and during this process, it returns to its original shape. Once the material is formed into the desired shape in the austenite phase, this shape is memorized. Later, when transitioning back to the martensite phase, the material can change shape again and return to its original shape with an increase in temperature (Zhao et al., 2023; Otsuka & Ren, 1999; Fremond & Miyazaki, 2014).

In shape memory alloys (SMAs), superelastic behavior occurs when a mechanical load is applied while the material is in the austenite phase at elevated temperatures. In this case, the material undergoes high deformation, but once the load is removed, it immediately returns to its original shape. This property is used in applications requiring high energy absorption and deformation resistance (Nair et al., 2023; Erb et al., 2023; Gur et al., 2018).

Shape memory materials (SMMs) find broad applications across many industries due to their unique properties. Particularly in biomedical applications, these materials play a significant role, being commonly used in stents and catheters. For example, nickel-titanium alloys (NiTi) are preferred in stents that aid in opening blood vessels due to their biocompatible properties and shape memory characteristics. Additionally, wires used in orthodontic treatments offer long-

term shape recovery with low forces, and orthopedic implants represent another application of SMMs (Miyasako et al., 2020; Kuribayashi et al., 2006; Park et al., 2016) (Figure 5).

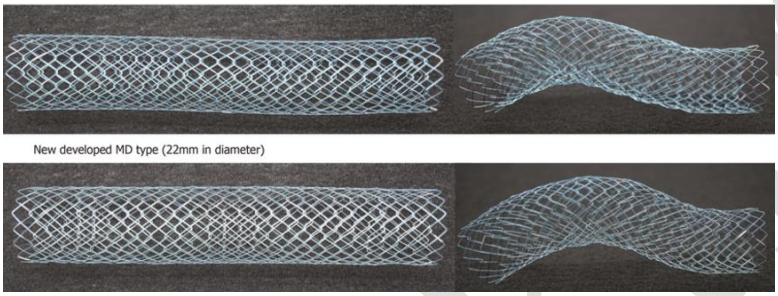


Figure 5. Example of a NiTi stent.

Reference: Miyasako et al., 2020.

Considering all these properties, shape memory materials continue to revolutionize various sectors. In the future, efforts to reduce the cost of these materials and enhance their performance will further expand their application areas, making SMAs an indispensable part of modern technologies.

2. SHAPE MEMORY MATERIAL-BASED LINEAR ACTUATORS

NiTi (Nickel-Titanium), shape memory alloys (SMAs) are widely used materials and are applicable in mechanical systems such as actuators. The shape memory and superelastic properties of NiTi, which allow it to change form in response to heat or stress, provide a significant advantage in actuator design. NiTi alloys function as actuators due to two fundamental phase transformations (Van Humbeeck, 2002; Chernenko et al., 2013; Duerig et al., 2013; Lexellent, 2013):

- Martensite Phase: This phase, at lower temperatures, is flexible and can be easily deformed.

- Austenite Phase: At higher temperatures, the material transforms into a stiffer structure and recovers its original shape.

The operation of NiTi actuators is based on the phase transformation of the material with temperature changes and its ability to generate mechanical motion. The fundamental mechanism that enables NiTi alloys to function as actuators involves the shape memory effect and superelastic properties. These mechanisms rely on the alloy's ability to transition between two distinct crystal phases: martensite and austenite (Miller & Lagoudas, 2000; Grossmann et al., 2009; Grossmann et al., 2008).

During the design phase, determining the application area and requirements for the NiTi actuator is a critical step. First, the amount of force the actuator needs to generate must be calculated, and the displacement it will produce should be defined. Additionally, the temperature range required for NiTi to undergo its shape memory transformation should be established. For example, NiTi alloys typically change shape between 60°C and 100°C, so this temperature range should be considered during the design process. When selecting the type of actuator, there are two basic options. In linear actuators, NiTi material in the form of wire or spring produces linear motion when heated. In rotary actuators, NiTi material generates rotary motion by torsion. These design decisions directly affect the actuator's performance and application area (Rao et al., 2015; Elahinia, 2016; Lexellent, 2013; Patel et al., 2020).

In the material preparation stage, the appropriate NiTi material must be selected. Alloys with approximately 50% nickel and 50% titanium are commonly used. The shape memory temperature range of these alloys should be pre-adjusted to suit the intended design, which is why pre-treated

NiTi materials are preferred. During the shaping process, the material is processed into the desired form, such as wire, strip, or spring. To ensure the shape memory effect, the material is brought to the predetermined form and undergoes a high-temperature annealing process to "train" the material to "remember" this shape. This process is critical for ensuring the actuator can accurately perform the desired motion (Cohen et al., 2023; Shiva et al., 2015; Bogdanski et al., 2002).

In actuator production, a suitable heating and control mechanism must be designed to allow NiTi to generate motion when heated. To achieve this, Joule heating can be utilized by passing electric current through the wire, or an external heating element, such as a resistance or infrared light source, can be used. During the assembly phase, NiTi wire or strip is fixed in such a way that it generates a pulling or pushing motion within a system. To ensure the return motion, an elastic retraction mechanism, such as a spring, can be added to enhance the actuator's functionality. These processes must be carefully applied to ensure the actuator operates reliably and efficiently (Otsuka & Ren, 1999; Otsuka & Kakeshita, 2002).

For NiTi actuators to operate reliably and efficiently, they must undergo comprehensive testing and calibration processes. First, thermal cycling tests are conducted. These tests are performed to verify that NiTi material can transition smoothly between phases within the specified temperature range and produce the desired motion. Additionally, mechanical force tests are applied to evaluate whether the actuator can meet the design expectations in terms of force and movement. During these tests, the durability of NiTi material and its performance in repeated movements are also examined. These processes ensure the long-term reliability and success of the actuator in its application.

The versatile structure of NiTi actuators makes them suitable for use in various fields. For example, in robotic fingers, NiTi wire can be used to produce bending motion under thermal stimulation. This enables high-precision movements in robotic systems. Microactuators, especially in medical devices and micro-robotic systems, rely on NiTi's ability to produce precise and small-scale movements, which is of critical importance. NiTi actuators are also used in aerospace and automotive systems for applications such as active flaps or valve systems. In these applications, NiTi's rapid response capability and durability provide a significant advantage, enhancing performance (Kim et al., 2009; Kheirikhah et al., 2011; Ruth et al., 2022; Petrini & Migliavacca, 2011).

When using NiTi actuators, both the advantages and limitations should be considered. Among the advantages, the lightweight and compact design is a major factor. This feature makes NiTi actuators ideal for use in confined spaces. Additionally, their quiet operation is a significant advantage, especially in medical and sensitive applications. NiTi's high force density allows it to produce substantial forces despite its small size, which enhances its performance. However, along with these advantages, there are some limitations. The need for NiTi actuators to operate within a narrow temperature range restricts their application flexibility. Their dependency on heat energy can reduce energy efficiency, which may be a disadvantage in some applications. Furthermore, long-term use may lead to fatigue and durability issues, which could limit the actuator's lifespan. Balancing these characteristics allows for the successful use of NiTi actuators (Johnson et al., 2001; Farber et al., 2020; Oliveira et al., 2020).

3. MATERIALS AND METHODS

This section provides a detailed description of the materials used for the experimental setup and the experimental methodology. During the procurement of the materials necessary for the experimental setup, the existing resources and laboratory equipment of our faculty were effectively utilized. This approach not only reduced the cost of the experiment but also allowed for efficient utilization of resources. The equipment used includes high-precision measurement devices, data collection systems, and control equipment. All experiments were conducted in our faculty's test laboratory, where the modern infrastructure and equipment contributed to the high accuracy and reliability of the experiments. Additionally, the laboratory environment provided controlled conditions for the experiments, which enhanced the validity of the results. During the process, predefined procedures and standards were rigorously followed to ensure the repeatability and scientific validity of the results.

The materials used in the creation of the experimental setup were carefully selected to determine the most suitable Shape Memory Alloy (SMA) spring for the linear actuator design. For this purpose, a special experimental setup was developed to evaluate the fundamental properties and performance of the SMA. The setup was designed to test how long the springs, under a fixed tension, could lift a specific load and how well they could return to their original shape after the load-lifting process.

Springs produced using SMA wires of three different diameters, exhibiting different mechanical properties, were tested in the experiment. Due to their different diameters and sizes, these springs provided comparable data in terms of deformation under tension and shape memory transformation performance. Each spring was tested under different load,

temperature, and time conditions, and the data obtained under these conditions were meticulously recorded.

During the experiment, the time taken to lift the load for each spring, the amount of deformation, and the capacity to return to the original shape after transformation were carefully measured. These measurements formed the basis for comparing the shape memory effect and dynamic performance of the springs. The results obtained guided the selection of the most suitable SMA spring with the optimal diameter and properties for the design and facilitated critical decision-making in the actuator design. In this process, the precision measurement devices and control systems used enhanced the accuracy and reliability of the experimental results.

4. SAMPLE DESIGN

The designed linear actuator consists of six main components that work together harmoniously to ensure functionality. These components are meticulously designed to optimize the actuator's durability, efficiency, and performance, and are explained in detail below.

Component 1 is the housing of the linear actuator. The housing holds all the components together, ensuring the structural integrity of the system. It also serves as a protective barrier against external environmental factors, contributing to the actuator's long lifespan.

Component 2 is the moving shaft of the linear actuator. The shaft converts the force generated by the springs into linear motion, thereby performing the intended function. This component is critical as it determines the precision and accuracy of the system's movement.

Components 3 and 4 are the Shape Memory Alloy (SMA) springs, which play a fundamental role in generating movement. When heated, these springs transition to the austenitic phase, eliminating stress and generating linear motion on the shaft. During the cooling process, the springs return to their original martensitic structure, completing the motion.

Component 5 is the cover that encloses and protects the components of the linear actuator. The cover shields the internal parts of the system from external factors while completing the outer structure of the actuator.

Component 6 consists of the bolts that securely fasten the cover to the actuator. These bolts ensure that all components remain together and stable, enhancing the mechanical durability and minimizing vibrations that may occur during operation (Figure 6).

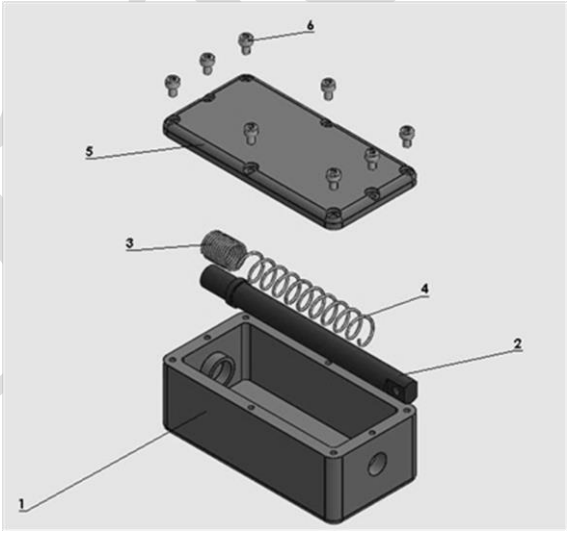


Figure 6. Linear actuator design.

Each of these components has been designed and assembled to ensure the high performance of the linear actuator.

During the design and assembly process, materials suitable for the application area and specific requirements were selected to guarantee the actuator's functionality and long-term durability.

In the diagram below, the positions and shapes of the Shape Memory Alloy (SMA) springs in the closed position of the designed linear actuator are clearly visible. In the closed position, the first spring is in the martensite phase, where the spring is more flexible and prone to deformation. The martensite phase is a structural phase of SMA materials that can deform, especially at low temperatures during application. The second spring, on the other hand, initially demonstrates the shape memory effect and is in the austenite phase, its original state. Due to the shape memory mechanism, this spring has the potential to return to its original shape at a specific temperature (Figure 7).

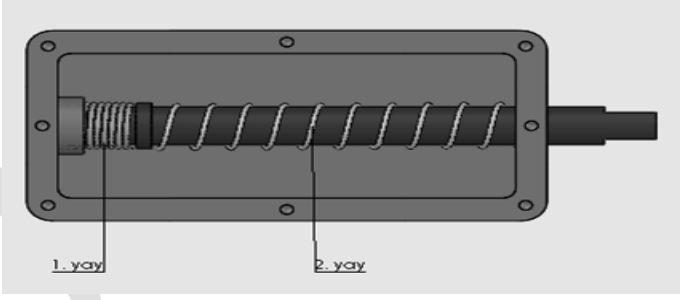


Figure 7. Linear actuator in closed position.

The working principle of the linear actuator is based on phase transformations of the Shape Memory Alloy (SMA) springs through electric current. When the actuator is intended to open, an electric current is passed through Spring 1, heating it and causing the transition from the martensitic phase to the austenitic phase. The austenitic phase is the phase in which SMA materials exhibit a harder and more stable structure at high temperatures. With this transformation, the spring returns from

its deformed state to its original "memorized" shape. This movement generates mechanical force by creating a linear displacement on the actuator shaft.

This transformation process occurs at different rates depending on the diameter of the spring material and the applied stress. For instance, in the experiments conducted, a spring with a 0.75 mm diameter, under a constant voltage of 12 volts, completes the transition from martensitic phase to austenitic phase and the shaft movement in an average of 2.55 seconds, while a 1 mm diameter spring under the same conditions takes 2.9 seconds to undergo the transformation. Thinner springs respond more quickly due to their lower thermal mass, whereas thicker springs, with higher thermal mass, take longer to complete the transformation.

During the closing process of the actuator, the current passing through Spring 1 is cut off, and the spring cools, transitioning back to the martensitic phase. At the same time, electric current is passed through Spring 2, heating it and allowing it to transition to the austenitic phase. With the shape memory effect of the SMA, Spring 2 returns from its deformed state to its original shape, enabling the shaft to retract. As a result, the actuator, which is in the open position, returns to its original closed position.

This dual-spring mechanism allows both opening and closing motions to be performed based on the same fundamental principles. While Spring 1 is responsible for the opening movement, Spring 2 is tasked with the closing movement. The sequential heating and cooling of the springs optimize the system's energy use and provide precise control. This design enables the actuator to provide bidirectional motion capability and work in an adaptable manner for various application requirements.

5. CONCLUSION

In the experimental setup, the maximum load that Shape Memory Alloy (SMA) springs can lift under a constant voltage, and the time it takes to lift this load, were tested. The obtained data provide insights into the mechanical strength of SMA springs and the effective operating loads for the designed linear actuator. In the experiment, three SMA springs with different diameters were used: 0.5 mm, 0.75 mm, and 1 mm.

Each spring was sequentially connected to the experimental setup and operated under various loads. The loads used were 10 g, 20 g, 50 g, 100 g, 150 g, 200 g, 250 g, 300 g, 350 g, 400 g, 450 g, 500 g, and 1000 g. For each load, the time it took for the springs to return to their initial length of 30 mm was measured. Springs that did not return to their initial length within 10 seconds under the given load were considered unable to lift that load.

In the experiment, the 0.5 mm diameter SMA spring returned to its initial length in 1.21 seconds under a 10 g load. However, under a 20 g load, it could not return to its initial length within 10 seconds, indicating that it was unable to lift this load. This result shows that the 0.5 mm diameter SMA spring can only lift a 10 g load. The 0.75 mm diameter SMA spring was tested under loads of 10 g, 20 g, 50 g, 100 g, 150 g, 200 g, and 250 g, and in each case, it successfully returned to its initial length. Interestingly, the return time was consistently 2.55 seconds for all the loads it could lift. The 1 mm diameter SMA spring, which showed no deformation under low loads (10 g and 20 g), was tested starting from a 50 g load. The spring successfully returned to its initial length under loads of 50 g, 100 g, 150 g, 200 g, 250 g, 300 g, 350 g, 400 g, 450 g, 500 g, and 1000 g, with a consistent return time of 2.90 seconds for each load.

The experimental results indicate that the loads that SMA springs can lift under a constant voltage do not affect their return times. The fact that return times are constant for springs with different diameters suggests that the designed linear actuator will provide consistent performance under varying loads. Furthermore, increasing the diameter of the spring ensures that the actuator has a higher load capacity.

These data highlight that the SMA springs to be used in the linear actuator design should be carefully selected based on their load-bearing capacity and response times. Particularly, the 1 mm diameter spring stands out as an ideal choice for heavy-load applications due to its ability to deliver consistent performance even under higher loads.

Örnektir

6. REFERENCES

Behl, M. & Lendlein, A. (2007). Shape-memory polymers. *Materials today*, *10*(4), 20-28.

Bogdanski, D., Köller, M., Müller, D., Muhr, G., Bram, M., Buchkremer, H. P., ... & Epple, M. (2002). Easy assessment of the biocompatibility of Ni–Ti alloys by in vitro cell culture experiments on a functionally graded Ni–NiTi–Ti material. Biomaterials, 23(23), 4549-4555.

Calkins, F. T., Flatau, A. B., & Dapino, M. J. (2007). Overview of magnetostrictive sensor technology. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 18(10), 1057-1066.

Cedrat Technologies. (2020). Magnetostrictive actuators. https://cedrat-technologies.com/wp-content/uploads/2023/03/Magnetostrictive_Actuators.pdf

Chernenko, V. A., L'vov, V. A., Cesari, E., Kosogor, A., & Barandiaran, J. M. (2013). Transformation volume effects on shape memory alloys. Metals, 3(3), 237-282.

Cohen, Y., Burkhardt, C., Vogel, L., Baum, A., Mitteramskogler, G., Shilo, D., & Faran, E. (2023). Sinter-Based Additive Manufacturing of Ni–Ti Shape Memory Alloy. Shape Memory and Superelasticity, 9(3), 492-503.

Dar, R. D., Yan, H., & Chen, Y. (2016). Grain boundary engineering of Co–Ni–Al, Cu–Zn–Al, and Cu–Al–Ni shape memory alloys by intergranular precipitation of a ductile solid solution phase. Scripta Materialia, 115, 113-117.

Duerig, T. W., Melton, K. N., & Stöckel, D. W. C. M. (2013). Engineering aspects of shape memory alloys. Butterworth-heinemann.

Ehrmann, G., & Ehrmann, A. (2021). 3D printing of shape memory polymers. Journal of Applied Polymer Science, 138(34), 50847.

Elahinia, M. H. (2016). Shape memory alloy actuators: design, fabrication, and experimental evaluation. John Wiley & Sons.

Erb, D. J., Rauch, H. A., Knight, K. P., & Yu, H. Z. (2023). Tuning the Martenzitic Transformation Mode in Shape Memory Ceramics via Mesostructure and Microstructure Design. Shape Memory and Superelasticity, 9(1), 116-126.

Farber, E., Zhu, J. N., Popovich, A., & Popovich, V. (2020). A review of NiTi shape memory alloy as a smart material produced by additive manufacturing. Materials Today: Proceedings, 30, 761-767.

Fremond, M., & Miyazaki, S. (2014). Shape memory alloys (Vol. 351). Springer.

Ge, Q., Sakhaei, A. H., Lee, H., Dunn, C. K., Fang, N. X., & Dunn, M. L. (2016). Multimaterial 4D printing with tailorable shape memory polymers. Scientific reports, 6(1), 31110.

Ghosh, P., Rao, A., & Srinivasa, A. R. (2013). Design of multi-state and smart-bias components using shape memory alloy and shape memory polymer composites. Materials & Design, 44, 164-171.

Grossmann, C., Frenzel, J., Sampath, V., Depka, T., & Eggeler, G. (2009). Elementary transformation and deformation processes and the cyclic stability of NiTi and NiTiCu shape memory spring actuators. Metallurgical and Materials Transactions A, 40, 2530-2544.

Örnekir

Grossmann, C., Frenzel, J., Sampath, V., Depka, T., Oppenkowski, A., Somsen, C., ... & Eggeler, G. (2008). Processing and property assessment of NiTi and NiTiCu shape memory actuator springs. Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik: Entwicklung, Fertigung, Prüfung, Eigenschaften Und Anwendungen Technischer Werkstoffe, 39(8), 499-510.

Gur, S., Frantziskonis, G. N., & Muralidharan, K. (2018). Atomistic simulation of shape memory effect (SME) and superelasticity (SE) in nano-porous NiTi shape memory alloy (SMA). Computational Materials Science, 152, 28-37.

Hager, M. D., Bode, S., Weber, C., & Schubert, U. S. (2015). Shape memory polymers: Past, present and future developments. Progress in Polymer Science, 49, 3-33.

Hager, M. D., Bode, S., Weber, C., & Schubert, U. S. (2015). Shape memory polymers: Past, present and future developments. Progress in Polymer Science, 49, 3-33.,

Holman, H., Kavarana, M. N., & Rajab, T. K. (2021). Smart materials in cardiovascular implants: Shape memory alloys and shape memory polymers. Artificial organs, 45(5), 454-463.

Jani, J. M., Leary, M., Subic, A., & Gibson, M. A. (2014). A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. Materials & Design (1980-2015), 56, 1078-1113.

Johnson, A. D., Martynov, V., & Gupta, V. (2001, September). Applications of shape memory alloys: advantages, disadvantages, and limitations. In Micromachining and Microfabrication Process Technology VII (Vol. 4557, pp. 341-351). SPIE.

Örnekti

Kheirikhah, M. M., Rabiee, S., & Edalat, M. E. (2011). A review of shape memory alloy actuators in robotics. RoboCup 2010: Robot Soccer World Cup XIV 14, 206-217.

Kim, S., Hawkes, E., Choy, K., Joldaz, M., Foleyz, J., & Wood, R. (2009, October). Micro artificial muscle fiber using NiTi spring for soft robotics. In 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (pp. 2228-2234). IEEE.

Kumar, P. K., & Lagoudas, D. C. (2008). Introduction to shape memory alloys. In Shape memory alloys: modeling and engineering applications (pp. 1-51). Boston, MA: Springer US.

Kuribayashi, K., Tsuchiya, K., You, Z., Tomus, D., Umemoto, M., Ito, T., & Sasaki, M. (2006). Self-deployable origami stent grafts as a biomedical application of Ni-rich TiNi shape memory alloy foil. Materials Science and Engineering: A, 419(1-2), 131-137.

Lai, A., Du, Z., Gan, C. L., & Schuh, C. A. (2013). Shape memory and superelastic ceramics at small scales. Science, 341(6153), 1505-1508.

Lendlein, A., & Kelch, S. (2002). Shape-memory polymers. Angewandte Chemie International Edition, 41(12), 2034-2057.

Lexcellent, C. (2013). Shape-memory alloys handbook. John Wiley & Sons.

Lobo, P. S., Almeida, J., & Guerreiro, L. (2015). Shape memory alloys behaviour: A review. Procedia Engineering, 114, 776-783.

Machado, L. G., & Savi, M. A. (2003). Medical applications of shape memory alloys. Brazilian journal of medical and biological research, 36, 683-691.

Miller, D. A., & Lagoudas, D. C. (2000). Thermomechanical characterization of NiTiCu and NiTi SMA actuators: influence of plastic strains. Smart Materials and Structures, 9(5), 640.

Miyasako, Y., Kuwai, T., Ishaq, S., Tao, K., Konishi, H., Miura, R., ... & Kohno, H. (2020). Newly developed self-expandable Niti-S MD colonic metal stent for malignant colonic obstruction. World journal of gastrointestinal surgery, 12(4), 138.

Nair, S., Sai, P. H., Pranav, R., & Prashanth, M. (2023, December). Smart material: Nitinol; shape memory alloy–A review. In AIP Conference Proceedings (Vol. 2943, No. 1). AIP Publishing.

Olabi, A. G., & Grunwald, A. (2008). Design and application of magnetostrictive materials. Materials & Design, 29(2), 469-483.

Oliveira, J. P., Miranda, R. M., & Fernandes, F. B. (2017). Welding and joining of NiTi shape memory alloys: a review. Progress in Materials Science, 88, 412-466.

Otsuka, K., & Kakeshita, T. (2002). Science and technology of shape-memory alloys: new developments. mrs bulletin, 27(2), 91-100.

Otsuka, K., & Ren, X. (1999). Recent developments in the research of shape memory alloys. Intermetallics, 7(5), 511-528.

Otsuka, K., & Wayman, C. M. (Eds.). (1999). Shape memory materials. Cambridge university press.

Park, C., Kim, S., Kim, H. E., & Jang, T. S. (2016). Mechanically stable tantalum coating on a nano-roughened NiTi stent for enhanced radiopacity and biocompatibility. Surface and Coatings Technology, 305, 139-145.

Parlinski, K., & Parlinska-Wojtan, M. (2002). Lattice dynamics of NiTi östenite, martenzite, and R phase. Physical Review B, 66(6), 064307.

Petrini, L., & Migliavacca, F. (2011). Biomedical applications of shape memory alloys. Journal of Metallurgy, 2011(1), 501483.

Petrini, L., & Migliavacca, F. (2011). Biomedical applications of shape memory alloys. Journal of Metallurgy, 2011(1), 501483.

Pilate, F., Toncheva, A., Dubois, P., & Raquez, J. M. (2016). Shape-memory polymers for multiple applications in the materials world. European Polymer Journal, 80, 268-294.

Plummer, G., Mendelev, M. I., & Lawson, J. W. (2022). Molecular dynamics simulations of östenite-martenzite interface migration in NiTi alloy. Physical Review Materials, 6(12), 123601.

Rao, A., Srinivasa, A. R., & Reddy, J. N. (2015). Design of shape memory alloy (SMA) actuators (Vol. 3). Cham: Springer International Publishing.

Ruth, D. J. S., Sohn, J. W., Dhanalakshmi, K., & Choi, S. B. (2022). Control aspects of shape memory alloys in robotics applications: a review over the last decade. Sensors, 22(13), 4860.

Örnektir

Segui, C., Cesari, E., & Van Humbeeck, J. (1990). Irreversibility in Two-Stage Martenzitic Transformations of Cu–Al–Ni and Cu–Zn–Al–Mn Alloys. Materials Transactions, JIM, 31(5), 375-380.

Shiva, S., Palani, I. A., Mishra, S. K., Paul, C. P., & Kukreja, L. M. (2015). Investigations on the influence of composition in the development of Ni–Ti shape memory alloy using laser based additive manufacturing. Optics & Laser Technology, 69, 44-51.

Van Humbeeck, J. (2001). Shape memory alloys: a material and a technology. Advanced engineering materials, 3(11), 837-850.

Van Humbeeck, J. (2012). Shape memory alloys with high transformation temperatures. Materials Research Bulletin, 47(10), 2966-2968.

Wayman, C. M. (1993). Shape memory alloys. MRS bulletin, 18(4), 49-56.

Yamauchi, K., Ohkata, I., Tsuchiya, K., & Miyazaki, S. (Eds.). (2011). Shape memory and superelastic alloys: Applications and technologies. Elsevier.

Zhao, Y., & Sun, J. (2023). Study on the characteristics of phase in turning NiTi shape memory alloy. Journal of Manufacturing Processes, 98, 277-284.

Zheng, W., Li, L., Zhao, L., & Guo, Q. (2024). Design of Shape Memory Ceramics: Principles, Strategies and Perspectives. JOM, 1-18.

Zupanc, J., Vahdat-Pajouh, N., & Schäfer, E. (2018). New thermomechanically treated NiTi alloys–a review. International endodontic journal, 51(10), 1088-1103.

TEMEL VE REKÜPERATÖRLÜ ORGANİK RANKİNE ÇEVRİMLERİNİN TERMODİNAMİK AÇIDAN KARŞILAŞTIRILMASI

Erhan KIRTEPE[1]

1. GİRİŞ

Günlük hayatın ve sanayi sektörünün her alanında artan enerji talebinin yanı sıra, fosil kökenli yakıtların kullanılması sonucunda ortaya çıkan küresel ısınma problemi ve kullanılan fosil kökenli yakıtların giderek azalması pek çok araştırmacının enerji alanına odaklanmasına neden olmuştur. Bu kapsamda fosil kökenli yakıtların yerine çevre dostu, temiz ve sürdürülebilir enerji kaynakları ve bu kaynaklardan yararlanılmasında kullanılan sistemlerin araştırılmasına ve geliştirilmesine devam edilmektedir.

Genellikle biyokütle yakıtlarından, güneş enerjisinden, jeotermal enerjiden ve endüstriyel atık ısılardan elde edilebilen düşük dereceli ısıdan elektrik üretimi yapabilen Organik Rankine Çevrimi (ORÇ), yenilenebilir enerji sistemleri ile entegre bir şekilde yaygın olarak kullanılan teknolojilerden biridir (Braimakis & Karellas, 2018). Rankine çevrimiyle aynı prensipte çalışan ORÇ'nin tek farkı çalışma akışkanı olarak su yerine daha düşük doyma sıcaklıklarına sahip organik akışkanları kullanmasıdır (Nondy & Gogoi, 2021). Bu çalışmada temel ve reküperatörlü ORÇ'lerin enerji ve ekserji analizleri gerçekleştirilmiş ve bu iki çevrimin karşılaştırması yapılmıştır.

1 Dr. Öğr. Üyesi, Şırnak Üniversitesi, Şırnak Meslek Yüksekokulu, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, erhan.kirtepe@sirnak.edu.tr, ORCID: 0000-0002-1824-2599.

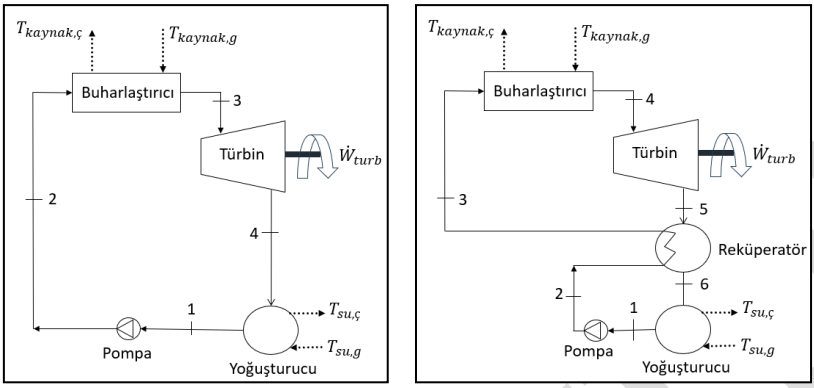
2. ORGANİK RANKİNE ÇEVRİMİNİN ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ

Çalışma kapsamında incelenen temel ve reküperatörlü ORÇ'lerin şematik resmi Şekil 1'de görülmektedir. Temel ORÇ'de buharlaştırıcı, türbin, yoğuşturucu ve pompa olmak üzere dört ana eleman bulunur. Bir dış kaynaktan ısı alma işlemi, pompa vasıtasıyla buharlaştırıcı basıncına yükseltilen ve ORÇ'de sirküle edilen çalışma akışkanı vasıtasıyla buharlaştırıcıda gerçekleşir. Buharlaştırıcıda alınan ısı sayesinde doymuş buhar (veya kızgın buhar) haline gelen çalışma akışkanı türbine gönderilir. Çalışma akışkanı türbin içerisinden geçerken, türbin içerisinde bulunan çarkı döndürür ve türbinde mil işi elde edilir. Türbinde genişleyen akışkan temel ORÇ'de yoğuşturucuya gönderilir ve burada ısısını atarak doymuş sıvı halinde kondenserden çıkıp pompaya gider. Reküperatörlü ORÇ'de ise türbinde genişleyen çalışma akışkanı yoğuşturucuya gitmeden önce reküperatörden geçerken pompadan çıkan buharlaştırıcı basıncındaki çalışma akışkanına ısı vererek yoğuşturucuda atılacak ısının bir kısmının geri kazanılmasını sağlar. ORÇ çevriminden elde edilen mil işi bir jeneratör vasıtası ile elektrik enerjine dönüştürülerek çevrimden elektrik enerjisinin üretilmesi sağlanır. Ayrıca birçok uygulamada kondenserden atılan atık ısıdan da faydalanılır.

Bir kontrol hacmine uygulanan kütlenin ve enerjinin korunumu, sürekli koşullarda, kinetik ve potansiyel enerji değişimlerinin sabit olduğu durumlarda Eşitlik 1 ve 2 ile hesaplanır (Khaliq, Mokheimer, & Yaqub, 2019).

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_ç \tag{1}$$

$$\sum \dot{Q} - \sum \dot{W} + \sum \dot{m}_g h_g - \sum \dot{m}_ç h_ç = 0 \tag{2}$$



(a) (b)

Şekil 1. a) Temel ve b) reküperatörlü ORÇ'lerin şematik gösterimi.

Eşitliklerde görülen alt indisler "g" ve "ç" sırasıyla kontrol hacmine giriş ve çıkışı gösterir. Temel ve reküperatörlü ORÇ'de yer alan her bir bileşene ait enerji eşitlikleri Tablo 1'de görülmektedir.

Tablo 1. Temel ve reküperatörlü ORÇ'de enerji eşitlikleri.

Bileşen	Temel ORÇ	Eş. No	Reküperatörlü ORÇ	Eş. No
Buharlaştırıcı	$\dot{Q}_{buh} = \dot{m}_k(h_{k,g} - h_{k,ç})$	(3)	$\dot{Q}_{buh} = \dot{m}_k(h_{k,g} - h_{k,ç})$	(11)
	$\dot{Q}_{buh} = \dot{m}_{orç}(h_3 - h_2)$	(4)	$\dot{Q}_{buh} = \dot{m}_{orç}(h_4 - h_3)$	(12)
Türbin	$\dot{W}_{türb} = \dot{m}_{orç}(h_3 - h_4)$	(5)	$\dot{W}_{türb} = \dot{m}_{orç}(h_4 - h_5)$	(13)
	$\eta_{türb,s} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4,s}}$	(6)	$\eta_{türb,s} = \frac{h_4 - h_5}{h_4 - h_{5,s}}$	(14)
Yoğuşturucu	$\dot{Q}_{yoğ} = \dot{m}_{orç}(h_4 - h_1)$	(7)	$\dot{Q}_{yoğ} = \dot{m}_{orç}(h_6 - h_1)$	(15)
	$\dot{Q}_{yoğ} = \dot{m}_{su}(h_{su,ç} - h_{su,g})$	(8)	$\dot{Q}_{yoğ} = \dot{m}_{su}(h_{su,ç} - h_{su,g})$	(16)
Pompa	$\dot{W}_{pompa} = \dot{m}_{orç}(h_2 - h_1)$	(9)	$\dot{W}_{pompa} = \dot{m}_{orç}(h_2 - h_1)$	(17)
	$\dot{W}_{pompa} = \dot{m}_{orç}\frac{v_1(P_2 - P_1)}{\eta_{pompa,s}}$	(10)	$\dot{W}_{pompa} = \dot{m}_{orç}\frac{v_1(P_2 - P_1)}{\eta_{pompa,s}}$	(18)
Reküperatör	–		$\dot{m}_{orç}(h_3 - h_2) = \dot{m}_{orç}(h_5 - h_6)$	(19)

Kaynak: Javed, & Tiwari 2023; Nondy & Gogoi, 2021

Sürekli çalışma koşullarında kontrol hacmine uygulanabilecek ekserji dengesi Eşitlik 20 ile hesaplanır (Haghghi, Pesteei, Chitsaz, & Hosseinpour, 2019; Khaliq vd., 2019).

$$\sum\left(1-\frac{T_0}{T}\right)\dot{Q}_j-\sum\dot{W}+\sum\dot{m}_g e_g-\sum\dot{m}_ç e_ç-\dot{E}_{eks,yok}=0 \quad (20)$$

Kinetik ve potansiyel ekserji ihmal edildiği durumda fiziksel ekserji Eşitlik 21 ile hesaplanır (Eisavi, Khalilarya, Chitsaz & Rosen, 2018).

$$e=(h-h_0)-T_0(s-s_0) \quad (21)$$

Temel ve reküperatörlü ORÇ'de yer alan her bir bileşene ait ekserji eşitlikleri sırasıyla Tablo 2 ve Tablo 3'de görülmektedir (Nondy & Gogoi 2021; Khaliq vd., 2019; Eisavi vd., 2018).

Tablo 2. Temel ORÇ'de ekserji eşitlikleri.

Bileşen	Temel ORÇ	Eş. No
Buharlaştırıcı	$\dot{E}_{eks,yok,buh}=\dot{m}_{orç}(e_2-e_3)+\dot{m}_k(e_{k,g}-e_{k,ç})$	(22)
Türbin	$\dot{E}_{eks,yok,türb}=\dot{m}_{orç}(e_3-e_4)-\dot{W}_{türb}$	(23)
Yoğuşturucu	$\dot{E}_{eks,yok,yoğ}=\dot{m}_{orç}(e_4-e_1)+\dot{m}_{su}(e_{su,g}-e_{su,ç})$	(24)
Pompa	$\dot{E}_{eks,yok,pompa}=\dot{m}_{orç}(e_1-e_2)+\dot{W}_{pompa}$	(25)

Tablo 3. Reküperatörlü ORÇ'de ekserji eşitlikleri.

Bileşen	Reküperatörlü ORÇ	Eş. No
Buharlaştırıcı	$\dot{E}_{eks,yok,buh}=\dot{m}_{orç}(e_3-e_4)+\dot{m}_k(e_{k,g}-e_{k,ç})$	(26)
Türbin	$\dot{E}_{eks,yok,türb}=\dot{m}_{orç}(e_4-e_5)-\dot{W}_{türb}$	(27)
Yoğuşturucu	$\dot{E}_{eks,yok,yoğ}=\dot{m}_{orç}(e_5-e_1)+\dot{m}_{su}(e_{su,g}-e_{su,ç})$	(28)
Pompa	$\dot{E}_{eks,yok,pompa}=\dot{m}_{orç}(e_1-e_2)+\dot{W}_{pompa}$	(29)
Reküperatör	$\dot{E}_{eks,yok,rek}=\dot{m}_{orç}(e_5-e_6+e_2-e_3)$	(30)

Örnektir

Organik rankine çevriminin ısıl ve ekserji verimi sırasıyla 31 ve 32 numaralı eşitlikler ile hesaplanır (Nondy & Gogoi 2021; Çengel & Boles, 2011).

$$\eta_{ısıl} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{buh}} \quad (31)$$

$$\eta_{ekserji} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}_k(e_{k,g} - e_{k,ç})} \quad (32)$$

3. HESAPLAMALAR VE KARŞILAŞTIRMA

İkinci bölümde verilen eşitlikler kullanılarak temel ve reküperatörlü ORÇ'lerin enerji ve ekserji hesaplamaları bu kısımda yapılmıştır. Çalışma akışkanına ait özelliklerinin bulunması için Coolprop programı kullanılmıştır (Bell, Wronski, Quoilin, & Lemort, 2014). ORÇ'nin buharlaştırıcısına verilen ısının güneş enerjisinden elde edildiği varsayılmıştır. Güneş kolektöründen elde edilen ısının buharlaştırıcıya aktarılmasında kullanılan kaynak akışkanı, özellikle orta sıcaklık uygulamalarında kullanılan Syltherm 800 seçilmiştir. ORÇ'de ise yüksek kritik sıcaklığa ve verime sahip olan Toluen çalışma akışkanı olarak kullanılmıştır. Her iki tip ORÇ sistemi için yapılan hesaplamalarda kullanılan tasarım parametreleri Tablo 4'te gösterilmektedir.

Tablo 4. Tasarım parametreleri ve değerleri.

Parametre	Değer	Birim	Parametre	Değer	Birim
$\dot{Q}_{buh}$	300	kW	$T_{su,ç}$	35	°C
P_{buh}	2	MPa	T_0	25	°C
$T_{yoğ}$	40	°C	P_o	1	atm
$T_{kaynak,g}$	300	°C	$\eta_{türb,s}$	0,80	-
$T_{kaynak,ç}$	270	°C	$\eta_{pompa,s}$	0,85	-
P_{kaynak}	1	atm	ε_{rek}	0,7	-
$T_{su,g}$	25	°C			

Her iki tip ORÇ için yapılan hesaplamalarda ORÇ çalışma akışkanının yoğuşturucu çıkışında doymuş sıvı, buharlaştırıcı çıkışında ise doymuş buhar olduğu dikkate alınmıştır. Tablo 4'teki değerler kullanılarak yapılan temel ve reküperatörlü ORÇ için hesaplamalara ait her bir durumdaki özelik değerleri sırasıyla Tablo 5 ve Tablo 6'da görülmektedir.

Tablo 5. Temel ORÇ için özelik değerleri.

Hal	T (°C)	P (MPa)	h (kj/kg)	e (kj/kg)
1	40	0,00789	-132,355	0,525
2	40,701	2	-129,591	2,892
3	262,614	2	569,859	241,292
4	135,498	0,00789	402,786	42,668

Tablo 6. Reküperatörlü ORÇ için özelik değerleri.

Hal	T (°C)	P (MPa)	h (kj/kg)	e (kj/kg)
1	40	0,00789	-132,355	0,525
2	40,701	2	-129,591	2,892
3	92,243	2	-34,827	14,407
4	262,614	2	569,859	241,292
5	135,498	0,00789	402,786	42,668
6	69,140	0,00789	308,021	23,158

Tablo 4'teki değerler kullanılarak yapılan temel ve reküperatörlü ORÇ için hesaplamalara ait sonuçlar Tablo 7'de görülmektedir.

Temel ve reküperatörlü ORÇ için her bir bileşendeki ekserji yok oluşları Tablo 4'teki tasarım parametreleri kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler Tablo 8'de görülmektedir. Bu tablodan görüleceği üzere en fazla ekserji yok oluşu buharlaştırıcıda en az ekserji yok oluşu da pompada

olmaktadır. Ayrıca benzer tasarım parametreleri kullanıldığı durumda reküperatörlü ORÇ'ye göre temel ORÇ'de daha fazla ekserji yok oluşu olmaktadır.

Tablo 7. Temel ve reküperatörlü ORÇ için hesaplama sonuçları.

Parametre	Temel ORÇ	Reküperatörlü ORÇ
$\dot{m}_{orç}$ (kg/s)	0,429	0,496
$\dot{W}_{türb}$ (kW)	71,659	82,889
$\dot{Q}_{yoğ}$ (kW)	229,526	218,482
$\dot{W}_{pompa}$ (kW)	1,185	1,371
$\dot{Q}_{rek}$ (kW)	–	47,015
$\dot{m}_k$ (kg/s)	4,853	4,853
$\dot{E}_{eks,yok,toplam}$ (kW)	65,474	54,611
$\eta_{ısıl}$ (%)	23,491	27,173
$\eta_{ekserji}$ (%)	50,437	58,341

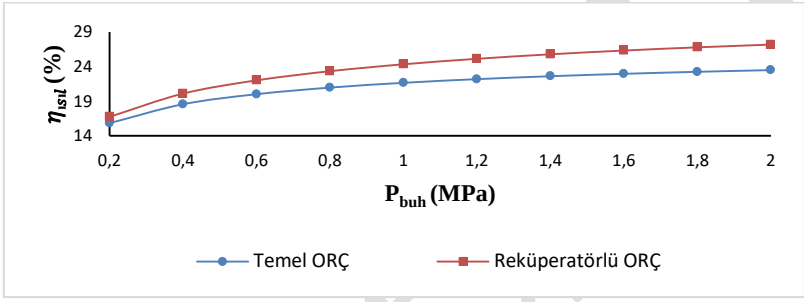
Tablo 8. Temel ve reküperatörlü ORÇ için hesaplanan ekerji yok oluş değerleri.

Parametre	Temel ORÇ	%	Reküperatörlü ORÇ	%
$\dot{E}_{eks,yok,türb}$	13,532	20,668	15,653	28,663
$\dot{E}_{eks,yok,yoğ}$	14,297	21,836	7,633	13,977
$\dot{E}_{eks,yok,pompa}$	0,170	0,260	0,196	0,359
$\dot{E}_{eks,yok,buh}$	37,475	57,236	27,163	49,739
$\dot{E}_{eks,yok,rek}$	–	–	3,966	7,262
Toplam	65,474	100	54,611	100

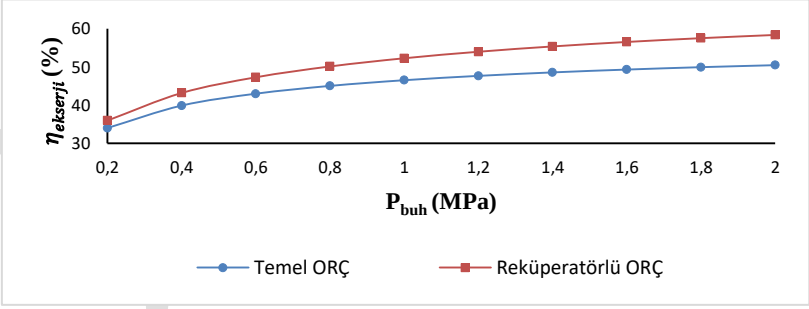
Tablo 4'teki tasarım parametreleri kullanılarak buharlaştırıcı basıncının 0,2 MPa ile 2 MPa arasında değiştiği durumda ısıl ve ekserji veriminin değişimi incelenmiş ve Şekil 2 ile gösterilmiştir. Bu şekilden görüleceği üzere buharlaştırıcı basıncının belirtilen aralıkta arttırılması ısıl ve ekserji verimini

Örnektir

arttırmıştır. Buharlaştırıcı basıncının 0,2 MPa'dan 2 MPa yükseltilmesi temel ORÇ'nin ısıl ve ekserji verimini %48,31, reküperatörlü ORÇ'nin ısıl ve ekserji verimini ise %62,22 oranında arttırmıştır. Ayrıca belirtilen buharlaştırıcı basınç aralığında yapılan analizlerde temel ORÇ yerine reküperatörlü ORÇ kullanılmasının ısıl ve ekserji verimliliğinde ortalama %12,04 oranında artış sağladığı belirlenmiştir.



(a)

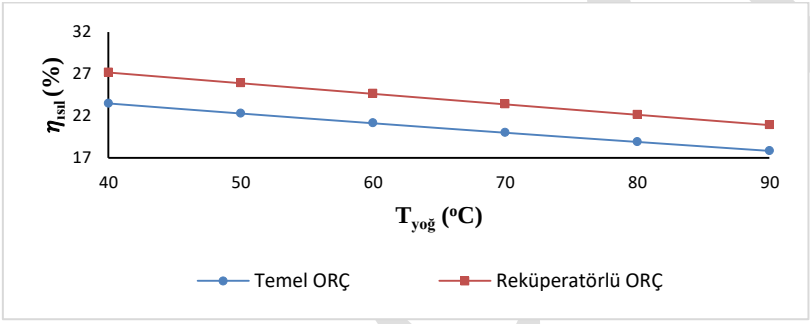


(b)

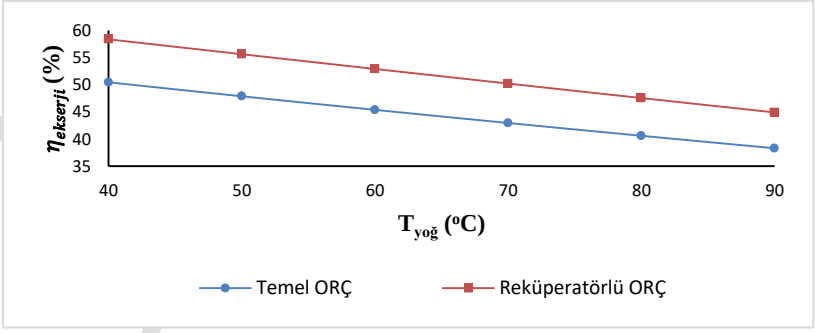
Şekil 2. Buharlaştırıcı basıncına göre temel ve reküperatörlü ORÇ'lerin a) ısıl ve b) ekserji verimlerinin değişimi.

Tablo 4'teki tasarım parametreleri kullanılarak yoğuşturucu sıcaklığının 40 ^{o}C ile 90 ^{o}C arasında değiştiği durumda ısıl ve ekserji veriminin değişimi incelenmiş ve Şekil 3 ile gösterilmiştir. Bu şekilden görüleceği üzere yoğuşturucu sıcaklığının belirtilen aralıkta arttırılması ısıl ve ekserji

veriminin azalmasına neden olmuştur. Yoğuşturucu sıcaklığının 40 ^{o}C'den 90 ^{o}C'ye yükseltilmesi temel ORÇ'nin ısıl ve ekserji verimini %24,05, reküperatörlü ORÇ'nin ısıl ve ekserji verimini ise %23,04 oranında azaltmıştır. Ayrıca belirtilen yoğuşturucu sıcaklık aralığında yapılan analizlerde temel ORÇ yerine reküperatörlü ORÇ kullanılmasının ısıl ve ekserji verimliliğinde ortalama %16,60 oranında artış sağladığı belirlenmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3. Yoğuşturucu sıcaklığına göre temel ve reküperatörlü ORÇ'lerin a) ısıl ve b) ekserji verimlerinin değişimi.

4. SONUÇ

Bu çalışmada temel ve reküperatörlü ORÇ'lerin termodinamik analizi gerçekleştirilmiş ve bu iki çevrimin enerji ve ekserji açısından karşılaştırmaları yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda en yüksek ekserji kaybının buharlaştırıcıda gerçekleştiği belirlenmiştir. Temel ORÇ yerine reküperatörlü ORÇ kullanımının hem enerji hem de ekserji performansı açısından avantaj olduğunu yapılan analiz sonuçları göstermiştir.

Semboller ve Kısaltmalar

e	Özgül Ekserji [kJ/kg]
$\dot{E}_{eks,yok}$	Ekserji Yok oluşu [kW]
h	Entalpi [kJ/kg]
$\dot{m}$	Kütlesel debi [kg/s]
P	Basınç [kPa]
ORÇ	Organik Rankine Çevrimi
$\dot{Q}$	Isı [W]
T	Sıcaklık [K]
T_0	Ölü hal sıcaklığı [K]
P_0	Ölü hal basıncı [kPa]
$\dot{W}$	Güç [kW]
$\dot{W}_{net}$	Çevrimden elde edilen net güç [kW]

Yunan Harfleri

ε	Etkinlik [-]
$\eta_{türb,s}$	Türbinin izantropik verimi [-]
$\eta_{pompa,s}$	Pompanın izantropik verimi [-]
$\eta_{ısıl}$	Isıl verim [%]
η_{eks}	Ekserji Verimi [%]

Örnektir

Alt İndisler

buh	Buharlaştırıcı
ç	Çıkış
g	Giriş
k	Kaynak
rek	Reküperatör
orç	Organik rankine çevrimi
türb	Türbin
yoğ	Yoğuşturucu

Örnektir

5. KAYNAKÇA

Bell, I. Wronski, J. Quoilin, S. & Lemort, V. 2014. Pure and pseudo-pure fluid ther- mophysical property evaluation and the open-source thermophysical property library CoolProp. *Industrial & Engineering Chemistry ResearchVolume*, 53 (6), 2498–2508.

Braimakis, K & Karellas, S. (2018). Energetic optimization of regenerative Organic Rankine Cycle (ORC) configurations. *Energy Conversion and Management*, 159, 353–370.

Çengel, Y.A. & Boles, M.A. (2011). *Termodinamik: Mühendislik Yaklaşımıyla* (5. Baskı) (A. Pınarbaşı, Çev.). İzmir Güven Kitapevi.

Eisavi, B. Khalilarya, S. Chitsaz, A. & Rosen, M.A. (2018). Thermodynamic analysis of a novel combined cooling, heating and power system driven by solar energy. *Applied Thermal Engineering*, 129, 1219–1229.

Haghghi, M.A. Pesteei, S.M. Chitsaz, A. & Hosseinpour, J. (2019). Thermodynamic investigation of a new combined cooling, heating, and power (CCHP) system driven by parabolic trough solar collectors (PTSCs): A case study. *Applied Thermal Engineering*, 163, 114329.

Javed, S. & Tiwari, A.K. (2023). Performance assessment of different Organic Rankine Cycle (ORC) configurations driven by solar energy. *Process Safety and Environmental Protection*, 171, 655–666.

Khaliq, A. Mokheimer, E.M.A. & Yaqub, M. (2019). Thermodynamic investigations on a novel solar powered trigeneration energy system. *Energy Conversion and Management*, 188, 398–413.

Örnektir

Nondy, J. & Gogoi, T.K. (2021). Exergoeconomic investigation and multi-objective optimization of different ORC configurations for waste heat recovery: A comparative study. *Energy Conversion and Management*, 245, 114593.

Örnektir

BINDER JETTING ADDITIVE MANUFACTURING PROCESS [1]

Ali BALBAY[2]

İlhan ASİLTÜRK[3]

1. INTRODUCTION

Today, industrial manufacturing has entered a new era aimed at facilitating the production of complex and customized parts, enabling rapid prototyping, and minimizing material waste. One of the key players in this era has been a technology known as Additive Manufacturing.

Additive manufacturing enables the production of parts with a level of complexity that cannot be achieved by any other manufacturing method. This technology is based on the principle of layer-by-layer material deposition, allowing designers and engineers to move beyond the limitations of conventional manufacturing processes.

Additive manufacturing is a production method that uses metal powders and 3D model data to create parts with complex geometries. Unlike traditional manufacturing techniques, where materials are first produced and then shaped, processed, or finished, additive manufacturing directly builds parts from metal

1 This was produced from the doctoral seminar of Necmettin Erbakan University, Department of Mechanical Engineering, titled "Binder Jetting Additive Manufacturing Process.".

2 Lecturer, Ostim Technical University, Vocational School, Mechanical Program, ali.balbay@ostimteknik.edu.tr, ORCID: 0000-0002-6517-1201.

3 Professor, Necmettin Erbakan University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, iasilturk@erbakan.edu.tr, ORCID: 0000-0002-8302-6577.

powders. One of the significant advantages of this method is the ability to produce highly complex and custom designs at a low cost and with high precision. The metal powders used in this process can include titanium, stainless steel, aluminum, copper, steel, cobalt-chrome, and titanium-nickel alloys. Additive manufacturing is considered a revolutionary technology, particularly in industries such as aerospace, automotive, healthcare, and other industrial sectors (Koike et al., 2011).

3D (Three-Dimensional) printers are among the most significant engineering products of modern technology. First developed in 1984 by Dr. Charles Hull, 3D printing technology was used exclusively in the field of rapid prototyping until 2006 (Gao et al., 2015).

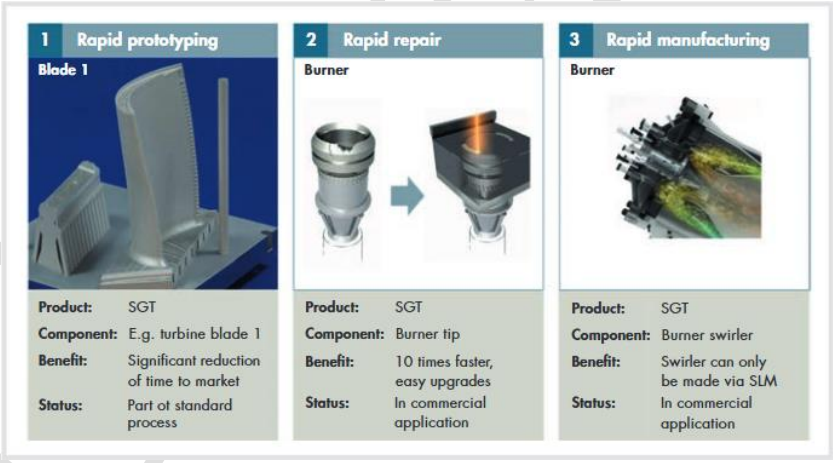


Figure 1. Products Manufactured Using Additive Manufacturing Technologies.

Reference: Navrotsky et al., 2015.

2. ADDITIVE MANUFACTURING

Additive manufacturing emerged in the early 1980s as a manufacturing method developed to enable prototype production of products or materials. Over time, the functionality of this method was enhanced, and it began to hold a significant position in the manufacturing industry. The additive manufacturing method differs from traditional manufacturing methods through its advantageous features, such as the ability to easily produce complex parts and generate minimal waste material (Demiray et al., 2018).

2.1. History of Additive Manufacturing

The origin of 3D printing dates back to the late 1970s, but the first instance of a solid object being printed occurred in 1982 by Hideo Kodama. The first 3D printer was produced in 1984 by Charles Hull, the founder of 3D Systems Corp. Due to the technology of that time, 3D printers were large in size and expensive, thus primarily used for prototype production. In 1988, the technologies of Selective Laser Sintering (SLS) and Fused Deposition Modelling (FDM) were developed for the first 3D printers capable of producing colored prints. 3D printers entered the market in 1995. The first high-resolution 3D printer was designed by Z Corporation in 1996. In the 21st century, with technological advancements and the reduction of production costs, 3D printing became widespread. In 2007, the first open-source 3D printers, under the name Regrap, were released. With open-source code, 3D printers began to develop further. In 2008, Object Geometries Company developed the Connex500 model, capable of producing products using different materials simultaneously. Starting from 2009, 3D printers, initially used mainly in industries, began to be used in homes with models such as Cubify developed by Makerbot and 3D Systems (Shellabear et al., 2004; Alcisto et al., 2011).

2.2. Additive Manufacturing (3D Printing) Process Steps

AM technology is a manufacturing method that enables the transformation of digital data into a physical object. In the first stage of the process, the desired part is designed in detail using computer-aided design (CAD) software. Once the design is complete, the 3D model is sliced, converted into STL format, and then the printing process begins. These steps ensure that the physical product is produced in full alignment with the digital data (Sürmen, 2019).

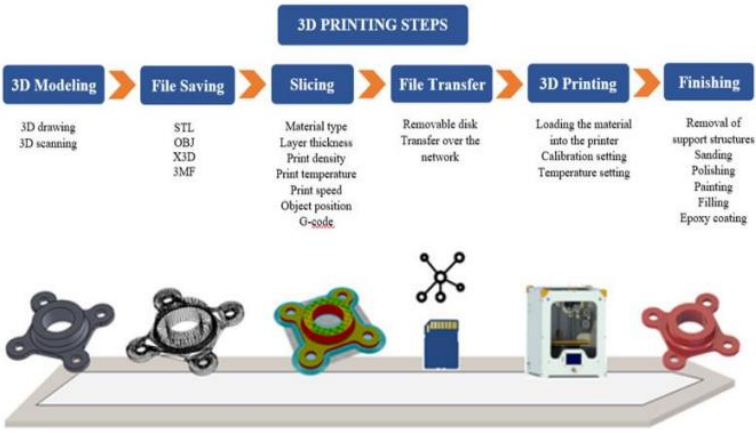


Figure 2. Additive Manufacturing Process Steps.

Reference: Özmen and Ertek, 2022.

3. CLASSIFICATION OF ADDITIVE MANUFACTURING

In general, additive manufacturing is classified based on the form of the material used for production. The material used can be in the form of melt, powder, wire, or sheet, and the solidification of the produced object during manufacturing

occurs according to the material form, respectively, through melt solidification and solid-state bonding.

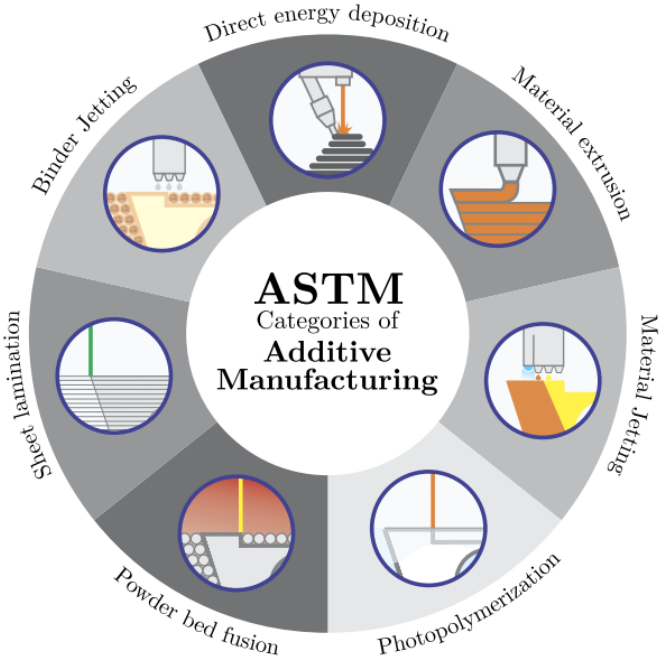


Figure 3. ASTM Categories of Additive Manufacturing.

Reference: Amaya-Rivas et al., 2024.

Essentially, the ASTM additive manufacturing group has categorized this dynamic and high-tech manufacturing method into seven categories under the ASTM F42 standard (Annual Book of ASTM Standards, 2012).

These are:

- Photopolymerization
- Material Jetting
- Binder Jetting
- Material Extrusion

- Powder Bed Fusion
- Sheet Lamination Process
- Directed Energy Deposition

Systematically, these methods are shown in Figure 3. In this section, additive manufacturing technologies are examined under the seven subheadings specified in the ASTM F42 standard (Yalçın and Ergene, 2017).

3.1. Photopolymerization

It is a chemical process in which polymerization occurs through chemical reactions under the influence of light. This process is found in many applications that use special components or materials known as photopolymers. Photopolymerization is considered an ideal option for many industrial and medical applications that require fast and precise polymerization (Duman and Kayacan, 2016).

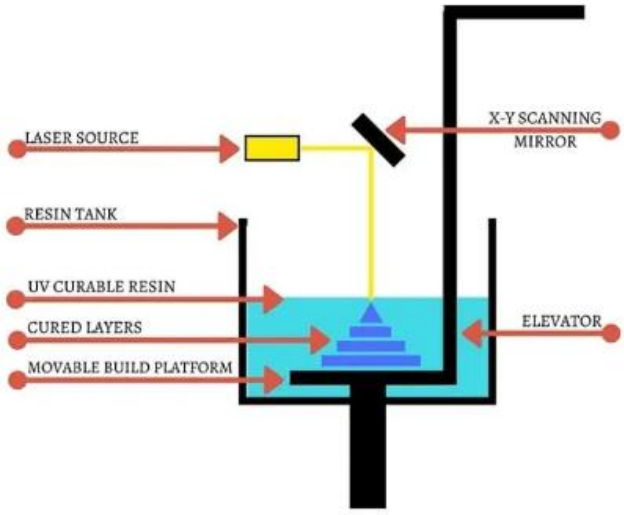


Figure 4. Photopolymerization Working Principle.

Reference: Budinski et al., 2019.

3.2. Material Jetting

In this method, liquid or molten wax-like materials are sprayed and cured by moving heads similar to inkjet printers, creating the desired shape in a controlled manner. The main advantage of this method is that it allows for the easy creation of precise and smooth surfaces; however, it is a relatively fragile and time-consuming manufacturing process.

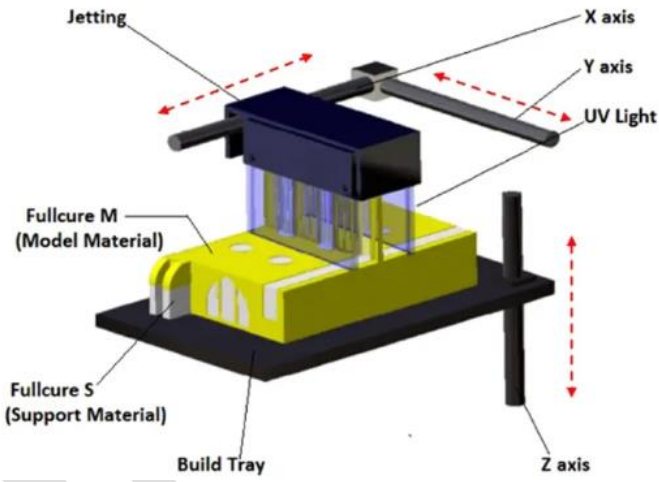


Figure 5. Material Jetting Working Principle.

Reference: Udroiu and Nedelcu, 2011.

3.3. Material Extrusion

The method is commonly preferred for polymer materials. Therefore, thermoplastic materials are generally used as the main material, often in filament form.

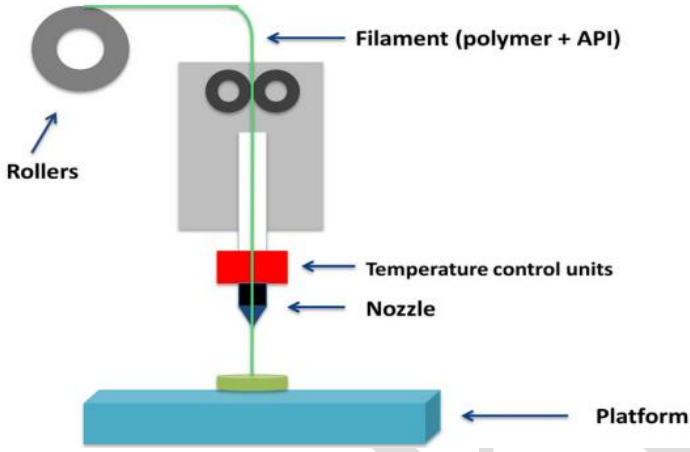


Figure 6. Material Extrusion Working Principle.

Reference: Budinski et al., 2019.

Acrylonitrile butadiene styrene (ABS) and polylactic acid (PLA) are commonly used thermoplastic polymers for this method. Initially, the polymers are heated above their glass transition temperatures. In a semi-molten state, they are fed in filament form to the extruder and then pushed through a nozzle. The filament is deposited onto the surface, cooling and solidifying as it is laid down by the movement of the extrusion head. After the first layer is completed, the platform lowers, and the process repeats until the build is complete (Figure 6). Layer thickness and nozzle diameter are critical parameters for this method. The method offers several advantages, especially for polymer materials, including high printing resolution and design flexibility (Pranzo et al., 2018). In recent years, material extrusion has shown particular promise for the healthcare industry, where it is used in various applications, such as cell-loaded bio-inks that mimic natural tissues (Placone and Engler, 2018).

3.4. Powder Bed Fusion

The basic principle of powder bed fusion methods is based on scanning a thin layer of powder with a laser energy source. Layered manufacturing is achieved by repeating this process. It includes the SLS (Selective Laser Sintering), SLM (Selective Laser Melting), and EBM (Electron Beam Melting) methods.

3.4.1. Selective Laser Melting- SLM

In the first stage of the SLM (Selective Laser Melting) method, a thin layer of powder is spread over the movable platform. The working principle of the method involves shaping the powder layer through laser scanning. Selected areas are melted under the laser beam. While the melted powder supports the structure, the molten material forms the object. As the temperature decreases, the melted material begins to solidify. Once a layer is complete, the movable plate descends, and a new layer of powder is spread by a recoater (a roller or blade). This creates a layered structure through laser energy. Once the process is complete and the part is formed, excess powder is removed. The remaining powder can be reused, allowing for the recycling of residual material (Kruth et al., 2005; Bozkurt et al., 2021).

3.4.2. Selective Laser Sintering- SLS

The SLS (Selective Laser Sintering) method uses laser energy to turn powdered material into a solid part. Initially, a thin layer of powder is spread and begins heating under laser energy. Partial sintering occurs at the points where the laser beam hits the powder surface, causing the powders to bond with adjacent particles and form a solid structure (Figure 7) (Stansburg and Idacavege, 2016).

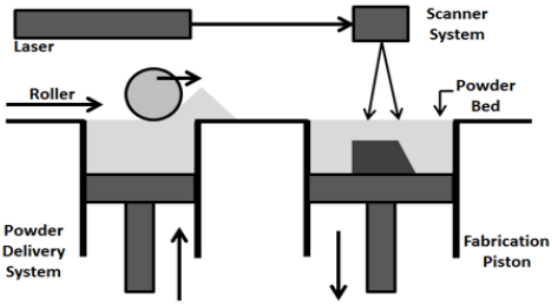


Figure 7. Selective Laser Sintering (SLS) Working Principle.

Reference: Serin et al., 2016.

3.5. Sheet Lamination Process

Sheet lamination includes Laminated Object Manufacturing (LOM) and Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM) technologies. In ultrasonic additive manufacturing, metal sheets or strips (such as metals, aluminum, copper, stainless steel, titanium, etc.) are laminated layer by layer and bonded using ultrasonic welding. Metal materials cannot be removed by hand, and additional CNC machining may be required to remove unwanted materials from the structure (Parupelli and Desai, 2019).

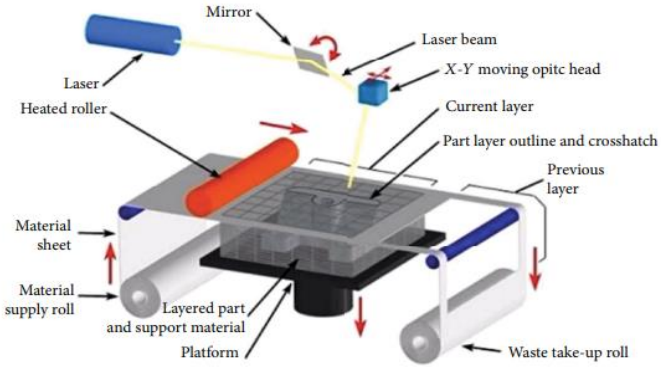


Figure 8. Sheet Lamination Process.

Reference: Wang and Yang, 2021.

High-tech companies utilize this technology to meet rapid 3D production needs. This method is divided into two categories based on the type of material used: Direct Energy Deposition (DED), which employs powder or wire feedstock materials. 3D printer operating with the DED method is typically equipped with a nozzle mounted on a multi-axis arm. This nozzle precisely deposits the molten material onto the desired point on the deposition surface. The basic working principle of the Direct Energy Deposition method is illustrated in Figure 9.

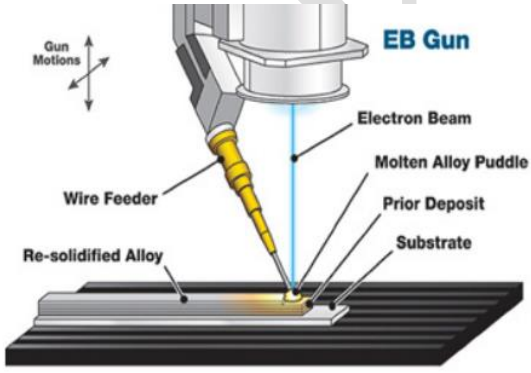


Figure 9. Direct Energy Deposition Method.

Reference: Bonifaz and Mena, 2021.

This method is similar to the molten deposition technique, as the nozzle can move not only along the X and Y axes but also in multiple directions. Since it can be used with 4-5 axis machines, material can be deposited at various angles. While this technology is generally used for metal 3D printing, it can also be applied to polymers. During the Direct Energy Deposition process, a wire feeder and an electron beam work simultaneously to deposit material layer by layer. This process can be performed in an open environment or within a closed gas chamber with inert gas protection. Compared to powder-based

Direct Energy Deposition, this method stands out for its higher deposition rates.

This method enables layer deposition ranging from 0.1 mm to several centimeters. Laser Engineering Net Shaping (LENS) is one of the latest applications of this technology. This method allows additional material to be applied to an existing part, making it particularly useful for repairing expensive metal products. It stands out for its high flexibility in areas requiring regular maintenance.

4. BINDER SPRAYED ADDITIONAL MANUFACTURING PROCESS

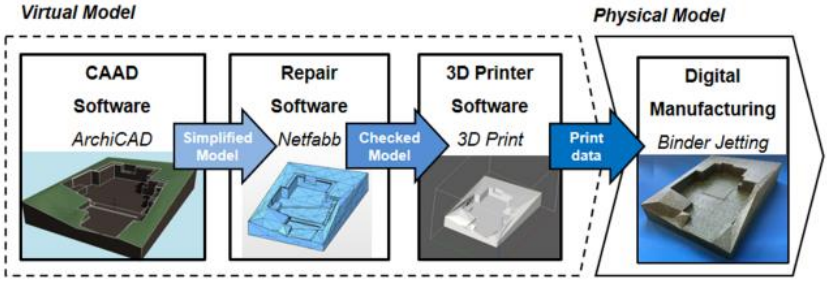


Figure 10. Application of the process chain for the Direct Digtial Manufactur of a Model.

Reference: Junk et al., 2019.

The basic working principle of this method involves spreading a layer of metal powder from the powder feeder unit onto the build volume (powder bed), followed by the spraying of binder resin onto the metal powder. As a result of the spraying process, the desired geometry is obtained in two dimensions, and the manufacturing process is completed for one layer. The process steps are repeated until the final layer is reached to produce the final part. The manufacturing process is shown in Figure 10 (Saltık and Özsoy, 2020).

Since the material is in powder form, there is no need for any support structures. Any material that can be obtained in powder form can be converted into a product with the desired geometry using this method. Figure 11 shows a schematic view of the binder jetting additive manufacturing machine.

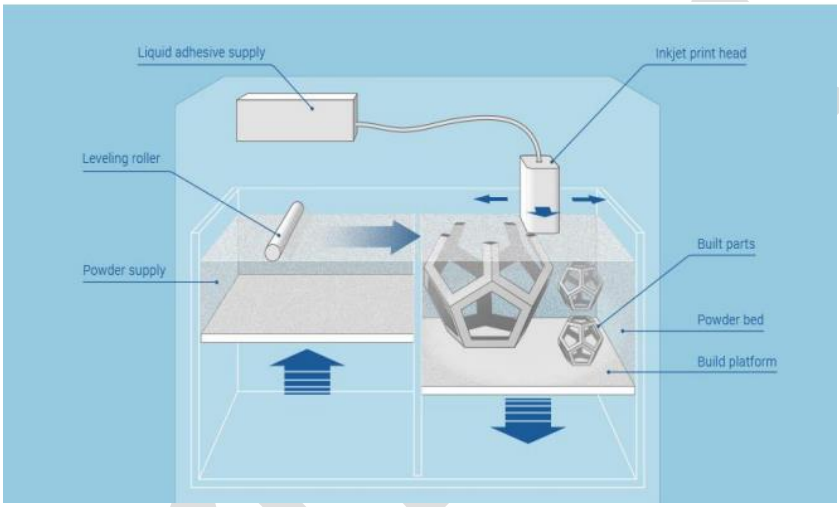


Figure 11. Schematic Representation of the Binder Jetting Additive Manufacturing Machine.

Reference: Zhai et al., 2014.

4.1. Materials Used in Binder Jetting Additive Manufacturing

4.1.1. Powder Feedstock

The powder feedstocks used in binder jetting additive manufacturing can consist of different metals, ceramics, or polymers, depending on the final properties and application of the product. Some of these materials include:

Metal Powders: Common materials used in the production of metal parts include titanium, stainless steel,

aluminum, nickel, iron, cobalt, and copper. Metal powders are used in industrial applications, including aerospace, automotive, defense, and medical device manufacturing.

Ceramic Powders: Ceramic powders are used in the production of ceramic parts. These materials have high-temperature resistance, chemical durability, and insulation properties. Ceramic powders are used in areas such as electrical insulation, thermal insulation, and space applications.

Polymer Powders: Polymer powders are used in the production of plastic parts. These materials include plastics such as polyethylene, polypropylene, polyamide (nylon), polycarbonate, and polyurethane. Polymer powders are commonly used in the production of medical devices, automotive parts, and consumer goods.

Ceramic-Metal Mixtures: In some applications, mixtures of ceramic and metal powders are used. These mixtures combine the durability of ceramics with the strength of metals. For example, ceramic-metal mixtures can be used in applications like cutting tools.

Composite Materials: Composite powders are made from a combination of different materials. For example, carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) powders are used to produce lightweight, high-strength parts.

The choice of powder feedstock depends on the product's function, durability requirements, and end-use purpose. Binder jetting additive manufacturing enables the production of complex and customized parts using these different powder materials.

4.1.2. Binders

The second material used in the process is binders. Binders ensure the adhesion of powder feedstocks. Binders can

be classified into organic and inorganic types. Organic binders are more commonly preferred in studies because they have high pyrolysis and removal properties, leaving minimal residue behind. This is particularly desirable. The properties of binders, such as viscosity, surface energy, volatility, cost, and wettability, should be considered individually (Utela et al., 2008)

In binder jetting additive manufacturing, selecting the most suitable binder for binding different types of powder feedstocks is of great importance for the manufacturing process and subsequent operations.

5. CONCLUSION

The use of 3D printing technologies, which enable the production of parts with complex and free-form geometries that are difficult to manufacture using traditional methods, does not require production line setup or mold manufacturing. These technologies reduce operation time waste minimization, flexibility, and allow designs to quickly transform into products, and they are increasingly being adopted across various fields such as automotive, aerospace, education, medical/biomedical, food, and entertainment. It gives a great opportunity for rapid prototyping, free dimension, time and cost-saving production. These days, many companies are using to different type additive manufacturing technologies to take advantage of the benefits it offers.

With the fourth industrial revolution (Industry 4.0), the digitalization of production processes and the transformation of production lines will enable additive manufacturing to spread on a large scale. Industry 4.0, also known as smart industry, includes components such as the Internet of Things, Internet of Services, big data, cloud computing, and cyber-physical

systems; these components are highly compatible with 3D printers. The rapidly growing 3D printing sector is expected to reach a market size of 21 billion dollars by 2020 (Niaki and Nonino, 2018).

Based on the discussion and literature presented in this review chapter, future studies could be undertaken to study the various technologies of AM in detail and compare their sustainability potential, cost and role in implementing Industry 4.0.

Future studies could be organized in a manner to stress on a particular application and exploit the potential of AM particularly in aerospace, biomedical science. Also, further studies that aim to find the relationship between different AM processes and sustainable, environment-friendly technologies.

örnektir

6. REFERENCES

Alcisto, J., Enriquez, A., Garcia, H., Hinkson, S., Steelman, T., Silverman, E., Valdovino, P., Gigerenzer, H., Foyos, J., Ogren, J., Dorey, J., Karg, K., McDonald, T., and Es-Said, O. S., (2011) "Tensile Properties and Microstructures of Laser-Formed Ti-6Al-4V", JMEP, 20(2), p 203–212.

Amaya-Rivas, J. L., Perero, B. S., Helguero, C. G., Hurel, J. L., Peralta, J. M., Flores, F. A., & Alvarado, J. D. (2024). Future trends of additive manufacturing in medical applications: An overview. Heliyon.

Bonifaz, E. A., & Mena, A. (2021). Directed Energy Deposition Additive Manufacturing Process Simulated with ABAQUS AM Modeler. Int J Robot Eng, 6(1).

Budinski, N., Lavicza, Z., Vukić, N., Teofilović, V., Kojić, D., Erceg, T., & Budinski-Simendić, J. (2019). Interconnection of materials science, 3D printing, and mathematics in interdisciplinary education. STED Journal, 1(2), 21-30.

Demiray, M. A., Şekerci, B., Saltık, O., Kayacan, M.C., (2018). Materials Used in Additive Manufacturing Methods, 4th International Congress on 3D Printing (Additive Manufacturing) Technologies and Digital Industry, Antalya, 274-284.

Duman B, Kayacan M.C.. "Development of Manufacturing Software for Selective Laser Sintering Systems," SDU International Journal of Technologies Science 2016;8(3):27-45.

Örnektir

Electron Beam Additive Manufacturing. (n.d.). Accessed on September 24, 2023, https://www.sciaky.com/additive-manufacturing/electron-beam-additive-manufacturing-technology.

Junk, S., Niederhüfner, M., Borkowska, N., & Schrock, S. (2019). Direct Digital Manufacturing of Architectural Models using Binder Jetting and Polyjet Modeling. Proceedings of Architecture in the Age of the 4th Industrial Revolution, 1, 451-456.

Koike M, Greer P, Owen K et al. (2011) Evaluation of titanium alloys fabricated using rapid prototyping technologies - electron beam melting and laser beam melting. Materials; 4: 1776–1792.

Konta A.A., Pina M.G., Serrano D.R., "Personalised 3D printed medicines: Which techniques and polymers are more successful?", Bioengineering, 2017, 4:1-16.

Kruth J.P., Mercelis P., Vaerenbergh J.V., Froyen L., Rombouts M.J., "Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting," Journal of Rapid Prototyp., 2005, 11(1): 26-36.

M. K. Niaki and, F. Nonino, 2018, The Management of Additive Manufacturing. Birmingham: Springer.

Navrotsky, V., Graichen, A., & Brodin, H. (2015). Industrialisation of 3D printing (additive manufacturing) for gas turbine components repair and manufacturing. VGB PowerTech, 12, 48-52.

Özmen, E., & Ertek, C. (2022). Eklemeli İmalat Teknolojilerinde Kullanılan Biyomalzemeler ve Biyomedikal Uygulamaları. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 10(4), 733-747. https://doi.org/10.29109/gujsc.1150799.

Örnektir

Placone J.K., Engler A.J., “Recent advances in extrusion-based 3D printing for biomedical applications,” Adv. Healthcare Mater., 2018, 7(8): 9-11.

Pranzo D., Larizza P., Filippini D., Percoco G., “Extrusion-based 3D printing of microfluidic devices for chemical and biomedical applications: A topical review,” Micromachines, 2018, 9(8): 374.

Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus,J., Engel, P., and Harnisch M. (2015). Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries, The Boston Consulting Group (BCG).

S.K. Parupelli and S. Desai, “A comprehensive review of additive manufacturing (3D printing): Processes, applications and future potential,” American Journal of Applied Sciences, vol. 16, no. 8, pp. 244-272, 2019.

Saltık, O. & Özsoy, A. (2020). Binders Used in Binder Jetting Metal Additive Manufacturing. Uluborlu Vocational Sciences Journal, 3 (1), 10-18. Retrieved from https://dergipark.org.tr/tr/pub/umbd/issue/58566/831113

Serin, G., Kahya, M., Unver, H. O., Gulec, Y., Durlu, N., & Erogul, O. (2016, July). A review of additive manufacturing technologies. In 17th International Conference on Machine Design And Production. Bursa.

Shellabear, M., Lenz, J., and Junior, V., “E-manufacturing with Laser Sintering—to Series Production and Beyond, in: Proceedings of the Fourth Laser Assisted Net Shape Engineering”, (2004), vol. 1, September, Erlangen, Germany, pp. 435–444.

örnektir

Stansbury J., Idacavage M., “3D Printing with Polymers: Challenges Among Expanding Options and Opportunities,” Dent. Mater., 2016, 32: 54-64.

Udroiu, R., & Nedelcu, A. (2011). Optimization of additive manufacturing processes focused on 3D Printing. Rapid Prototyping Technology-Principles and Functional Requirements.

Utela, B., Storti, D., Anderson, R., Ganter, M., (2008). A Review of Process Development Steps for New Material Systems in Three Dimensional Printing (3DP). Journal of Manufacturing Processes, 10, 96-104.

W. Gao, Y. Zhang, D. Ramanujan, K. Ramani, Y. Chen, C.B. Williams, C.C.L. Wang, Y.C. Shin, S. Zhang, and P.D. Zavattieri, (2015) “The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering,” Computer-Aided Design, vol. 69, pp. 65-89.

Wang, Z., & Yang, Y. (2021). Application of 3D printing in implantable medical devices. BioMed Research International, 2021(1), 6653967.

Y. Bozkurt , H. Gülsoy and E. Karayel , "The Use of Additive Manufacturing Technologies in the Production of Medical Equipment", El-Cezeri, vol. 8, issue. 2, pp. 962-980, May. 2021, doi:10.31202/ecjse.902023

Zhai, Y., Lados, D. A., & LaGoy, J. L. (2014). Additive manufacturing: making imagination the major limitation. Jom, 66, 808-816.

A REVIEW OF LAMINATED COMPOSITE FILMS

Sakine KIRATLI[1]

1. INTRODUCTION

The demand for economic, durable, efficient, recyclable, and sustainable materials is increasing day by day. Economic and environmental concerns have directed research toward materials that exhibit these features. Materials are produced to meet various expectations depending on their intended use. Composite materials, which belong to the modern class of materials, have found applications in almost every industry due to their wide range of uses. Although these materials are classified into various groups based on their different properties, composite films occupy a significant place in the industry. This review provides a general overview of laminated composite films. Recent studies on their manufacturing methods, application areas, mechanical performance, and structural design are examined. Furthermore, the advantages and disadvantages of these films are discussed. In the future, advances in nanotechnology and production methods will lead to the development of higher-grade composite films that can be used in nearly every sector.

Composite materials, formed by combining two or more substances, exhibit superior mechanical, physical, chemical, and other properties compared to their individual components. They are an indispensable class of materials due to their existing and

1 Asst.Prof.Dr., Çankırı Karatekin University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, skiratli@karatekin.edu.tr, ORCID: 0000-0001-6292-5605

evolving structures. In particular, fiber-reinforced polymer matrix composites have been used in various engineering structures for many years.

Laminated composite films are thin and lightweight structures formed by stacking different materials on top of each other. They consist of multiple layers and numerous interfaces. These materials possess various properties, such as mechanical durability, flexibility, thermal and electrical conductivity, waterproofing, and corrosion resistance, which make them applicable across many industries. However, due to differences in the elastic modulus, Poisson's ratio, and thermal expansion coefficient of each layer, residual stresses develop in these films. These stresses reduce the adhesion strength of the films, leading to lower efficiency and a shorter service life **[1]**. Ongoing research focuses on overcoming these drawbacks to enhance the efficiency of composite films.

Advances at the nanoscale continue to have a rapid impact on materials, as in every other field. Nanomaterials significantly enhance various properties of composite films. For example, nanofibers improve thermal properties in applications such as hygroelectric generators, battery separators, and electromagnetic interference shielding **[2]**. Nanoclays are used as flame retardants in the plastics industry due to their low cost and recyclability **[3]**. In their study, Wang et al. introduced a carbon nanotube interlayer between a flexible layer and a copper film, preventing crack initiation **[4]**. Carbon nanotube-epoxy thin films have been studied for use as protective materials due to their high toughness. Carbon nanotubes are employed in these films because of their exceptional properties, such as high strength, elastic modulus, thermal conductivity, and electrical conductivity **[5]**. Chen et al. developed a three-component composite film composed of fluorographene nanosheets, polyvinyl alcohol, and Ti_3C_2Tx MXene, which demonstrated

high thermal conductivity, excellent mechanical properties, and electrical insulation **[6]**.

Boron nitride has a wide range of applications due to its properties such as high thermal conductivity, electrical insulation, chemical stability, hardness, and optical transparency. These properties have led to intense research by scientists. For example, in microelectronics, high-performance, thermally conductive, and electrically insulating boron nitride nanosheets have been used to develop ethylene-vinyl acetate polymer composite films for both thermal management and mechanical flexibility **[7]**. In their study, Wei et al. improved the thermal conductivity and tensile strength properties of boron nitride/aramid nanofiber composite films **[2]**. Yang et al. prepared boron nitride nanosheet/polyurethane composite films using a solution mixing method and enhanced the thermal conductivity and electrical insulation properties by modifying the boron nitride nanosheets **[8]**. Liu et al. found that boron nitride nanosheet/polyetherimide composite films prepared using the solution casting method exhibited improved energy storage performance at high temperatures **[9]**. Another study improved the mechanical properties and thermal conductivity of boron nitride nanosheet/epoxy composite films **[10]**. Boron nitride nanosheets/ethylene-vinyl acetate copolymer composite films with a laminated structure were produced using a vacuum-assisted production method, enhancing mechanical properties and thermal conductivity **[11]**. A composite film with a directed heat transfer network was prepared by combining boron nitride modified polyethyleneimine, cellulose nanofiber, and polyvinyl alcohol as a thermal conductor. **[12]**. Additionally, a composite film with a directed heat transfer network was created by combining boron nitride-modified polyethyleneimine, cellulose nanofibers, and polyvinyl alcohol as a thermal conductor **[12]**.

Additionally, due to advancements in electronics and sensing technologies, piezoelectric composite films have been proposed. These films have found applications in biosensors and smartwatches, as they help enhance the functionality of wearable electronic devices, making our lives easier **[13]**.

In many studies, composite films have been created by combining various components without the use of fibers, and their analyses have been conducted to cater to various applications, such as mobile phones. Specifically, the high insulation properties, good flexibility, low cost, and ease of large-scale production of polymer films have demonstrated their suitability for capacitors **[10]**. Furthermore, high-temperature polymers such as polyphenylindazole (PBI), polyetherimide (PEI), polyimide (PI), and polyether ether ketone (PEEK) have been used to develop sensors that can withstand high temperatures **[10].** In some applications, films (e.g., Teflon, PEEK, PVF, Tedlar) have been applied as coating materials on laminated composites made from various fibers, and various properties such as moisture resistance and surface hydrophobicity have been studied **[14]**.

A laminated composite film has been proposed for photochemical and optoelectronic applications that are sensitive to sunlight **[15]**. Composite films that can be applied in the manufacturing of self-sensing actuator devices have also been developed, and their electroactive properties have been investigated **[16]**. Additionally, composite films with thermal conductivity have been created to provide flame retardant and water resistance properties **[17]**.

Materials inspired by nature are also available. Graphene oxide composite films with flame retardant properties, inspired by sepiolite, have been produced. Reduced graphene oxide, halloysite nanotubes, and flame retardant modified lignin have

been combined to produce the composite film. Lignin is the second most abundant biopolymer. The excellent integrated properties of lignin films promote their application as structural materials in aerospace engineering and artificial muscles **[18]**.

The reverse engineering approach has enabled the intense integration of devices such as 3D printers and 3D scanners into our daily lives. In this context, the production method using 3D technology is becoming increasingly popular. This method provides users with design freedom while also enabling the production of highly complex parts. Flexible Ag_2Se/polyvinylidene fluoride composite films have been produced using 3D printing. These films demonstrate thermal energy conversion and electromagnetic shielding properties due to their dielectric characteristics **[19]**. Good flexibility and electrical conductivity are offered by flexible black phosphorus nanosheet/PEDOT:PSS (BP/PP) thermoelectric composite films, which are made utilizing 3D printing technique with BP and PP serving as the filler and matrix materials, respectively **[20]**. 3D-printed thermoelectric composite sheets of polyvinyl alcohol (PVA)/poly(3,4-ethylenedioxythiophene):
poly(styrenesulfonate) exhibit improved electrical conductivity and flexibility **[21]**.

This study provides a general review of polymer matrix-based composite films. It outlines the components that make up these films, the techniques involved in the manufacturing processes, and the characterization methods. Published studies have examined the effects of nanoparticles, fibers, and polymers on the mechanical, thermal, and electrical properties of composite films produced through various manufacturing methods. Specifically, nanoparticle-reinforced films, piezoelectric films, films used as coatings, nature-inspired films, films produced using 3D technology, and biopolymer-based films have been investigated. As a result, potential areas for

future research are being evaluated based on current studies. These areas are considered crucial for realizing the full potential of composite films in packaging and other applications.

2. APPLICATION FIELDS

Composite materials are functional in many sectors of our lives. In particular, composite films are used in packaging, electronics, medical applications, automotive, coatings, energy storage, smart packaging, and construction materials.

In today's world, where concepts like environmental pollution, sustainability, and recycling have gained importance, biodegradable packaging that eliminates the negative effects of petroleum-based plastics, extends shelf life, and ensures food safety is becoming more prevalent. Food safety is particularly important in preventing food spoilage during storage and transportation. In this context, composite films made with biopolymers are used in the food industry **[22]**. Food biopolymers (such proteins and polysaccharides) and other functional ingredients (including lipids, phospholipids, and inorganic particles) are commonly used to create biodegradable packaging **[23]**.

Controlling the transfer of oxygen and moisture and extending the shelf life of products is particularly important for the food industry. These properties can be achieved through laminated composite films in packaging **[24]**. Therefore, in recent years, composite films based on chitosan reinforced with ramie fiber and lignin **[25]**, gelatin and chitosan-based composite films **[26]**, and bio-based composite films made from polylactic acid/cellulose nanocrystal mixtures **[27]** have been produced and studied for various properties.

Laminated composite films are used in OLED screens to minimize electronic devices and enhance their functionality. Additionally, they are being studied as coating materials with insulating properties for other electronic components **[28]**. In medical applications, these films are used in covers and medical device coatings for sterilization and protection **[29]**.In the automotive industry, laminated films are used for both aesthetic and functional purposes, such as in-vehicle coatings and insulation **[30]**. Antibacterial or self-cleaning coatings are applied as functional coatings in various industrial and consumer products **[31]**. Laminated composite films are also used in energy storage devices, such as batteries and supercapacitors. These films are designed to improve energy storage and transmission properties **[32]**. For energy storage applications, literature has reported the preparation of poly(methyl methacrylate)-based ferroelectric/dielectric laminated composite films **[33]**. Additionally, composite films made from silicon micro-particles and cellulose have been used to produce flexible high-frequency diodes **[34]**. Smart packaging systems, using laminated films, can monitor the condition of products and perform quality control. For example, some smart packaging films contain sensors that monitor the temperature and humidity conditions of products **[35]**. Laminated composite films are also used in the construction industry for functions such as insulation, waterproofing, and surface coating. These films enhance the durability and energy efficiency of buildings **[36]**.

3. MANUFACTURING OF COMPOSITE FILMS

The right component selection, film forming methods, and preparation conditions are necessary to create packaging materials with adequate functional qualities **[37, 38]**. In their study, Erden and Yıldız produced a prepreg composite film

using carbon filaments and a thermoplastic resin, polyamide, and they investigated the stages and materials involved in the production process **[39].**

The literature indicates that layer-by-layer (LbL), electrohydrodynamic, and coextrusion techniques are the most often used ways for producing multilayer packaging materials, whereas extrusion and solution casting are the most widely used techniques for producing composite packaging materials **[40]**.

Layer-by-layer (LbL) assembly: The LbL approach offers a number of possible benefits as compared to alternative production procedures for creating multilayer packaging. The method of preparation is easy and affordable. The physicochemical and structural characteristics (such as composition, thickness, and charge) can be changed to produce films with various functional properties by choosing materials that form films in various types, numbers, and sequences. It is possible to make multilayer films or coatings for foods of different forms in addition to flat surfaces **[40]**. Electrostatic attraction, hydrogen bonding, hydrophobic attraction, or entanglements between molecules in adjacent layers are the foundations of the layer-by-layer (LbL) approach. This technique often entails the sequential deposition of multiple film-forming ingredients onto a surface in order to create multilayer films or coatings **[41]**.

Electrohydrodynamic process: In the electrohy drodynamic technique, a high-voltage electric field is used to spray polymer solutions into microscale or nanoscale fibers or particles. In the electrohydrodynamic process, electrospinning and electrospraying are the two most often employed techniques **[42]**. For various culinary applications, the packaging created by electrospinning tends to have a large specific surface area, high porosity, and high polymer orientation **[43]**.

Similar to electrospinning, electrospraying operates. Biodegradable films are better made by electrospinning, but biodegradable coatings are better prepared by electrospraying.

Coextrusion. By heating two or more distinct types of polymer materials over their glass transition temperature and then extruding them individually through a specially made nozzle, the coextrusion process can be used to create films with multilayer structures **[44]**. The four primary processes of the coextrusion process are typically feeding, melting, stream confluence, and coextrusion. Coextrusion can be classified into two primary types: die and feed block, depending on how the various polymer streams are combined during the film-forming process **[45]**. Die coextrusion is a process in which two or more materials are heated and fed into the extruder independently. The melt streams from the various materials are then combined at the die's exit (Figure 2c). Because of its low energy usage and comparatively short processing time, this approach is advantageous for commercial applications.

Furthermore, biodegradable composite films can be made in two ways. Films from solids are made via extrusion, whereas films from solutions are made by solvent-casting **[46]**.

Extrusion

> *For the preparation of packaging, the extrusion process mainly makes use of the thermoplastic qualities of polymer materials. This process involves heating a low-moisture solid above its glass transition temperature to create a melt, mixing it well, and then passing it through a nozzle that is the right shape. After that, the resultant substance is cooled to create a film [40].*

Solvent-casting

The three stages of this process are drying, mold casting, and solution preparation [47]. Choosing and combining the additives and other ingredients is part of the solution preparation process. After that, the liquid is placed into the proper mold and allowed to cure by evaporation or simple air drying. The solvent casting method is inexpensive and doesn't require complicated equipment. Moreover, the absence of high-temperature heating stops heat-sensitive active ingredients from degrading. Nevertheless, this approach requires a long preparation time and is not appropriate for large-scale manufacturing [40].

New technologies and innovative production methods are driving further advancements in laminated composite films. For instance, 3D printing and other advanced manufacturing techniques enable the production of customized and high-performance versions of these films [48].

4. MECHANICAL PROPERTIES

Composite films used in various sectors are subjected to different mechanical stresses in their working environments. For example, in packaging materials, properties such as tensile strength, yield strength, breaking strength, and Young's modulus under tensile loading are critically important. Additionally, the layered structure and the components significantly affect the mechanical properties. Moreover, the inclusion of certain active components can enhance or diminish properties through strong molecular interactions. Barrier properties, such as water vapor permeability, gas permeability, and light permeability, are particularly important for food packaging materials **[49]**.

In the literature, composite films have been examined in terms of their mechanical and other properties. For example, the

thermal and mechanical properties of polyether ether ketone/graphite thin-film laminated composites have been studied. These composites were produced with three and five layers using hot pressing, and tests have demonstrated that these structures are particularly attractive for aerospace applications **[50]**. Properties such as tensile strength (packaging), impact strength, flexural strength (automotive and aerospace), compressive strength (packaging), and wear resistance are of great importance in various applications.

Table 1 highlights studies that focus solely on the effects of mechanical loading. These studies have found that different nanoparticles (such as boron nitride, carbon nanotubes, and graphite) positively impact the properties under investigation.

Örnek

Table 1. Mechanical properties of composite films with different components

Reference	Matrix material	Reinforcement material	Change of mechanical properties
[13]	Epoxy resin	40 vol.% carbon black (CB) + 1 and 1.5 vol.% potassium sodium niobate (KNN)	Impoved by tensile strength, Young modulus and Shore hardness (20%)
[8]	Poliüretan (PU)	30 and 50 wt.% boron nitride nanosheets (BNNSs)	Impoved by tensile strength and Young modulus
[2]	Aramid nanofiber sheet	10 wt.% BN	Impoved by tensile strength (60%)
[51]	Polyvinyl butyral (PVB)	$Ni_3Al–Cr_3C_2$/ Ni_3Al	Improved by hardness (64%) and decreased by wear (62%)
[5]	Epoxy resin	16 vol.% MWCNT	Impoved by tensile strength and Young modulus (respectively 10 and 5 kat artış)
[52]	Gliserol	7.5 wt.% jelatin + % 1 wt.% kitosan	Impoved by tensile strength
[53]	Poly (lactic acid)	6 wt.% cellulose nanocrystals + 7.5 wt.% polyvinyl alcohol	Impoved by tensile strength and Young modulus
[18]	Reduced graphene oxide (rGO)	15 wt.% flame-retarding modified lignin (F-lignin) + halloysite nanotubes (HNTs)	Impoved by tensile strength
[50]	Poly(etheretherketone) (PEEK)	Graphite	Impoved by tensile strength (172%), Young modulus and hardness
[54]	Chitosan	20 wt.% ramie fibre + lignin	Impoved by tensile strength (29.6%)
[10]	Epoxy resin	7.5 wt.% nano-layered boron nitride	Impoved by tensile strength and Young modulus

Örnek

5. THE ADVANTAGES OF COMPOSITE FILMS

Laminated composite films are highly sought after due to their properties such as lightness, mechanical strength, flexibility, chemical resistance, and thermal resistance. Their lightweight nature provides a significant advantage in the transportation sector. In the packaging industry, these films can meet requirements like tensile, compressive, and impact strength through various structural configurations. Additionally, their high thermal and sound insulation properties make them highly efficient in the construction sector. By altering their components, energy efficiency can be improved. For the chemical industry, films capable of adapting to and resisting adverse conditions can be developed. These films are attractive for use in filtration membranes, sensors, medical/analytical instruments, soft and flexible electronic devices, surface coatings, and thermal management systems because of their flexibility **[49]**.

6. THE DISADVANTAGES OF COMPOSITE FILMS

Composite films are manufactured through various production methods. Selecting the correct method and using appropriate components are critical for achieving high-quality results. Incorrect applications can negatively impact product quality. Additionally, in cost-sensitive scenarios, applications requiring specialized equipment or lacking large-scale production can become significantly expensive. Structures exposed to high or low temperatures require careful consideration of stress and deformation changes. Similarly, in environments with corrosive, abrasive, acidic, or basic conditions, the performance of composite films may decline. Recent environmental and economic concerns have highlighted

the importance of recycling once again. However, the structural complexities of composite films pose challenges for waste management, potentially increasing the risks associated with disposal.

7. CONCLUSIONS AND PROSPECTS

Plastic-based materials are extensively used in the production of composite films, with thermosets like epoxy polymers being among the most commonly studied. In the current food industry, packaging materials are still predominantly made from plastics. Data from 2023 shows that 400.3 million tons of plastic were produced worldwide, of which 2.3 million tons were bio-based and 35.5 million tons were post-consumer recycled. Despite their advantages, the lack of recyclability in these materials has heightened environmental and economic concerns, prompting researchers to explore alternative solutions. To produce films from biodegradable materials, the necessary equipment must be cost-effective and suitable for mass production. Post-production performance should be evaluated under real-world conditions, and the quantity of packaging must meet market demand. Additionally, active components like polyphenols and essential oils, commonly used in research, are often expensive or pose challenges in their application. For instance, essential oils may lose their effectiveness due to evaporation or chemical degradation during storage.

In conclusion, it is critical to create composite films that serve a variety of uses, such as the electronics sector and food packaging. With rapid advancements in nanotechnology and production methods, the future holds the potential for renewable, recyclable, and cost-effective films. Greater focus should be placed on developing thermoplastic-based films as

alternatives to thermoset matrix thin films. Furthermore, comprehensive studies are needed to address sector-specific requirements, including fracture toughness, water absorption, electrical conductivity, and fire performance.

örnektir

8. REFERENCES

Adeyeye, S.A.O., & Ashaolu, T.J. (2021). Applications of nano-materials in food packaging: A review. *Journal of Food Process Engineering, 44(7),* e13708.

An, N., Liu, H., Ding, Y., Zhang, M., & Tang, Y. (2011). Preparation and electroactive properties of a PVDF/nano-TiO_2 composite film. *Applied Surface Science, 257(9),* 3831-3835.

Anukiruthika, T., Sethupathy, P., Wilson, A., Kashampur, K., Moses, J.A., & Anandharamakrishnan, C. (2020). Multilayer packaging: Advances in preparation techniques and emerging food applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 19(3),* 1156-1186.

Anukiruthika, T., Sethupathy, P., Wilson, A., Kashampur, K., Moses, J.A., & Anandharamakrishnan, C. (2020). Multilayer packaging: Advances in preparation techniques and emerging food applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *19*(3), 1156-1186.

Barbosa, C.H., Andrade, M.A., Vilarinho, F., Fernando, A.L. & Silva, A.S. (2021). Active edible packaging. *Encyclopedia 1*, 360-370.

Bhushani, J.A., & Anandharamakrishnan, C. (2014). Electrospinning and electrospraying techniques: Potential food based applications. *Trends in Food Science & Technology, 38(1),* 21-33.

Chen, C., Wang, L., Es-haghi, S.S., Tajvidi, M., Wang, J., & Gardner, D.J. (2024). Biodegradable and recyclable bio-based laminated films of poly (lactic acid) and cellulose nanocrystals for food barrier packaging. *Food Packaging and Shelf Life, 42*, 101244.

Chen, C., Wang, L., Es-haghi, S.S., Tajvidi, M., Wang, J., & Gardner, D.J. (2024). Biodegradable and recyclable bio-based laminated films of poly (lactic acid) and cellulose nanocrystals for food barrier packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, *42*, 101244.

Chen, W., Ma, S., Wang, Q., McClements, D.J., Liu, X., Ngai, T., & Liu, F. (2022). Fortification of edible films with bioactive agents: A review of their formation, properties, and application in food preservation. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *62*(18), 5029-5055.

Chen, X., & Tang, Z. (2023). Ultra-high thermal conductivity FGN/PVA/MXene composite films with good electrical insulation. *Composites Science and Technology*, *242*, 110208.

Du, Y., Chen, J., Qin, J., Meng, Q., & Shen, S. Z. (2022). Flexible PVA/PEDOT: PSS thermoelectric nanocomposite films prepared via an additive manufacturing process. *Composites Communications*, *35*, 101312.

Erden, S., & Yıldız, H. (2015). Karbon/Poliamid12 film kompozit üretimi. *Tekstil ve Mühendis*, *22(100)*, 31-37.

Ji, M., Li, J., Li, F., Wang, X., Man, J., Li, J., ... & Peng, S. (2022). A biodegradable chitosan-based composite film reinforced by ramie fibre and lignin for food packaging. *Carbohydrate Polymers*, *281*, 119078.

Ji, M., Li, J., Li, F., Wang, X., Man, J., Li, J., ... & Peng, S. (2022). A biodegradable chitosan-based composite film reinforced by ramie fibre and lignin for food packaging. *Carbohydrate Polymers*, *281*, 119078.

Kang, F., Wang, J., Huang, G., Li, Q., Chen, Y., Jia, Z., ... & Jia, D. (2024). Multifunctional syndiotacticity-rich poly (vinyl alcohol)/MXene sediment for multilayered composite films with effective electromagnetic interference shielding and thermal conductivity. *Composites Science and Technology*, *249*, 110490.

Kececi, E., & Asmatulu, R. (2014). Effects of moisture ingression on polymeric laminate composites and its prevention via highly robust barrier films. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 73*, 1657-1664.

Liu, P., Lam, A., Fan, Z., Tran, T.Q., & Duong, H.M. (2015). Advanced multifunctional properties of aligned carbon nanotube-epoxy thin film composites. *Materials & Design*, *87*, 600-605.

Liu, X., Xiao, C., Qin, J., Meng, Q., Wang, L., Du, Y. (2024). Bi-functional flexible Ag_2Se/polyvinylidene fluoride composite films for thermal energy conversion and electromagnetic interference shielding by solution 3D printing. *Composites Communications*, 102074.

Liu, X.J., Cheng, M., Zhang, Y., Xing, Y., Dang, Z.M., & Zha, J.W. (2024). High-temperature polymer dielectric films with excellent energy storage performance utilizing inorganic outerlayers. *Composites Science and Technology, 245*, 110305.

Mariotti, S., Hutter, O.S., Phillips, L.J., Yates, P.J., Kundu, B., & Durose, K. (2018). Stability and performance of $CsPbI_2Br$ thin films and solar cell devices. *ACS Applied Materials & Interfaces*, *10(4)*, 3750-3760.

Messin, T., Follain, N., Guinault, A., Miquelard-Garnier, G., Sollogoub, C., Delpouve, N., ... & Marais, S. (2017). Confinement effect in PC/MXD6 multilayer films: Impact of the microlayered structure on water and gas barrier properties. *Journal of Membrane Science, 525*, 135-145.

Miah, M.H., Chand, D.S., & Malhi, G.S. (2022). Development process of epoxy resin using nano-layered boron nitride to enhance the mechanical properties and thermal conductivity. *Materials Today: Proceedings, 68*, 1148-1157.

Niu, H., Zhang, K., Wang, Y., Xiao, G., Wang, P., & Yao, Y. (2024). Highly thermally conductive and flexible nanocomposites prepared by integrating 1D/2D polyethyleneimine-modified boron nitride. *Composites Communications*, 102023.

Ra, E.C., Jang, S., Oh, D.G., Lee, J.H., Kim, H.E., Kim, E.H., ... & Lee, J.S. (2023). A versatile hybrid catalyst platform of $Na/ZnFe_2O_4$ and zeolite for selective hydrocarbon production from CO_2 hydrogenation. *Chemical Engineering Journal*, *470*, 144335.

Reddy, K.J., & Natarajan, S. (2018). Energy sources and multi-input DC-DC converters used in hybrid electric vehicle applications–A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, *43(36)*, 17387-17408.

Rhim, J.W., Mohanty, K.A., Singh, S.P., & Ng, P.K. (2006). Preparation and properties of biodegradable multilayer films based on soy protein isolate and poly (lactide). *Industrial & Engineering Chemistry Research*, *45(9*), 3059-3066.

Rivero, S., Garcia, M. A., & Pinotti, A.J.J.O.F.E. (2009). Composite and bi-layer films based on gelatin and chitosan. *Journal of Food Engineering*, *90*(4), 531-539.

Rivero, S., Garcia, M.A., & Pinotti, A.J.J.O.F.E. (2009). Composite and bi-layer films based on gelatin and chitosan. *Journal of Food Engineering*, *90(4)*, 531-539.

Sani, N., Wang, X., Granberg, H., Andersson Ersman, P., Crispin, X., Dyreklev, P., ... & Berggren, M. (2016). Flexible lamination-fabricated ultra-high frequency diodes based on self-supporting semiconducting composite film of silicon micro-particles and nano-fibrillated cellulose. *Scientific Reports*, *6(1)*, 28921.

Sariyev, B., Abdikadyr, A., Baitikenov, T., Anuarbekov, Y., Golman, B., & Spitas, C. (2023). Thermal properties and mechanical behavior of hot pressed PEEK/graphite thin film laminate composites. *Scientific Reports*, *13(1)*, 12785.

Soydal, Ü., & Günbattı, F.S. (2023). Kekik yağı ile hazırlanmış biyopolimer kompozit filmler ve bu filmlerin özelliklerinin incelenmesi. *Konya Journal of Engineering Sciences/Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *11(1)*.

Uz, M., & Altınkaya, S.A. (2011). Development of mono and multilayer antimicrobial food packaging materials for controlled release of potassium sorbate. *LWT-Food Science and Technology*, *44(10)*, 2302-2309.

Vera, M., Mella, C., García, Y., Jiménez, V.A., & Urbano, B.F. (2023). Recent advances in tannin-containing food biopackaging. *Trends in Food Science & Technology*, *133*, 28-36.

Vikram Singh, A., Hasan Dad Ansari, M., Wang, S., Laux, P., Luch, A., Kumar, A., ... & Nussberger, S. (2019). The adoption of three-dimensional additive manufacturing from biomedical material design to 3D organ printing. *Applied Sciences*, *9(4)*, 811.

Wang, B., Ruan, T., Chen, Y., Jin, F., Peng, L., Zhou, Y., ... & Dou, S. (2020). Graphene-based composites for electrochemical energy storage. *Energy Storage Materials*, *24*, 22-51.

Wang, G.J., Cai, Y.P., Ma, Y.J., Cao, Z.H., & Meng, X.K. (2019). Ultrastable cyclic bending response of carbon nanotube/copper laminate composite film. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *121*, 189-195.

Wang, Q., Chen, W., Zhu, W., McClements, D.J., Liu, X., & Liu, F. (2022). A review of multilayer and composite films and coatings for active biodegradable packaging. *npj Science of Food*, *6(1)*, 18.

Wang, Q., Chen, W., Zhu, W., McClements, D.J., Liu, X., & Liu, F. (2022). A review of multilayer and composite films and coatings for active biodegradable packaging. *npj Science of Food*, *6(1)*, 18.

Wang, Q., Chen, W., Zhu, W., McClements, D.J., Liu, X., & Liu, F. (2022). A review of multilayer and composite films and coatings for active biodegradable packaging. *npj Science of Food*, *6*(1), 18.

Wang, R., Deng, J., Zhang, Z., Lu, Y., Li, X., & Wu, J. (2022). Microstructure and tribological properties of Ni_3Al–Cr_3C_2/Ni_3Al micro-laminate composite films fabricated by electrohydrodynamic atomization technique. *Vacuum*, *200*, 110979.

Wang, R., Deng, J., Zhang, Z., Lu, Y., Li, X., & Wu, J. (2022). Microstructure and tribological properties of Ni_3Al–Cr_3C_2/Ni_3Al micro-laminate composite films fabricated by electrohydrodynamic atomization technique. *Vacuum*, *200*, 110979.

Wang, Z.G., Liu, W., Liu, Y.H., Ren, Y., Li, Y.P., Zhou, L., ... & Li, Z.M. (2020). Highly thermal conductive, anisotropically heat-transferred, mechanically flexible composite film by assembly of boron nitride nanosheets for thermal management. *Composites Part B: Engineering*, *180*, 107569.

Wang, Z.G., Liu, W., Liu, Y.H., Ren, Y., Li, Y.P., Zhou, L., ... & Li, Z.M. (2020). Highly thermal conductive, anisotropically heat-transferred, mechanically flexible composite film by assembly of boron nitride nanosheets

for thermal management. *Composites Part B: Engineering*, *180*, 107569.

Wei, Y., Chen, X., Dai, Z., Cheng, M., Fu, Q., & Deng, H. (2024). Two-step re-protonation strategy to fabricate aramid nanofiber sheet (ANFS) based high performance composite film. *Composites Science and Technology*, *248*, 110480.

Wu, Q., Feng, Z., Cai, Z., Lan, C., Xu, J., Bi, K., & Hao, Y. (2022). Poly (methyl methacrylate)-based ferroelectric/dielectric laminated films with enhanced energy storage performances. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, *5(2)*, 1137-1144.

Xiao, C., Liu, X., Meng, Q., Wang, L., Du, Y., & Li, Z. (2024). Fabrication of flexible self-supporting black phosphorus nanosheet/PEDOT: PSS thermoelectric composite films by solution 3D printing technology. *Composites Communications*, *46*, 101815.

Xie, W., Zhong, L., Wang, Z., Liang, F., Tang, X., Zou, C., & Liu, G. (2019). Photocatalytic performance of $Bi_2VO5.5/Bi_2O_3$ laminated composite films under simulated sunlight irradiation. *Solid State Sciences*, *94*, 1-7.

Yang, L., Huang, R., Yuan, J., Zhang, P., Deng, J., & Li, Q. (2024). High thermal conductive polyurethane composite films with a three-dimensional boron nitride network in-situ constructed by multi-folding and multi-laminating. *Composites Science and Technology*, *245*, 110326.

You, S., Kim, J.H., Lee, S., Kamat, V., & Robert Jr, L.P. (2018). Enhancing perceived safety in human–robot collaborative construction using immersive virtual environments. *Automation in Construction*, *96*, 161-170.

Zhang, X., Chen, H., & Zhang, H. (2007). Layer-by-layer assembly: from conventional to unconventional methods. *Chemical Communications, (14),* 1395-1405.

Zhao, L., Duan, G., Zhang, G., Yang, H., He, S., & Jiang, S. (2020). Electrospun functional materials toward food packaging applications: A review. *Nanomaterials*, *10*(1), 150.

Zhao, Z., Yu, Y., He, L., Wang, Z., Kurita, H., & Narita, F. (2024). Effect of carbon black addition on electromechanical performance of flexible piezoelectric composite films. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *180*, 108103.

Zou, R., Lidan, Z., Tian, Y., Yang, H., Liu, F., Wang, S., ... & Hu, N. (2024). Nacre inspired supertough and flame-retardant reduced graphene oxide composite films. *Composites Communications*, 102043.

Zou, X., Cai, Y., Chong, W.C., & Lau, K.M. (2015). Fabrication and characterization of high-voltage LEDs using photoresist-filled-trench technique. *Journal of Display Technology*, *12*(4), 397-401.

TASARIM VE İMALATTA GÖRÜNTÜ İŞLEME UYGULAMALARI

Kadir SARI[1]

Hakan DİLİPAK[2]

1. GİRİŞ

Günümüz endüstrisinde tasarım ve üretim süreçleri, yüksek hassasiyet ve verimlilik gerektiren bir yapıya dönüşmesi sonucunda hızla gelişmektedir. Bu dönüşümde, ilerleyen teknoloji ile birlikte görüntü işleme uygulamaları, tasarım ve imalat süreçlerinde önemli bir araç konumundadır. Görüntü işleme, dijital verilerin analiz edilmesi yoluyla karmaşık tasarım ve üretim süreçlerinin daha hassas, etkin ve verimli yönetilmesini sağlamaktadır. Bu teknoloji, ürün tasarımından üretime, yüzey kalitesi kontrolünden boyutlandırma ve ölçümlere, malzeme hatalarının tespitinden montaj ve süreçlerinin optimizasyonuna kadar pek çok alanda kullanılmaktadır. En küçük kusurların bile erken aşamada ve hızlıca tespit edilebilmesine imkân tanıyarak kaliteyi yükseltmekte, her bir unsur ve toplam için verimliliği artırırken maliyetlerin düşürülmesine katkı sağlamaktadır.

Görüntü işleme teknolojisinin tasarım ve analiz süreçlerine entegrasyonu, tasarımın doğrulanmasından ürünlerin kalite kontrolüne kadar olan tüm aşamalarda kullanımı doğrultusunda geniş bir kapsamda büyük öneme sahiptir. Özellikle seri üretim hatlarında, hatalı parçaların erken tespitini,

1 Öğrenci (Dr), Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Bölümü, kadirsarion@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8013-8285.

2 Prof. Dr., Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, hdilipak@gazi.edu.tr, ORCID: 0000-0003-3796-8181.

maliyetlerin kontrol altına alınmasını ve iş gücü kayıplarının en aza indirilmesini sağlamaktadır. Ancak, görüntü işleme tekniklerinin yanlış bir şekilde uygulanması, hatalı analizler ile yanlış çözümlere ve süreçlerde aksamalara neden olarak maliyet artışları ve de kalite sorunları gibi olumsuz sonuçlara yol açabilmektedir. Bu nedenle, görüntü işleme uygulamalarının tasarım ve imalat süreçlerinde doğru bir şekilde planlanarak optimize ve entegre edilmesi önemli bir faktördür.

Bu çalışmada, görüntü işleme teknolojilerinin tasarım ve imalat süreçlerindeki rolü, kullanım alanları ve uygulamaları, sağladığı faydalar ve bu teknolojilerin endüstriyel verimliliğe katkıları ayrıntılı olarak incelenmiştir.

2. TASARIM VE İMALATTA GÖRÜNTÜ İŞLEME

Tasarım ve imalatta görüntü işleme, günümüz teknolojisinin dijitalleşmesini sağlayan en yenilikçi ve etkili yöntemlerden biridir. Hassasiyet, hız ve kalite sağlayan çözümler sunmaktadır. Robotik sistemlerle entegre çalışan görüntü işleme teknolojileri, nesne tanıma, hareket takibi ve montaj doğrulama gibi uygulama alanlarında önemli bir yer tutmaktadır. Tasarım, üretim ve kalite kontrol vb. süreçlerde otomasyon sağlanarak insan kaynaklı hatalar azaltılmakta ve verimlilik artmaktadır. Gelecek dönemlerde ise bu teknolojilerin daha da gelişerek tasarım ve imalat alanında dijital dönüşümün daha ileri seviyelere taşınması ve kullanımının yaygınlaşması öngörülmektedir.

2.1. Tasarım

Makinecilik disiplininde tasarım, bir ürünün, makinenin, mekanik sistemin veya cihazın işlevsel, estetik ve yapısal yönlerinin belirlenme, tanımlanma ve detaylandırılma sürecidir.

Bu aşama, mühendislik analizleri, bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımları ve simülasyonlar ile desteklenmekte, bunların yanında, görüntü işleme teknikleri de önemli bir yer tutmaktadır. Görüntü işleme, tasarım modellerinin daha hassas analizini, karmaşık geometrilerin doğru şekilde modellenmesini, tasarım doğruluğunun artırılmasını ve üretim öncesi potansiyel sorunların tespit edilmesini sağlamaktadır. Bu doğrultuda, tasarımın temel amacı, ürünün amaca uygun, işlevsel, güvenli, verimli, üretime elverişli ve optimize edilmiş bir yapıya getirilmesidir.

2.2. İmalat

İmalat, tasarım sürecinde belirlenen özelliklerin fiziksel olarak üretime dönüştürülerek hayata geçirilmesi sürecidir. Bu aşama, işleme, kesme, montaj vb. şekillendirme teknikleri gibi geleneksel üretim yöntemlerini içermektedir. Üretim sürecinde kalite kontrol ve güvence, maliyet optimizasyonu ve sürdürülebilirlik gibi unsurlar da önemli bir yer tutmaktadır. Bunun yanı sıra, görüntü işleme teknolojileri de giderek artan bir şekilde uygulanmaktadır. Görüntü işleme teknikleri, özellikle otomasyon sistemlerinde, üretim hatlarının denetlenmesi, kalite kontrolü, hataların tespiti, ürün doğrulama ve süreç optimizasyonu gibi kritik aşamalarda önemli bir etkiye sahiptir. Bu sayede, imalat sürecinin verimliliği; uygun malzeme seçimi, ileri üretim teknolojileri ve görüntü işlemeye dayalı kalite kontrol sistemleriyle en üst düzeye çıkarılmaktadır.

2.3. Görüntü İşleme

Dijital görüntü işleme teknolojilerine olan merak, insan yorumu için resimsel bilginin iyileştirilmesi ve otonom makine algısında depolama, iletim ve temsil için görüntü verilerinin işlenmesi olmak üzere iki temel uygulama alanından gelmektedir.

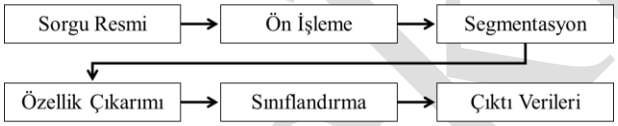
Bir görüntü f (x, y) gibi iki boyutlu bir fonksiyon şeklinde tanımlanabilmektedir. x ve y uzaysal (düzlem) koordinatlarıdır. f'nin herhangi bir koordinat çiftinde (x, y) genliği o noktadaki görüntünün yoğunluğu veya gri seviyesini ifade etmektedir. x, y ve f'nin yoğunluk değerlerinin tamamı sonlu, ayrık nicelikler ise dijital görüntü olarak adlandırılmaktadır. Dijital görüntü işleme alanı, dijital görüntülerin dijital bir bilgisayar aracılığıyla işlenmesini kapsamaktadır. Dijital bir görüntünün, her biri belirli bir konuma ve değere sahip olan sonlu sayıda elemandan oluşmaktadır ve bu öğelere resim öğeleri, görüntü öğeleri, peller ve pikseller denilmektedir. Piksel, dijital bir görüntünün öğelerini ifade etmek için en yaygın kullanılan terimdir.

Görüntü işleme ve görüntü analizi kavramlarının ortak noktası, bir görüntüdeki bölgelerin veya nesnelerin tek tek tanınmasıdır. Dijital görüntü işleme, girdileri ve çıktıları görüntü olan süreçleri, nesnelerin tanınması da dahil olarak görüntülerden öznitelik çıkarma gibi analiz süreçlerini kapsamaktadır [1].

Görüntü işleme, dijital görüntülerin çeşitli teknikler ve algoritmalar kullanılarak işlenmesi sürecidir. Elektronik ortamda kaydedilmiş dijital görüntü verilerini, bilgisayar ve yazılımlar aracılığıyla istenilen amaca uygun şekilde analiz etme, iyileştirme, geliştirme, değiştirme ve belirli özelliklerini çıkarma işlemlerini içermektedir. Görüntülerin analiz ile anlamlı bilgilere dönüştürülmesini sağlayan bu yöntem geniş bir uygulama alanına sahiptir. Temel hedefi, görüntülerin kalite artırımı, özellik çıkarımı veya farklı formatlara dönüştürülmesidir.

Görüntü işleme süreci, dijital bir sorgu resmi ile başlamaktadır. Sorgu resmi dijital görüntü olarak alınarak işlenmeye hazır duruma getirilmektedir. Ardından ön işleme ile görüntü kalitesi artırılmaktadır; bu aşamada parazit giderme ve kontrast ayarlama gibi teknikler uygulanmaktadır. Segmentasyon aşamasında, görüntü anlamlı bölgelere ayrılarak

hedef nesneler tespit edilmektedir. Özellik çıkarımı aşamasında segmentlerden edinilen bilgilerle nesnelerin renk, doku, şekil vb. özellikleri tanımlanmaktadır. Sınıflandırma aşamasında, çıkarılan özellikler kullanılarak nesneler tanımlanmakta ve kategorize edilmektedir. Son olarak, farklı amaçlar için kullanılmak üzere çıktı verileri elde edilmektedir. Görüntü işleme sonuçları, raporlanarak analiz edilmekte, ilgili karar destek sistemlerine entegre edilerek değerlendirilmektedir. Böylece görüntü işleme süreci kapsamlı ve sistematik bir şekilde tamamlanmış olmaktadır.



Şekil 1. Görüntü işlemenin temel adımları

3. TASARIM VE İMALATTA GÖRÜNTÜ İŞLEME UYGULAMALARI

Görüntü işleme teknolojileri, makinecilik disiplininde özellikle tasarım ve imalat süreçlerinin optimize edilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu uygulamalar, hassasiyet, hız ve kalite gibi parametreleri iyileştirmekte, standartları yükselterek süreçleri daha etkili, verimli ve güvenilir kılmaktadır. Literatürde bu konu hakkında yapılmış olan çalışmalar incelenmiş ve görüntü işlemenin bu alanlardaki başlıca uygulamaları açıklanmıştır.

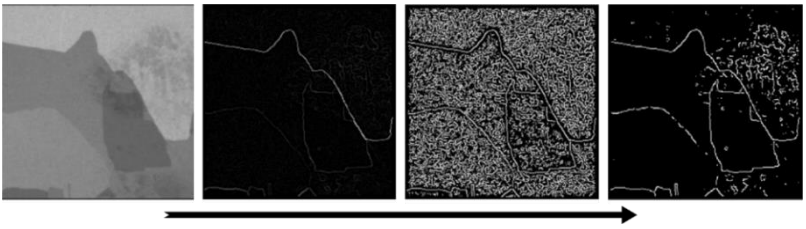
3.1. Kalite Kontrol ve Denetim

Üretimde kalite standartlarını sağlamak amacıyla üretilen parçalar için görüntü işleme teknikleri aracılığıyla yüzey kalitesi, ölçüsel tutarlılık ve olası hatalar anında analiz edilmektedir. Kusurlu parçaların üretim sürecinde erken tespiti sonucunda anında ayırt edilmeleri sağlanmaktadır.

Yüzey Kalitesi: Ürünlerin yüzey kalitesi, özellikle fonksiyonel ve estetik açıdan bazı durumlarda önem taşımaktadır. Ürün yüzeylerindeki pürüzlülük, çizikler, çatlaklar ve diğer yüzey kusurları, görüntü işleme teknikleriyle üretim hattında otomatik olarak tespit edilmektedir. Bu sistemler, özellikle yüksek hızlı üretim hatlarında manuel denetimin yetersiz kaldığı durumlarda kritik öneme sahiptir ve büyük bir avantaj sağlamaktadır.

Boyutsal Doğruluk: Parçaların ölçüleri, belirlenen tolerans sınırlarına göre denetlenmekte ve sapmalar anında tespit edilip düzeltilerek üretim sürecinde olası hatalar engellenmektedir.

Örnek: Tasarım Mühendisliği Makine Öğrenimi ve Görüntü İşleme Kullanılarak Endüstriyel Üretim Sürecindeki Ürünlerde Yüzey Kusurlarının Tespiti: Üretimde yer alan metal levha vb. ürünlerin yüzey kusurlarının tespiti için makine öğrenimi ve görüntü işleme teknikleri ele alınmıştır. Geleneksel lazer ve ultrason yöntemlerine kıyasla bilgisayarla görme tabanlı, daha düşük maliyetli çözümler sunulmuştur. 2D ve 3D görüntü işleme algoritmaları ile evrişimli sinir ağları (CNN) kullanılarak kusurlar yüksek doğrulukla tespit edilmektedir. Model, kusurlu ve kusursuz yüzey görüntüleriyle eğitilmiş, optimizasyon teknikleri ile eğitim süreci iyileştirilmiştir. CNN tabanlı model, yüzey kusurlarının tespitinde hızlı ve etkili çözümler sunmaktadır [2].



Şekil 2. Kusurlu PVC görüntüleri: Görüntü işleme [2]

3.2. Robotik Sistemlerle Entegrasyon

Robotik sistemler, görüntü işleme teknolojisi ile birlikte uygulandığında, üretim hatlarında daha yüksek hız ve doğruluk sağlayarak nesnelerin tanımlanması, pozisyonlarının belirlenmesi ve montaj süreçlerini daha hassas ve etkili şekilde yapmaktadır.

Nesne Tanıma ve Konumlandırma: Robotik montaj sistem ve hatlarında, parçaların doğru şekilde tanınma ve konumlandırılma işlemleri için görüntü işleme teknolojileri kullanılarak özellikle karmaşık montaj süreçlerinde robotların etkinliği artırılmaktadır.

Hareketli Nesnelerin Takibi: Üretim hattındaki dinamik parçalar, görüntü işleme sistemleri sayesinde izlenerek robotlar tarafından hassas bir şekilde uygun pozisyonlarda alınıp yerleştirilmektedir.

Montaj Doğrulama: Bileşenlerin birleştirilmeleri gibi montaj işlemlerinin doğruluğu, görüntü işleme sayesinde anlık olarak denetlenmekte, hatalı montajlar tespit edilerek engellenmektedir.

Örnek: Gerçek Zamanlı Görüntü İşleme ve Robotik Tutucu Mekanizma Kontrolü ile Otomatik Nesne Sıralama Sistemi

Görüntü işleme ile nesneleri renk ve şekillerine göre sınıflandıran ve sıralayan bir robotik sistemin tasarımı ele alınmıştır. Nesnelerin görüntüleri bir web kamerası aracılığıyla gerçek zamanlı olarak yakalanmakta ve Python programlama dili ile işlenmektedir. Bantlı konveyör üzerinde kameranın önünden geçen, görüntüsü işlendikten sonra renk ve şekil özelliklerine göre tanımlanan nesneler, sıralama için Arduino Uno ve DC motorlarla kontrol edilen robotik tutucu kol tarafından alınmakta ve uygun pozisyonlara yerleştirilmektedir [3].



Şekil 3. Robotik sistem [3]

3.3. 3.3. Boyutsal Analiz ve Hassas Ölçüm

Görüntü işleme, hassas ölçüm gerektiren parçaların boyutsal analizini sağlayarak ürünlerin tolerans aralıklarında kalıp kalmadığının hızlı bir şekilde kontrolüne imkân tanımaktadır.

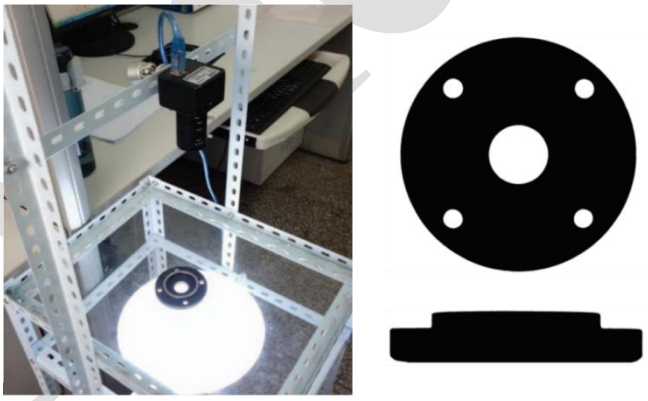
İki Boyutlu (2D) ve Üç Boyutlu (3D) Ölçüm Sistemleri: Geometrik doğruluğu sağlamak için iki ve üç boyutlu görüntü işleme tekniklerinin kullanıldığı sistemler, karmaşık ve hassas boyutlara sahip parçaların üretiminde büyük avantaj sunmaktadır.

Hacim Hesaplamaları: Görüntü işleme, hacimsel üretim süreçlerinde, özellikle döküm veya kalıplama işlemlerinde, üretilen parçaların hacmini doğru bir şekilde ölçmeye ve hesaplamaya yardımcı olmaktadır. Yöntem, hassas toleransların gerekli olduğu üretim süreçlerinde büyük önem taşır.

Geometrik Uygunluk: Üretilen parçaların belirlenen geometrik özelliklere uygun olup olmadığı, görüntü işleme teknikleri ile kontrol edilmektedir. Bu işlem, karmaşık geometrilere sahip parçaların doğru ve hassas şekilde üretilmesini sağlar.

Örnek: Görüntü işlemeye dayalı mekanik parçaların temassız boyut ölçümü

Mekanik parçaların boyutsal kontrolleri kapsamında temassız, çevrimiçi ölçüm için görüntü işleme ve yapay görme teknolojisine dayalı bir sistem sunulmuştur. Ölçüm sistemi, ışık kaynağı, kamera, lens ve bilgisayardan oluşmakta ve iletilen aydınlatmayı kullanarak parçaların kontur detaylarını belirgin hale getirerek özelliklerini öne çıkarmaktadır. Görüntüler ön işlemden geçirilmekte, ardından eşik segmentasyonu ve kenar çıkarımı adımları uygulanmaktadır. Geometrik elemanların tespitinde hassasiyeti artırmak için Hough dönüşümüne dayalı bir yöntem kullanılmakta ve dairelerin merkezi doğru bir şekilde belirlenmektedir. Bu sistem, mekanik parçaların hızlı ve temassız boyutsal ölçümünü sağlayarak verimliliği artırmaktadır [4].



Şekil 4. a) Boyutsal ölçüm sistemi, b) Yakalanmış görüntü [4]

3.4. 3.4. Parça Tanıma ve Ayıklama

Üretim hattında parçaların doğruluk kontrolleri sağlanarak uygun ve hatalı parçaların tespit edilerek ayrıştırılması için görüntü işleme teknikleri kullanılmaktadır.

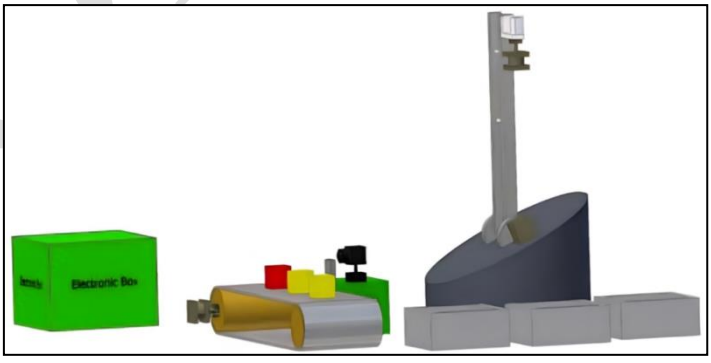
Hatalı Parçaların Ayıklanması: Görüntü işleme teknolojileri, üretim hattında hatalı veya kusurlu parçaların otomatik olarak tespit edilip üretim sürecinden çıkartılarak ayıklanmasını sağlamaktadır. Bu, üretim süreçlerindeki kaliteyi artırırken hatalı ürünlerin piyasaya sunulmasını engeller.

Sınıflandırma: Üretim sırasında farklı boyut, renk veya şekil gibi özelliklere sahip parçalar, görüntü işleme teknikleri ile hızlı, doğru ve kolay bir şekilde kategorize edilip ayrıştırılarak üretim süreçlerinin optimizasyonuna fayda sağlamaktadır.

Ambalaj Kontrolü: Doğru parçaların uygun şekilde ambalajlanmaları, görüntü işleme sistemleriyle kontrol edilerek ambalajlama hatalarının önüne geçilebilmektedir.

Örnek: Yapay görme kullanan otomatik ayıklama sistemi

Nesnelerin renk tabanlı olarak tanımlanması ve sıralanmasının yapıldığı çalışmada renk tanımlamasından sonra robotik kol, doğru renkteki parçaları seçip yerleştirmektedir; yanlış renkteki parçalar ise reddedilmektedir. Bu süreç MATLAB ve mikrodenetleyici ile yönetilmektedir. Renk bazlı yapay görme, ilaç, tarım ve otomotiv sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır ve gerçek zamanlı fabrika uygulamalarına imkân sağlamaktadır [5].



Şekil 5. Sistemin 3D modeli [5]

3.5. Yapay Zekâ Destekli Tasarım ve Prototipleme

Yapay zekâ ile desteklenen görüntü işleme, tasarım ve prototipleme aşamalarında daha hızlı ve hassas sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Tasarım doğruluğunu arttırarak yeni ürünlerin geliştirilmesinde etkin ve verimli bir süreç sunmaktadır.

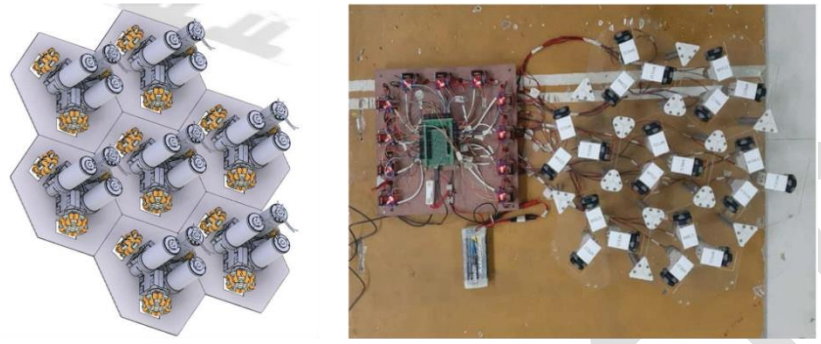
Dijital Modelleme: Görüntü işleme sayesinde tasarım süreçlerinde hızlı ve etkili bir şekilde oluşturulan modellemeler (dijital prototipler/modeller), tasarımcıların ve mühendislerin parçaları daha detaylı analiz etmesini ve üretim süreçlerine geçişin hızlandırılmasını sağlamaktadır.

Tasarım Optimizasyonu: Yapay zekâ tabanlı görüntü işleme teknikleri, üretim süreçlerinde tasarımların optimizasyonunu sağlayarak daha verimli ve düşük maliyetli üretim süreçlerine imkân tanımaktadır.

Hızlı Prototipleme: Görüntü işleme teknolojileri sayesinde tasarım ve imalat arasında hızlı bir geçiş sağlanarak prototiplerin üretimi ve analizi ile hataların düzeltilmesi hız kazanmaktadır.

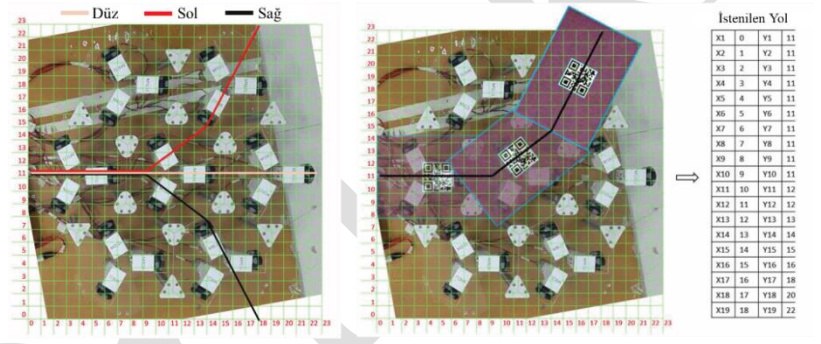
Örnek: Görüntü işleme kullanılarak çok yönlü konveyör modelinin tasarımı ve kontrolü

Endüstri 4.0'ın gereksinimlerine uyum sağlamak için OpenCV tabanlı görüntü işleme yoluyla 'Çok Yönlü Konveyör' (OC-Omnidirectional Conveyor) adı verilen akıllı bir konveyör sistemi geliştirilmiştir. OC, nesnelerin hızı ve yönü gibi parametreleri izleyerek holonomik hareket (serbest/çok yönlü hareket) sağlayan bir sistemdir. Tekerleklerin benzersiz düzeni ve özel algoritmalar sayesinde çeşitli nesneler bağımsız olarak yönlendirilmekte, konumlandırılmakta ve taşınmaktadır. OC, %7 hata oranı ile nesneleri doğru bir şekilde aktarabilmektedir. Modüler yapısı sayesinde kolayca ölçeklenebilir ve onarılabilir olup, akıllı ve verimli bir üretim için idealdir [6].



a) b)

Şekil 6. a) Komple kurulum modelinin alttan görünümü, b) Deneysel kurulum [6]



a) b)

Şekil 7. a) Önceden tanımlanmış yollar (Düz, Sol, Sağ), b) Sol yol için gösterilen matris ile istenen yol [6].

3.6. Montaj Süreçlerinin Takibi

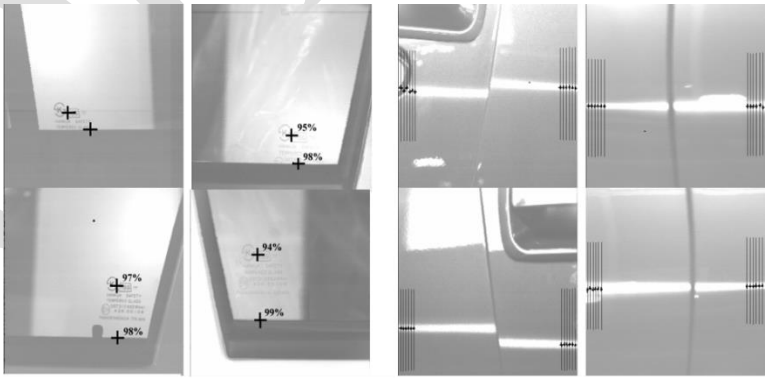
Montaj sürecinde, parçaların konumlarını doğrulamak, hatalı yerleşimlerin ve montajların düzeltilmesini sağlamak için görüntü işleme teknolojilerinden yararlanılmaktadır.

Parça Yerleşim Kontrolü: Montaj süreçlerinde parçaların doğru konumlandırılmaları görüntü işleme teknikleri ile denetlenerek montaj hatalarının en aza indirilmesi hedeflenmektedir.

Hatalı Yerleşimlerin ve Montajların Düzeltilmesi: Hatalı yerleşim ve montajlar görüntü işleme sistemleriyle tespit edilmekte ve üretim sürecindeki aksaklıklar otomatik olarak düzeltilmektedir.

Örnek: Otomobil montaj hattı için görüntü işleme tabanlı otomatik denetim

Otomobil montaj hattında kaliteyi artırmak ve maliyeti düşürmek amacıyla geliştirilen bir otomatik görsel denetim sistemi ele alınmıştır. Kötü fabrika ortamında (güneş ışığı, titreşim vb.) yaşanan optik sorunlar için çözüm önerileri sunulmuştur. Araç kapı ve pencerelerinin açıklığını kontrol etmek için uyarlanabilir çizgi filtresi ve normalleştirilmiş korelasyon tabanlı şablon eşleştirme yöntemleri kullanılmıştır. Geliştirilen sistem, yüksek güvenilirlik sağlayarak araçların su sızdırma testi öncesi hatalı montajlarını tespit ederek test odasına girmesini önlemiş ve işçilik ile üretim maliyetlerinde tasarruf sağlamıştır. Gelecekte, bu sistemin 3D görme algoritmasıyla daha geniş uygulama alanlarına yayılması hedeflenmektedir [7].



Şekil 8. Pencere (a) ve kapı (b) kontrol sonuçları [7]

3.7. Optik Karakter Tanıma (OCR)

Ürün, parça veya bileşen üzerindeki yazı, numara veya kodların algılanması, okunması ve kaydedilmesi amacıyla OCR teknolojisinden yararlanılmaktadır. Yöntem, nesnelerin takibini ve izlenebilirliğini kolaylaştırarak güvenilirliği ve düzeni sağlamaktadır.

Etiket ve Barkod Okuma: Ürün üzerindeki etiket, seri numarası ve barkodlar görüntü işleme ve optik karakter tanıma teknolojileri ile okunmaktadır. Bu sistemler, özellikle lojistik ve üretim takip süreçlerinde kritik bir yere sahiptir.

Tarih ve Seri Numarası Kontrolü: Üretim süreçlerinde, ürün üzerindeki tarih ve seri numaralarının doğruluğu optik karakter tanıma teknikleri aracılığıyla otomatik şekilde denetlenmektedir.

Örnek: Görüntü işleme ve OCR kullanarak ürün etiketlerindeki hataların gerçek zamanlı otomatik tespiti

Ürün etiketlerindeki hataların otomatik olarak tespit edilmesi için görüntü işleme ve Optik Karakter Tanıma (OCR) teknolojilerini entegre eden bir metodoloji sunulmuştur. Görsel bileşenler (barkodlar, logolar) görüntü işleme ile analiz edilirken, OCR ile metinler tanımlanmaktadır. Hata tespiti, alınan verilerin referans şablon ile karşılaştırılması yoluyla gerçekleştirilmektedir. Düzensiz biçimlendirme veya eksik bilgiler gibi sapmalar tespit edilmektedir. Gerçek zamanlı testlerde %78 tanıma doğruluğu sağlayan sistem başarılı sonuçlar vermiştir. Bu model, manuel etiket doğrulama süreçlerini azaltarak operasyonel verimliliği ve mevzuata uyumu artırmak için üreticiler ve nakliyecilerin kullanımına uygundur [8].

örnektir



a) b) c)

Şekil 9. a) Orijinal görüntü, b) Gri tonlamalı görüntü, c) İkili görüntü [8]

3.8. Malzeme Tanıma ve Analizi

Malzemelerin türünü ve yapısal özelliklerini analiz etmek için görüntü işleme yöntemleri kullanılarak yüzey, doku, iç yapı vb. gibi kriterler kontrol edilmekte ve uygun malzeme seçimi ve kalite sağlanmaktadır.

Malzeme Doğrulama: Üretimde kullanılan metal, plastik, seramik vb. farklı malzemeler görüntü işleme sistemleri ile analiz edilerek kontrol edilmektedir. Yüzey rengi ve dokusu gibi özellikler, malzemenin tanınması doğrultusunda kullanılmaktadır.

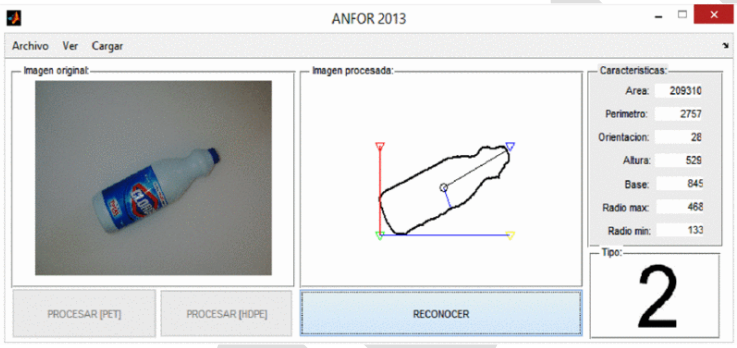
Kimyasal Bileşim Analizi: Lazer tabanlı görüntü işleme teknikleri, malzemelerin kimyasal bileşimleri analiz ederek üretim süreçlerinde kaliteyi yükseltmek ve garanti altına almak amacı ile kullanılmaktadır.

Örnek: Dijital görüntü işleme yoluyla geri dönüşüm için malzeme şeklinin analizi (ANFOR)

Geri dönüşüm sürecinde plastik şişe malzemelerinin otomatik olarak sınıflandırılması için dijital görüntü işlemeye dayalı ANFOR adlı bir sistem geliştirilmiştir. Sistem, plastik şişelerde kenarları algılayarak özellikleri çıkarmakta ve

Örnektir

nesneleri malzeme türüne göre sınıflandırmaktadır. PET şişeler, yüksek benzerlikleri nedeniyle %96 doğrulukla en iyi sonuçları verirken, aydınlatma sorunları yuvarlak şişelerde daha düşük doğruluğa yol açmıştır. HDPE şişeler ise PET'e benzer özellikleri nedeniyle %63 doğruluk göstermiştir. Geri yayılım algoritması kullanan sinir ağı eğitimi ile sistem, malzeme sınıflandırmada başarılı bir performans sergilemiştir [9].



Şekil 10. ANFOR sistemi arayüzü [9]

3.9. Kalıp ve Döküm Süreçlerinin Denetimi

Karmaşık ve hassas bir yapıya sahip olan kalıp ve döküm işlemlerinde oluşabilecek hataları, hava boşluklarını veya çatlakları algılamak, kalıpların aşınmalarını, kullanım ömürlerini izlemek ve bu durumlara gerçek zamanlı çözümler sağlamak amacıyla kullanılan görüntü işleme teknikleri ürün kalitesini artırmak ve üretim atıklarını azaltmak için kritik düzeyde öneme sahip bir etkendir.

Boşluk ve Kusur Tespiti: Kalıplama ve döküm süreçlerinde oluşan boşluklar, çatlaklar veya diğer kusurlar ürün kalitesini doğrudan etkileyen hassas unsurlardır ve görüntü işleme sistemleri ile erken aşamada tespit edilebilmeleri üretim süreci üzerinde önemli bir fonksiyondur.

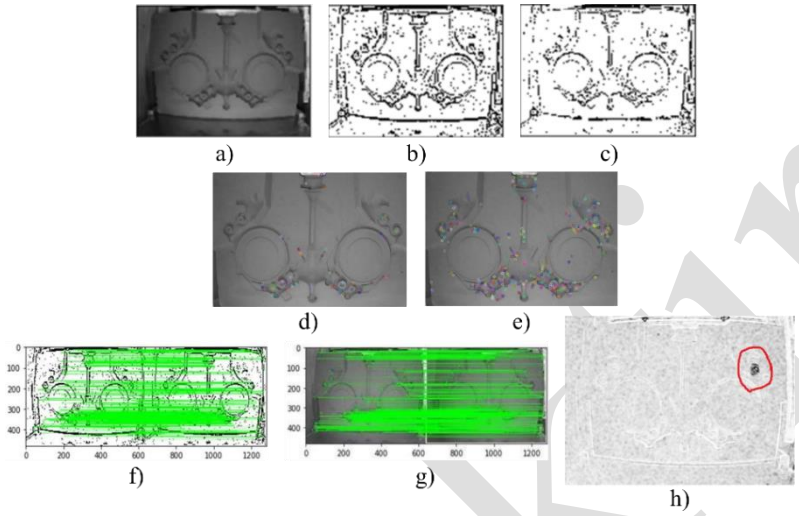
Kalıp Aşınma İzlemesi: Kalıpların aşınma durumu görüntü işleme yöntemleri ile izlenmekte ve kullanım ömrü takip edilmektedir. Bu sayede, aşınıma uğramış kalıpların değişimi sağlanarak üretim süreci kesinti olmadan sürekli bir şekilde devam ederek etkinlik sunmaktadır.

Kalıp Uyumluluğu: Görüntü işleme sistemleri kullanılarak kalıpların üretilecek parçalarla uyumluluğunun kontrolü sağlanmakta ve üretim kalitesi korunmaktadır.

Örnek: Görüntü işleme teknikleri kullanılarak dökümhanelerde gerçek zamanlı kalıp kalitesi denetimi

Metal dökümhanelerindeki kalıp kalitesini artırmak amacıyla yapay görme tabanlı bir sistem sunulmuştur. Kalıpların durumu gerçek zamanlı olarak görüntülenmekte ve Raspberry Pi3 kullanılarak analiz edilmektedir. Sistem, hatalı kalıpları tespit ederek üretkenliği artırmakta ve maliyet tasarrufu sağlamaktadır. Kum kalıplar, erimiş metal dökümü öncesinde analiz edilmekte, hatalı kalıplar tespit edilerek geri dönüşüme gönderilmektedir. %88 doğrulukla çalışan bu sistem, dökümhanelerdeki üretim kaybını düşürmeye katkı sağlamaktadır. Ancak, yetersiz aydınlatma durumları görüntü işleme zorluklarına yol açarak olumsuz sonuçlar ortaya çıkarmaktadır [10].

örnektir



Şekil 11. a) Orijinal görüntü, b) Ön işlenmiş görüntü-1, c) Ön işlenmiş görüntü-2, d) Özellik tespiti-1, e) Özellik tespiti-2, f) Özellik eşleştirmesi-1, g) Özellik eşlşetirmesi-2, h) Orijinal kalıp görüntüsü ile referans görüntü arasındaki fark [10]

3.10.Üretim Süreçlerinin Optimizasyonu

Üretim sürecinde verimliliği artırmak ve hata oranlarını düşürmek için görüntü işleme sistemleri uygulanarak süreç adımlarının analiz edilip iyileştirilmesi sağlanmaktadır. Üretim hızı optimizasyonu ile birlikte kaynak kullanımı verimli duruma getirilmektedir.

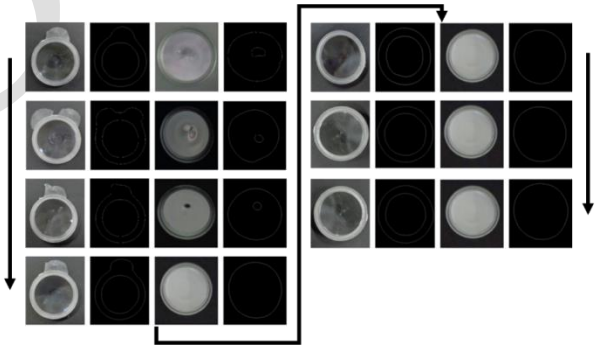
Süreç İzleme ve İyileştirme: Üretim süreçlerinin aşamaları görüntü işleme sistemleri ile izlenmekte ve elde edilen verilerin analizi ile süreçler optimize edilmektedir. Bu, üretim hattında maliyetlerin düşmesini ve hataların en aza indirilmesini sağlayarak verimliliği artırmaktadır.

Hata Analizi: Üretim sırasında meydana gelen, görüntü işleme sistemleri ile takibi sağlanan hataların kök nedenlerinin analizi yoluyla süreç iyileştirilmektedir.

Makine Performansı Takibi: Üretim makinelerinin performansı ve verimliliği, görüntü işleme çözümleriyle izlenmekte ve potansiyel sorunlar tespit edilerek olası makine arızalarının gerçekleşmesi engellenmektedir.

Örnek: Dijital görüntü işleme ve modelsiz optimizasyon yoluyla enjeksiyon kalıplama sürecinin çevrimiçi kalite optimizasyonu

Plastik malzemelerin çeşitli şekil ve özellikte ürünlere dönüştürülmesinde yaygın olarak kullanılan bir teknik olan enjeksiyon kalıplama sürecinde kalite optimizasyonu sağlamak amacıyla Dijital Görüntü İşleme (DIP - Digital Image Processing) ve Modelsiz Optimizasyon (MFO - Model-Free Optimization) yöntemlerini birleştiren çevrimiçi bir sistem geliştirilmiştir. DIP, kalıplanmış ürünlerin yüzey kusurlarını (çökme, çapak vb.) algılayıp ölçerken, MFO ise kaliteyi iyileştirmek için en uygun süreç ayarlarını belirlemektedir. Çalışma, farklı kenar algılama algoritmaları ile yüzey kusurlarının belirlenmesini sağlarken, çeşitli parametrelerle yapılan optimizasyon denemeleriyle kusurlar başarıyla giderilmiştir. Bu yöntem, enjeksiyon kalıplama sürecinde kaliteyi artırmak ve maliyeti düşürmek adına yenilikçi ve etkili bir çözüm sunmaktadır [11].



Şekil 12. DIP-MFO ile çoklu kusur optimizasyonu süreci - Deneysel tekrarlar [11]

3.11. Renk ve Desen Analizi

Renk ve desen tutarlılığının korunması gereken yerlerde, örneğin yüzey kaplamaları veya desenli ürünler için uygulanan yüzey işlemlerinde, görüntü işleme teknikleriyle analizler yapılmakta ve kontroller gerçekleştirilmektedir. Bu uygulama, hassas, estetik ve standartlara uygun ürünlerin elde edilmesine imkân tanımaktadır.

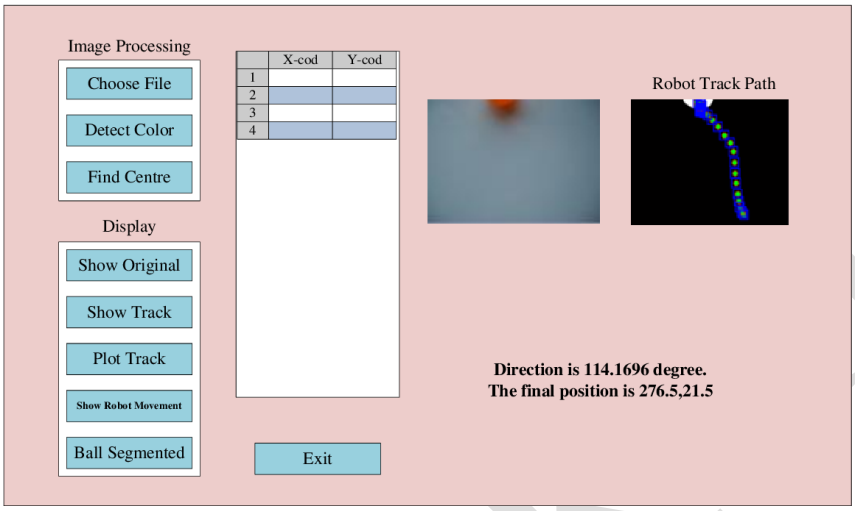
Renk Kontrolü: Ürünlerin yüzey renklerinin istenen standartlara uygunluğu görüntü işleme algoritmaları ile analiz edilerek kontrolü sağlanmaktadır. Bu yöntem, boyama ve kaplama işlemlerinde kaliteyi sağlamak açısından önemli bir unsur olarak yer almaktadır.

Desen Kontrolü: Ürünler üzerindeki desenlerin doğruluğu, tekstil, ambalaj ve dekoratif ürünler gibi alanlarda görüntü işleme ile sağlanmaktadır.

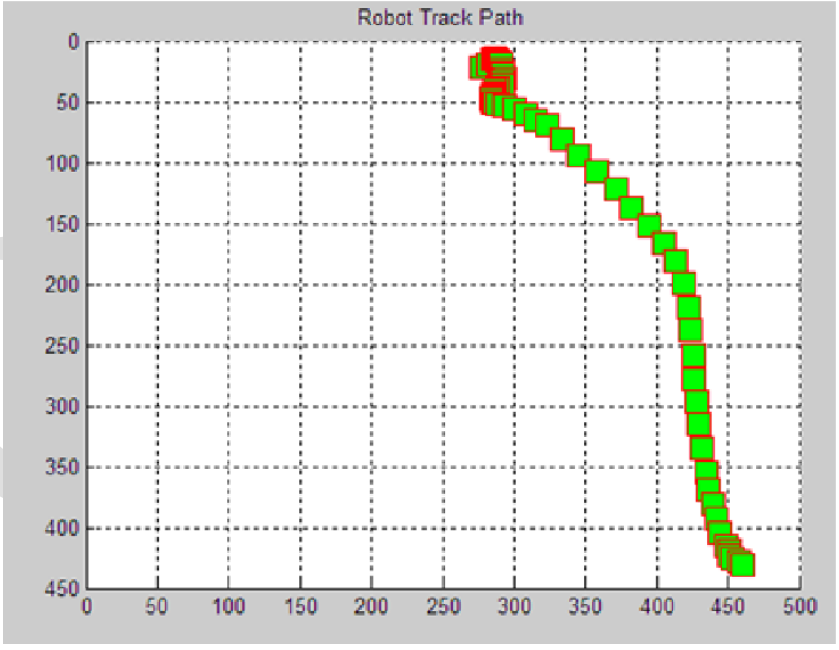
Örnek: Görüntü işleme tekniği ile gerçek zamanlı renk takip sistemine dayalı davranış ve konum için kontrol tasarımı

Gerçek zamanlı renk takip sistemi kullanarak nesnelerin davranış ve konumunu kontrol etmek için bir sistem geliştirilmiştir. Yüksek performanslı kamera ve MATLAB ile renk bileşen analizi yapılmaktadır. Sistem, otonom takip uygulamaları için uygundur ve izlenen hedef nesnenin hareketlerini tahmin etmektedir. Gerçek dünyadaki uygulamalarda yüksek doğrulukla çalışan sistem, otomatik kontrol, makine görüşü ve robotik sistemlerde kullanılabilmektedir [22].

Örnektir



Şekil 13. MATLAB ve görüntü işleme ile renk takip sistemi [12]



Şekil 14. Takip yolunun ekran görüntüsü [12]

Genel olarak, görüntü işleme teknolojileri endüstriyel alanda tasarım ve üretim süreçlerinin optimizasyonunu sağlayarak iyileştirmektedir. Süreçlerin kalitesini yükseltmekte ve hataları en aza indirmekte, bu sayede verimliliği en yükseğe taşımaktadır. Bu teknoloji, insan kaynaklı hataların önlenmesinde, otomasyon sağlayarak bağımsızlık, hız, kalite ve doğruluk kazanılmasında, tasarım ve imalat süreçlerinin her aşamasında kullanılarak, bu süreçlerin daha güvenilir ve etkin kılınmasında önemli bir araç olarak görev almaktadır.

4. SONUÇ

Görüntü işleme teknolojileri, önemi artan bir şekilde modern tasarım ve imalat süreçlerinin temel bileşenlerinden biri haline gelmiştir. Bu alanlarda benzersiz ve etkin bir dönüşüm sağlayarak hız, hassasiyet, optimizasyon ve verimlilik açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Otomasyon imkanları sayesinde, üretim sistemlerindeki hata oranları düşürülürken, süreçlerde daha tutarlı, öngörülebilir, güvenli ve standart oluşumlar sağlanmaktadır. Görüntü işleme hem küçük ölçekli işletmeler hem de büyük endüstriyel tesisler için operasyonel verimliliği yükselten kritik bir teknolojik araçtır. Hızlı dönüşen sektörlerde değişken taleplere yanıt verilmesi sürecine esneklik ve hız kazandırmaktadır. Geleneksel yöntemlerin sınırlarını aşarak, karmaşık ve hassas işlemler gibi gelişmişlik durumlarını mümkün hale getirmektedir. Sunduğu yenilikler ile söz konusu süreçlerde maliyet kazancı getirmesinin yanı sıra yeni fırsatlar sunarak rekabette öne geçmeyi sağlayan stratejik bir araç konumundadır.

Kalite kontrol aşaması, tasarım ve üretim süreçlerinin güvenilirliğini ve müşteri memnuniyetini doğrudan etkileyen kritik ve gerekli bir unsurdur. Görüntü işleme, kalite kontrol ve hata tespiti alanlarında önemli bir yere sahiptir. Yüksek çözünürlüğe sahip kameralar ve derin öğrenme gibi gelişmiş

yapay zekâ destekli algoritmalar, sadece görünür kusurları değil, yapısal ve yüzey altı bozuklukları ile birlikte çok küçük kusurları bile yüksek hassasiyet düzeyinde analiz edebilmektedir. Görüntü işlemenin doğal sonucu otomasyon, daha kısa sürelerde daha fazla ürün üzerinde inceleme yapılmasına imkân tanımaktadır. Bu yöntemler, geleneksel kalite kontrol tekniklerine kıyasla daha hassas sonuçlar sunarak üretim kalitesi üzerinde ciddi oranda artış ve daha hızlı hata tespit süreçleri sağlamaktadır. Bu sistemlerin gerçek zamanlı çalışabilme yetenekleri sayesinde süreç içerisinde kusurların anında tespiti sağlanarak hata birikmeleri ve üretim kayıpları önlenerek işgücü ve maliyetler düşürülmektedir. Sundukları gelişmiş kalite kontrol imkanları ile tasarım ve üretim süreçlerinin güvenilirliği ve sürdürülebilirliği sağlanmakta, kalite standartları en yüksek seviyeye çıkarılmaktadır.

Boyutsal doğruluk kavramının önemli olduğu sektörlerde, görüntü işleme tabanlı ölçüm teknikleri, hassas ve hızlı ölçüm gerçekleştirebilme yetenekleriyle ön plana çıkarak geleneksel ölçüm yöntemlerini geride bırakmaktadır. Özellikle havacılık, uzay, otomotiv ve medikal cihaz üretimi gibi yüksek hassasiyetin kritik olduğu alanlarda, üç boyutlu görüntü işleme teknikleri, milimetrenin altındaki daha küçük hassasiyet düzeylerinde geometrik analizler gerçekleştirerek daha kesin sonuçlar sunmaktadır. Üretim hattında gerçek zamanlı ölçümler sayesinde olası hatalar erken tespit sistemleri ile belirlenerek malzeme ve işgücü israfı önlenmektedir. Bu teknoloji, üretimde olduğu kadar prototip aşamasında da önemli bir yere sahiptir. Dijital ikiz uygulamalarıyla entegre edilen ve uyum içinde çalışan boyutsal ölçüm sistemleri, ürün tasarımı ile üretim süreçleri arasında bir köprü niteliğinde güçlü ve etkin bir bağlantı oluşturmaktadır.

Robotik sistemler ile görüntü işleme teknolojilerinin entegrasyonu, endüstri 4.0 devrimi çerçevesinde, insan müdahalesi ihtiyacını günden güne azaltarak insan-robot iş birliğini daha etkili ve verimli bir düzeye taşımıştır. Kamera

tabanlı sistemler ile donatılmasıyla çevresel faktörlere yüksek duyarlıklı yapıya gelen robotların üretim hatlarındaki değişimlere hızlı uyum sağlayabilmeleri, farklı şekil ve boyutlardaki nesneleri tanıyarak doğru pozisyonlara yerleştirebilmeleri ve karmaşık montaj vb. görevleri başarabilmeleri yüksek doğruluk ve esneklik sunmaktadır. Robot hareketlerinin optimizasyonu ile üretim ve montaj hataları en aza indirilmekte ve üretim sürekliliği sağlanarak kayıplar önlenmektedir. Esnek üretim hatlarının kurulmasını mümkün kılan akıllı robot sistemleri dinamik üretim hatlarına kolaylıkla uyumlanabilir, farklı ürünlerin aynı üretim hattında üretilmelerini kolaylaştırarak operasyonel esneklik sağlamaktadır. Bu teknolojik sistemler iş gücü ihtiyacını azaltmakta ve üretim süreçlerinde daha akıllı yapılar kurmaktadır.

Görüntü işleme teknolojileri, tasarım süreçlerinde veri odaklı bir yaklaşım sağlayarak tasarımcılara yenilikçi ve etkili kararlar verebilme imkanları sunmaktadır. Görüntü işleme-CAD entegrasyonu, tasarımcıların daha karmaşık ve detaylı modeller oluşturmalarına ortam hazırlarken, tasarım ve üretim uyumunu geliştirerek bağlantıyı güçlendirmektedir. Tersine mühendislik uygulamalarında, tarama teknolojileri ile fiziksel ürünlerin dijital modellere dönüştürülmesi, yenilikçi ürün tasarımlarını mümkün kılmaktadır. Sanal prototipleme araçları, olası hatalar için erken tespit avantajı sunarak tasarım doğrulama süreçlerinde maliyetli düzeltmeleri önleyerek tasarruf sağlarken ürün geliştirme sürecine hız kazandırarak süreleri kısaltmaktadır. Tasarım süreçlerinin, etkinlik ve verimliliği üst seviyelere taşınmakta, üretim süreçleri ile arasında etkileşimli bağlantılar kurulmaktadır.

Görüntü işleme teknolojisinin geleceği, mevcut uygulamaların sınırlarını aşarak yapay zekâ ve büyük veri analitiği gibi ileri teknolojilerle iç içe bir yapıda şekillenmekte, tasarım ve üretim alanındaki etkisinin daha da artması beklenmektedir. Dinamik tasarım ve üretim ortamlarında sistemlere öğrenme ve adaptasyon yeteneği kazandıran makine

öğrenimi gibi yapay zekâ yöntemleri ile entegrasyon, süreçleri daha bağımsız ve veri odaklı bir yapıya dönüştürecektir. Yüksek hassasiyetli modelleme, sanal prototipleme ve dijital ikiz teknolojileri gibi yöntemler, yenilikçi ve işlevsel ürün geliştirmelerini kolaylaştırarak, tasarım doğruluğunu yükselterek kalite ve hızın en üst düzeye çıkarılmasına, maliyetler, iş gücü ve kayıpların en alt seviyeye indirilmesine yardımcı olacaktır. Sürdürülebilirlik doğrultusunda atık yönetimi, enerji verimliliği ve çevre odaklı tasarım ve üretim yaklaşımları ile daha geniş ve yaygın bir kullanım alanı bulması beklenmektedir. Artan özelleştirilmiş tasarım ve üretim taleplerine daha esnek ve yenilikçi çözümler sunabileceklerdir. Tasarım ve üretim entegrasyonun derinleşmesi ile sürdürülebilirlik, verimlilik ve yenilikçilik açısından sağladığı avantajlar, yeni standartlar oluşturup endüstrilerin, dönüşümünü hızlandırarak yeni devrimler oluşturması ve temel unsurlarından biri olmaya devam ederek yerini daha da sağlamlaştırması öngörülmektedir.

Sonuç olarak, artan bir öneme sahip olan görüntü işleme teknolojileri, tasarım ve imalat süreçlerinin vazgeçilmez bir parçası olarak bir devrim meydana getirmiş, kalite ve optimizasyon yetenekleri sayesinde endüstrinin geleceğini şekillendirme ve dönüştürmede kritik bir rol üstlenmiştir. Sunduğu yenilikler, mevcut sistemlerin iyileştirilmesine imkân tanımakla kalmayıp, yeni üretim modellerinin oluşturulmasına da öncülük etmektedir. Gelecekte, teknolojik yeniliklerin etkisiyle bu alanın daha da gelişmesi ve söz konusu süreçlerin her aşamasında kaçınılmaz olarak daha yaygın bir şekilde kullanılması dolayısıyla temel bir araç olması öngörülmektedir.

5. KAYNAKÇA

Bangal, R., Nalawade, S., & Dusane, C. (2023, March). Design and Control of Omnidirectional Conveyor Model Using Image Processing. In 2023 Somaiya International Conference on Technology and Information Management (SICTIM) (pp. 44-49). IEEE.

Chung, Y. K., & Kim, K. H. (2006). Image processing based automatic inspection for assembly line of automobiles. Key Engineering Materials, 321, 1288-1292.

Gonzalez, R., & Woods, R. (2020). Digital image processing 3rd ed.

HN, N. K., Kotiyal, A., Jagadeesh, B., & Prasad, G. (2023, November). Real-Time Automated Detection of Errors in the Product Labels Using Image Processing and OCR. In 2023 International Conference on Ambient Intelligence, Knowledge Informatics and Industrial Electronics (AIKIIE) (pp. 1-6). IEEE.

Jun-Ru, W. (2020, December). Remote Monitoring System of Mechanical Manufacturing Equipment based on Digital Image Processing. In 2020 IEEE International Conference on Industrial Application of Artificial Intelligence (IAAI) (pp. 416-421). IEEE.

Li, Y. F., Han, X. X., & Li, S. Y. (2015, October). Non-contact dimension measurement of mechanical parts based on image processing. In 2015 8th International Congress on Image and Signal Processing (CISP) (pp. 974-978). IEEE.

Montalvo, L. S. S., Pulido, L. F., Flores, P. M. Q., & Cuamatzi, P. H. (2014, August). Analysis of material shape for recycling through digital image processing (ANFOR). In 2014 9th International Conference on

Software Engineering and Applications (ICSOFT-EA) (pp. 98-100). IEEE.

Sanwar, S., & Ahmed, M. I. (2023). Automated Object Sorting System with Real-Time Image Processing and Robotic Gripper Mechanism Control. Journal of Engineering Advancements, 4(03), 70-79.

Sharmila, V. C., Kumble, A. D., Martin, J., & Rinku, N. G. (2021). Detecting Surface Defects in Products of The Industrial Manufacturing Process Using Machine Learning and Image Processing. Design Engineering, 1465-1478.

Sheth, S., Kher, R., Shah, R., Dudhat, P., & Jani, P. (2010). Automatic sorting system using machine vision. In Multi- Disciplinary International Symposium on Control, Automation & Robotics.

Swe, H. M. T., Tun, H. M., & Latt, M. M. (2020). Control Design for Attitude and Position Based on Real Time Color Tracking System with Image Processing Technique. Computer and Information Science, 13(2), 1-32.

Venkatraman, S. (2020, February). Real time mold quality inspection in foundries using image processing techniques. In 2020 International Conference on Emerging Trends in Information Technology and Engineering (ic-ETITE) (pp. 1-5). IEEE.

Önekur

MAX FAZLARI: GELİŞİM SÜRECİ, YAPISAL ÖZELLİKLER VE UYGULAMALAR

Semih DURAN [1]

Hikmet ÇİÇEK [2]

1. GİRİŞ

Malzeme bilimi, teknolojik ilerlemenin öncüsü olarak, yeni malzeme sınıflarını oluşturmak ve mevcut malzemelerin özelliklerini optimize etmek üzerine yoğunlaşmıştır. MAX fazları, bu çabaların en dikkat çekici örneklerinden biridir. Bu özel malzemeler, hem seramiklerin hem de metallerin üstün özelliklerini bir araya getirerek, birçok endüstriyel ve bilimsel uygulama için çözüm sunan çok yönlü malzemelerdir.

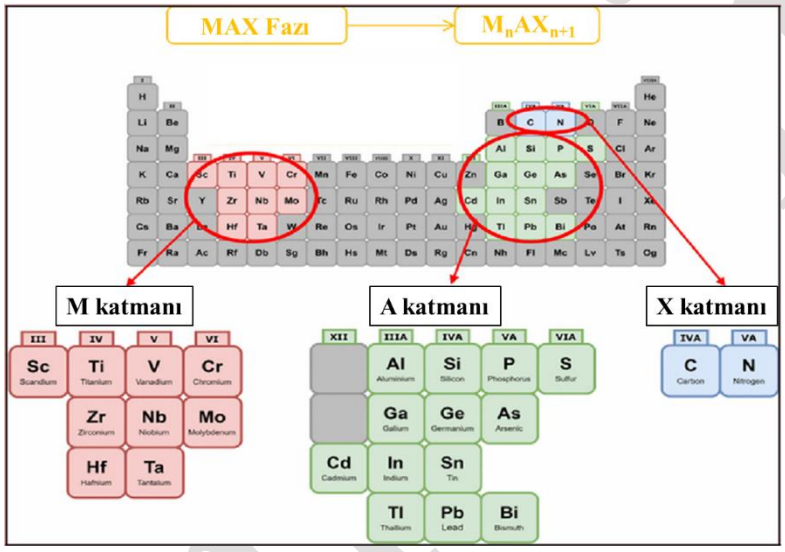
MAX fazları üçlü karbür veya nitrürlerden oluşan altıgen kristal yapıya sahiptir. Genel formülleri $M_{n+1}AX_n$ şeklinde ifade edilir; burada "M" geçiş metali, "A" A grubu elementi ve "X" karbür ya da nitrürdür (Aleksanyan et al., 2023). Şekil 1'de MAX fazlarının oluşumu için gerekli olan elementlerin periyodik tablodaki yerleri verilmiştir.

Bu malzemelerin yapısı, metal atomları (M), A grubu elementi (A) ve karbür veya nitrür atomları (X) arasında düzenli bir katmanlı yapıdan oluşur. Formülde n, M ve A katmanlarının tekrarlanma sıklığını gösterir ve genellikle 1 ile 5 arasında bir değere sahiptir (Gonzalez-Julian, 2021). Bu benzersiz katmanlı

1 Arş. Gör., Kafkas Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kars/Türkiye, Orcid: 0000-0001-7107-1461, semih.duran@kafkas.edu.tr

2 Prof. Dr., Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Erzurum/Türkiye, Orcid: 0000-0003-3038-4466, hikmet.cicek@erzurum.edu.tr

yapı, MAX fazlarına olağanüstü mekanik dayanıklılık, yüksek termal direnç ve üstün elektriksel iletkenlik gibi özellikler kazandırarak, onları çok çeşitli yüksek performans gerektiren uygulamalar için ideal hale getirir.

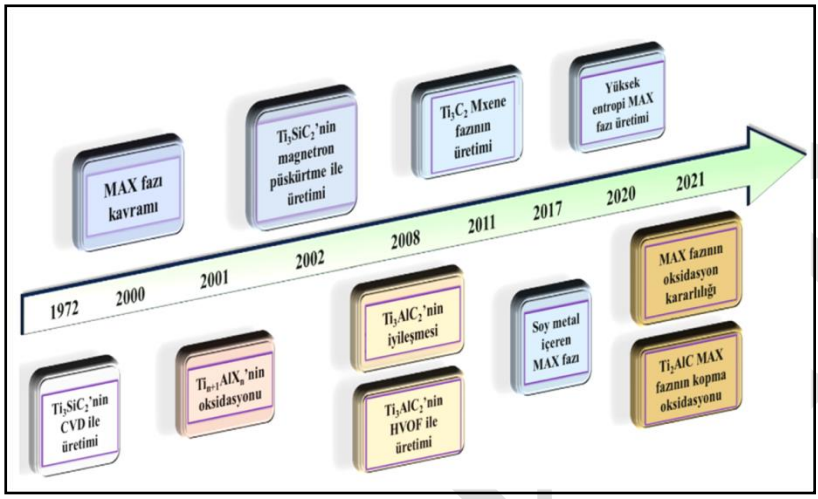


Şekil 1. MAX fazı oluşumu için gerekli elementler

Kaynak: Hada et al., 2011.

2. MAX FAZLARININ ÖNEMİ VE TARİHÇESİ

MAX fazlarının önemini anlamak için malzeme biliminin tarihine kısa bir bakış yapmak gerekir. 20. yüzyılın ortalarında, mühendislik malzemeleri üç ana kategoriye ayrılıyordu: metaller, seramikler ve polimerler. Her kategori, belirli uygulamalar için özellikler sunuyordu. Ancak, bu malzeme türlerinden her biri, diğerine kıyasla belirli sınırlamalara sahipti. Örneğin, metaller şekillendirilebilirlik ve elektrik iletkenliği açısından avantajlıyken, seramikler yüksek sıcaklık dayanımı ve sertlik sunuyordu. MAX fazlarının ortaya çıkışı, bu ayrımı kısmen ortadan kaldırmıştır.



Şekil 2. MAX fazının tarihsel gelişimi

Kaynak: Guo et al., 2024.

1960'larda Hans Nowotny ve çalışma arkadaşları tarafından keşfedilen MAX fazlarının kristal yapısı, metalik bağlar ile seramik özellikleri bir arada sunan bir malzeme sınıfı olarak tanımlanmıştır. Bu malzemeler, 1990'ların sonunda Barsoum ve El-Raghy'nin çalışmalarıyla bilim dünyasında yeniden araştırmalara konu olmuştur. Ti_3SiC_2, Ti_3GeC_2 ve Ti_4AlN_3 gibi ilk keşfedilen MAX fazlarının benzer özellikler taşıyan ortak bir yapıyı paylaştığı anlaşılmış ve bu bulgu, MAX fazları teriminin gelişmesine yol açmıştır (Eklund et al. 2010). Şekil 2'de gösterildiği gibi araştırmacılar 2000'li yılların başından itibaren MAX fazlarını kapsamlı bir şekilde incelemektedirler. Bu araştırmalar doğrultusunda, Tablo 1'de gösterildiği gibi, MAX fazları malzeme sistemleri ve stokiyometrik yapıları temel alınarak iki ayrı gruba ayrılmaktadır.

Tablo 1. MAX fazlarının sınıflandırması

Malzeme Sistemleri	Stokiyometrik Yapı				
	211	312	413	523	725
Ti-Si-C Ti-Al-C Ti-Sn-C V-Al-C	V_2AlC Ti_2AlC	Ti_3SnC_2 V_3AlC_2 Ti_3SiC_2 Ti_3AlC_2	V_4AlC_3	$Ti_5Al_2C_3$	$Ti_7Si_2C_5$

Kaynak: Atasoy ve ark., 2018.

3. MAX FAZLARININ ÖZELLİKLERİ

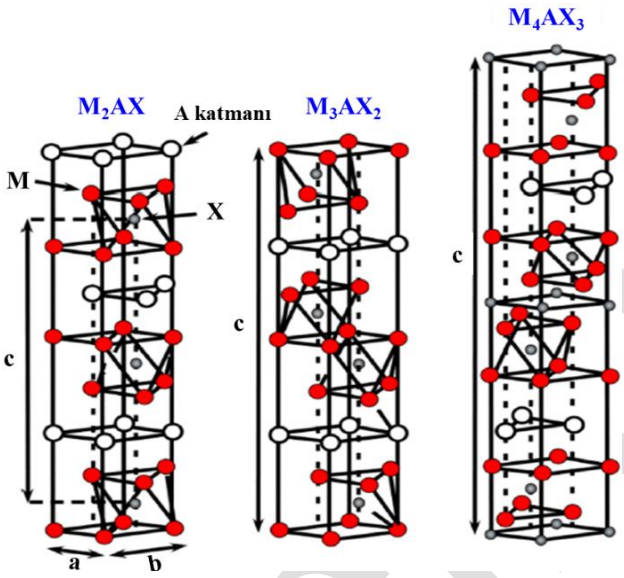
3.1. MAX Fazlarının Yapısal Özellikleri

MAX fazlarının benzersiz özellikleri, kristal yapısının bir sonucu olarak ortaya çıkar. Bu malzemeler, hekzagonal yapıdaki katmanlar halinde düzenlenmiştir. Şekil 3'te örnek olarak farklı n değerlerine (211, 312 ve 413) sahip M_2AX, M_3AX_2 ve M_4AX_3 fazlarının altıgen birim hücreleri sunulmuştur.

Yapı, **M** (örneğin, Ti, V, Cr vb.) atomlarının yer aldığı bir metal katmanı, **A** (örneğin, Al, Si vb.) atomlarının metalik bağlarla birleştiği bir ara katman ve **X** (karbon veya azot) atomlarının oluşturduğu kovalent bağlara sahip bir tabakadan oluşur. Bu katmanlı yapı:

- Metal bağlarının esnekliği sayesinde şekillendirilebilirlik sağlar.
- Kovalent bağların güçlü yapısı, yüksek sertlik ve sıcaklık dayanımı kazandırır.
- Tabakalı düzen, termal şok direnci ve düşük yoğunluk gibi özellikler sunar.

örnektir



Şekil 3. M_2AX, M_3AX_2 ve M_4AX_3 fazlarının birim hücreleri

Kaynak: Magnuson & Mattesini 2017.

Bu malzemeler, hem metal hem de seramik özelliklerinin en iyi yönlerini birleştiren "seramik metaller" olarak tanımlanabilir. MAX fazları, yüksek mekanik dayanım, iyi elektriksel iletkenlik ve mükemmel termal kararlılık gibi özellikleriyle bilinir. Ayrıca, oksidasyon ve korozyona karşı gösterdikleri direnç, onları zorlu ortamlarda kullanılabilir hale getirir. Bu malzemelerin özellikleri, kompozisyon ve yapılarının değiştirilmesiyle özelleştirilebilir, bu da belirli uygulamalar için malzemelerin geliştirilmesini sağlar. MAX fazlarının bu özellikleri, onları hem mühendislik malzemesi olarak hem de ileri teknoloji uygulamaları için ideal bir seçenek haline getirir.

3.2. MAX Fazlarının Mekanik Özellikleri

MAX fazları, metalik ve seramik özellikleri birleştiren benzersiz mekanik özelliklere sahiptir. Bu fazlar, yüksek sertlik (bulk mazleme formu için 2-5 GPa, ince film formunda 20-25 GPa arasında değişir) ve yüksek sıcaklık dayanımı gibi seramik

özelliklerini, süneklik ve hasar toleransı gibi metalik özelliklerle harmanlayarak eşsiz bir malzeme sınıfı oluşturur (Barsoum, 2013). MAX fazlarının sertlik ve süneklik dengesi, onları diğer seramik malzemelerden ayıran en temel özelliklerden biridir. Tipik seramikler, yüksek sertliklere (genellikle >10 GPa) sahip olsa da kırılganlıkları nedeniyle çatlama eğilimindedir. Ancak MAX fazlarında, metalik bağlar sayesinde malzemeler daha dayanıklı hale gelir. Yüksek süneklikleri, enerji emilim kapasitesini artırarak malzemenin dinamik yükler altında daha iyi performans göstermesini sağlar. Ek olarak, MAX fazlarının elastik modül değerleri genellikle yüksektir. Bulk MAX fazlarında elastik modül 200-300 GPa arasında iken, ince film formunda bu değer 400-450 GPa seviyelerine çıkabilir. Bu yüksek elastik modül değerleri, termomekanik stabiliteyi artırarak mühendislik uygulamalarında malzemenin dayanıklılığını sağlar. Ayrıca MAX fazlarının yüksek kırılma dayanımı, çatlaklara karşı üstün direnç gösterir. Katmanlı yapılar, çatlak ilerlemesini engellemede kritik bir rol oynar. Çatlaklar, bu katmanlar arasında ilerlemeye çalışırken yön değiştirerek zayıflar ve malzemenin tamamen kırılmasını geciktirir veya önler. Delaminasyon etkisi sayesinde çatlaklar yatay olarak ilerler, bu da enerjinin geniş bir alana yayılmasına olanak tanır ve yapının bütünlüğünü korur. Bu özellik, MAX fazlarını uçak motorları, türbinler ve enerji sektöründeki kritik bileşenler için ideal hale getirir.

3.3. MAX Fazlarının Tribolojik Özellikleri

MAX fazları, metalik ve seramik özellikleri birleştirerek, yüksek sıcaklık ve mekanik stres altında üstün tribolojik performans sergileyen malzemelerdir. Bu fazlar aşınma direnci, düşük sürtünme katsayısı ve yüksek sertlik gibi özellikleriyle dikkat çeker. Özellikle Ti_2AlN gibi MAX fazları, oksidasyon koşullarında bile düşük sürtünme katsayıları (0,15-0,50) göstererek, yüksek sıcaklıkta ve yüksek hızda çalışan sistemler

için oldukça uygundur (Hopfeld et al. 2014). Bu zorlu koşullarda mekanik özelliklerini koruma yetenekleri, MAX fazlarını uçak motorları ve yüksek sıcaklıkta çalışan makine elemanları gibi uygulamalar için değerli kılar. MAX fazlarının mikro yapısındaki katmanlı yapı, yüzeydeki yerel deformasyonu ve sertliği etkileyerek aşınma direncini artırır. Örnek literatür çalışmaları incelendiğinde, aşınma oranlarının 10^{-4} $mm^3/(N \cdot m)$ seviyelerine kadar düştüğü görülmektedir (Cakir etl al. 2024). Ayrıca, MAX fazlarının yüzeyinde oksitlenme sonucu oluşan ince oksit katmanları, tribolojik performansı artırarak sürtünme katsayısını daha da düşürebilir. Bu malzemelerin tribolojik özellikleri, yüksek sıcaklık, yüksek hız, aşırı basınç ve korozif ortamlar gibi zorlu çalışma koşullarında değerli olup, yeni nesil yüksek performanslı kaplamaların geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

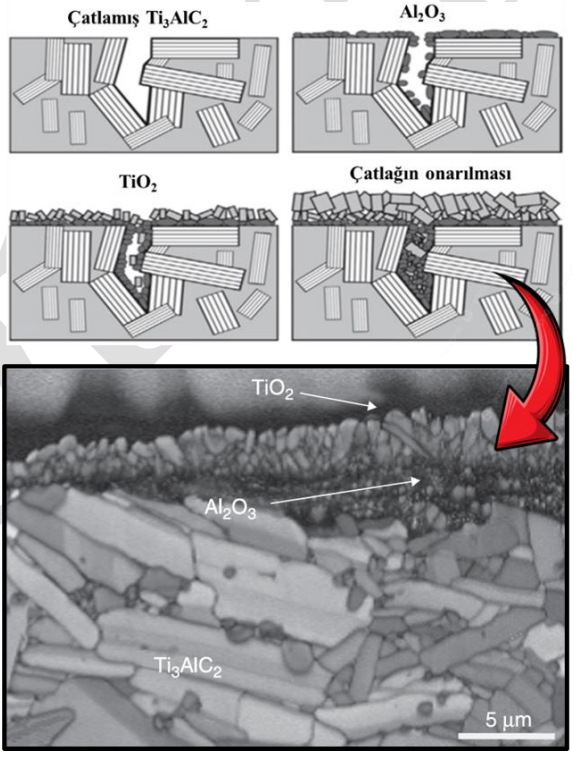
3.4. MAX Fazlarının Oksidasyon ve Korozyon Özellikleri

MAX fazları, kimyasal dirençleri açısından oldukça avantajlı malzemelerdir. Bu fazlar, özellikle yüksek sıcaklıklarda ve agresif kimyasal ortamlarda üstün performans sergiler. Örneğin, Ti_2AlN gibi MAX fazları, oksidasyona ve asidik ortamlara karşı oldukça dirençlidir. Oksidasyon testleri, bu malzemelerin yüksek sıcaklıklarda bile oksitlenmeye karşı direnç gösterdiğini ve yüzeylerinde koruyucu oksit tabakalarının oluştuğunu göstermektedir. Ayrıca, Ti_2AlN ve benzeri MAX fazları, asidik çözeltilerde, özellikle sülfürik asit ve nitrik asit gibi asidik ortamlarda iyi kimyasal dayanıklılığa sahiptir. Bu, onları kimyasal işleme ve aşındırıcı ortamlara maruz kalan uygulamalarda kullanıma uygun hale getirir. MAX fazlarının kimyasal dayanıklılığı, aynı zamanda yüksek sıcaklık oksidasyonunun yanı sıra, düşük sıcaklıklarda da su buharı gibi reaktif bileşiklere karşı iyi direnç gösterdiği anlamına gelir. Ek olarak, bu malzemeler, metal tuzları ve bazik çözeltilere karşı

sergiledikleri yüksek direnç sayesinde, zorlu kimyasal ortamlarda uzun ömürlü ve güvenilir bir performans sunar. Bu özellikler, MAX fazlarını otomotiv, havacılık, enerji üretimi ve diğer endüstriyel uygulamalar için ideal malzemeler yapmaktadır.

3.5. MAX Fazlarının Kendi Kendini İyileştirme Özellikleri

MAX fazlarının kendi kendini iyileştirme özellikleri, özellikle ısıl işlem uygulamaları ile belirginleşir ve bu özellik, malzemenin tribolojik ve mekanik performansını önemli ölçüde artırır. Bu fazlar, yüksek sıcaklıklarda kendilerini onarma yeteneğine sahip olup, yüzeydeki hasarları ve mikroskobik çatlakları iyileştirebilme kapasitesine sahiptir.

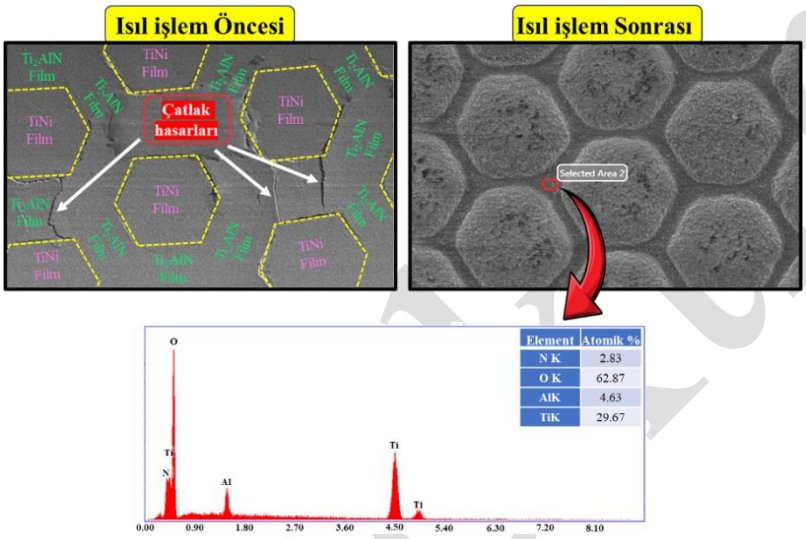


Şekil 4. Ti_3AlC_2 MAX fazının kendi kendini iyileştirmesi

Kaynak: Song, 2012.

Isıl işlem uygulanması sırasında MAX fazlarının yüzeyinde oksidasyon ve termal reaksiyonlar gerçekleşir ve bu süreç, özellikle oksit tabakalarının oluşumuna neden olur. M ve A elementlerinin oksidasyonu, çatlakların bulunduğu bölgelerde malzeme hacmini artırarak bu çatlakların doldurulmasını sağlar. Örneğin, Şekil 4'te gösterildiği gibi, Ti_3AlC_2 MAX fazı alaşımında, ilk olarak Al elementinin yüzeye difüze olduğu ve oksitlenerek bir koruyucu tabaka oluşturduğu gözlemlenir. Daha uzun süreler boyunca yüksek sıcaklık koşullarına maruz kalındığında ise TiO_2 oluşumu devreye girer. Bu şekilde meydana gelen oksitlenmiş tabakalar, çatlakları tamamen doldurarak alaşımın ilk mekanik özelliklerini yeniden kazanmasına olanak tanır. Bu oksit katmanları, aşınma, çatlama veya mikroskobik hasarların meydana geldiği bölgelerde bir bariyer oluşturarak daha fazla hasarın yayılmasını engeller ve malzemenin dayanıklılığını artırır. Isıl işlem, aynı zamanda MAX fazlarının iç yapısındaki gerilmeleri ve deformasyonları da düzelterek, malzemenin yapısal bütünlüğünü yeniden kazandırır. Bu, özellikle sıcaklık arttıkça, metalik ve seramik bileşenler arasında daha güçlü bağların oluşmasına olanak tanır. Ayrıca, uygulanan ısıl işlemin derecesi ve zamanı, yüzeydeki çatlakların tamamen kapanmasını sağlar. Böylece malzemenin uzun ömürlü olmasına ve zorlu çalışma koşullarında daha az bakım gerektirmesine olanak tanır. Şekil 5'te magnetron püskürtme yöntemi ile üretilen petek yapısına sahip TiNi/MAX filmlerin kendi kendini iyileştirme özellikleri sunulmaktadır. Kenar kısımları Ti_2AlN MAX fazından oluşan bu petek yapılı filmlere yaklaşık 2 saat süre ile 800°C'de ısıl işlem uygulanmıştır. Sonrasında MAX fazı film bölgelerinde oluşan çatlak hasarlarının tamamen iyileştiği görülmüştür. İyileşme gösteren hasarlı bölgelerden alınan EDS sonuçları incelendiğinde, bu bölgelerde yüksek miktarda titanyum (Ti), alüminyum (Al) ve oksijen (O) elementlerinin bulunduğu tespi edilmiştir. Bu durumda iyileşmenin Ti_2AlN MAX fazı

yapısındaki Ti ve Al atomlarının oksidasyonu sonucunda meydana geldiği görülmüştür.



Şekil 5. TiNi/MAX filmlerin kendi kendini iyileştirmesi

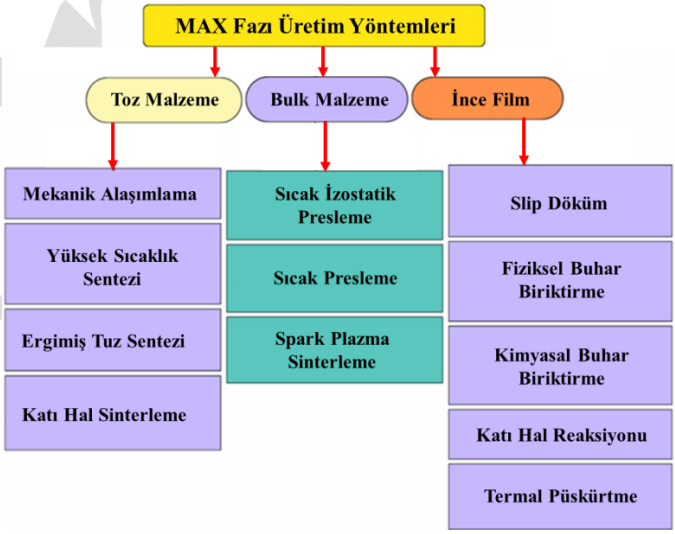
Kaynak: Duran, 2024.

Sonuç olarak, MAX fazlarının sahip olduğu kendi kendini iyileştirebilme yeteneği, özellikle yüksek sıcaklıkta çalışan parçalar ve tribolojik kaplamalar gibi uygulamalarda oldukça değerli hale gelir. Bu özellikler sayesinde MAX fazları, mekanik ve kimyasal dayanıklılıklarını artırarak, zorlu çalışma ortamlarında uzun süreli performans sunar ve yapısal bütünlüklerini koruyarak malzemenin verimli bir şekilde kullanılmasını sağlar.

4. MAX FAZLARININ ÜRETİM YÖNTEMLERİ

MAX fazlarının üretimi, genellikle sıvı faz sentezi ve katı faz sentezi yöntemleriyle gerçekleştirilir. Katı faz sentezi, en yaygın kullanılan yöntem olup, özellikle yüksek sıcaklıkta

reaksiyonlar kullanarak MAX fazlarının oluşumunu sağlar. Bu yöntemde, uygun elementlerin tozları (örneğin, Ti, Al, N, C) karıştırılır ve yüksek sıcaklıklarda (genellikle 1300-1600°C arasında) reaksiyona sokulur. Bu reaksiyonlar sırasında, metalik ve seramik bileşiklerin birleşimi sonucu MAX fazları meydana gelir. Magnetron sputtering gibi ince film kaplama yöntemleri de MAX fazlarının üretimi için kullanılır. Bu yöntemde, hedef malzeme üzerinde iyonlaştırılmış gazlar kullanılarak ince filmler oluşturulur ve MAX fazlarının yüzeydeki yapıları elde edilir. Diğer bir yöntem ise reaktif kaynaklı sinterleme (Reactive Sintering), burada elementler arasındaki kimyasal reaksiyonlar, daha düşük sıcaklıklarda (1000-1400°C) gerçekleşir. Bu süreç, MAX fazlarının homojen ve yoğun yapılarla üretilmesine olanak tanır. Ayrıca, sol-jel yöntemi, kimyasal buhar biriktirme (CVD) ve elektrospinning gibi yöntemler de MAX fazlarının nano yapılı örneklerinin üretilmesinde kullanılabilir. Şekil 6'da MAX fazlı malzemelerin üretiminde kullanılan farklı sentez yöntemleri ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur.

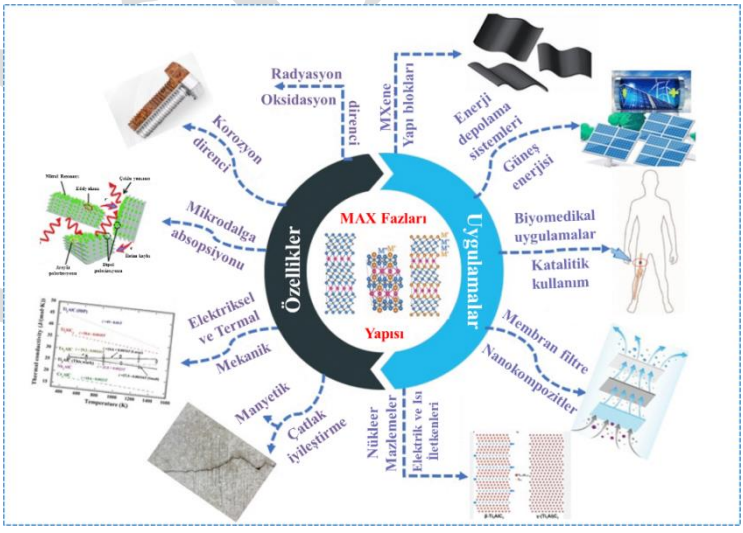


Şekil 6. MAX fazlarının üretimi için kullanılan yöntemler
Kaynak: Alam et al., 2024.

MAX fazlarının üretimi için kullanılan bu yöntemler, malzemenin morfolojik özellikleri ve nihai performansı üzerinde büyük etkiye sahip olup, her bir yöntem farklı uygulamalarda üstünlük sağlayabilir. Bu üretim yöntemleri sayesinde, MAX fazları, özellikle yüksek sıcaklık ve kimyasal dayanıklılık gereksinimlerini karşılayan malzemeler olarak geniş bir endüstriyel yelpazede kullanılabilir.

5. MAX FAZI UYGULAMA ALANLARI

MAX fazları, özellikle yüksek sıcaklık uygulamaları, tribolojik kaplamalar, enerji depolama malzemeleri ve biyomedikal kullanımlar gibi geniş bir yelpazede önemli uygulama potansiyeline sahip olan malzemelerdir. Bu fazlar, seramik ve metal özelliklerini birleştirerek, her iki malzemenin de avantajlarını sunar; bu da onları zorlu koşullar altında kullanılabilir hale getirir. Şekil 7'de MAX fazlarının özellikleri ve uygulama alanları gösterilmektedir.



Şekil 7. MAX fazlarının özellikleri ve uygulama alanları

Kaynak: Alam et al., 2024

Yüksek sıcaklık uygulamalarında, MAX fazları, yüksek erime noktaları, termal stabilite ve oksidasyona karşı dirençleri sayesinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu malzemeler, özellikle motor parçaları, sıcak gaz kompresörleri ve enerji üretim sistemleri gibi yüksek sıcaklıkta çalışan bileşenlerde tercih edilir. Tribolojik kaplamalar alanında, MAX fazları, yüksek sertlik, aşınma direnci ve düşük sürtünme katsayıları ile dikkat çeker. Bu özellikler, otomotiv endüstrisi, havacılık ve diğer endüstriyel makinelerde kullanılan kaplamalar için idealdir. MAX fazlarının tribolojik özellikleri, özellikle yüksek sıcaklıklarda oksidasyon katmanlarının oluşturulmasıyla daha da iyileşebilir, bu da sürtünmeyi azaltarak verimliliği artırır. Enerji depolama malzemeleri olarak, MAX fazlarının nanoyapıları ve elektriksel iletkenlikleri, özellikle batarya ve süperkapasitör gibi enerji depolama cihazlarında potansiyel kullanım alanı sunmaktadır. Bu malzemeler, enerji depolama verimliliğini artırmaya yönelik uygulamalarda araştırılmaktadır. Biyomedikal alanda ise, MAX fazlarının biyouyumluluğu ve mekanik özellikleri, özellikle protezler, implantlar ve diğer medikal cihazlarda kullanılmalarını mümkün kılmaktadır. Bu malzemeler, biyolojik ortamlarda uzun ömürlü performans gösterir ve vücutla uyumlu bir şekilde çalışabilir. Genel olarak, MAX fazları, üstün mekanik ve kimyasal özellikleri sayesinde, bir çok alanda güçlü bir potansiyele sahiptir ve gelecekte daha geniş uygulama alanlarına sahip olmaları beklenmektedir.

6. SONUÇ

MAX fazları, son yıllarda mühendislik malzemeleri alanında büyük bir potansiyele sahip olmuştur. Metalik ve seramik özelliklerini birleştiren bu malzemeler, mekanik ve termal özellikleri sayesinde çeşitli sanayi alanlarında önemli bir yer edinmiştir. Bununla birlikte, MAX fazlarının potansiyeli yalnızca mevcut kullanım alanlarıyla sınırlı değildir.

Araştırmalar, bu malzemelerin gelecekteki gelişiminde çok daha geniş bir uygulama yelpazesi sunduğunu ve bu alandaki ilerlemelerin mühendislik ve bilim dünyasında yenilik yaratabileceğini göstermektedir.

Yeni nesil MAX fazları, özellikle yüksek sıcaklık dayanımı ve aşınma direncinin yanı sıra, elektrik ve termal iletkenlik gibi özelliklerde de önemli iyileştirmeler sunmaktadır. Bu özellikler, enerji verimliliği, dayanıklılık ve güvenlik gibi temel mühendislik ihtiyaçlarını karşılamak için oldukça avantajlıdır. Özellikle enerji üretiminde, bu malzemelerin yüksek sıcaklık dayanımları ve termomekanik stabiliteleri, enerji kayıplarını azaltarak verimliliği artırabilir. Aynı şekilde, havacılık ve otomotiv sektörlerinde, MAX fazları içeren yüksek performanslı parçalar üretilerek güvenliği artırılabilir ve bileşenlerin servis ömrü uzatılabilir. Bunların yanı sıra, MAX fazlarının elektronik ve termal iletkenlik özellikleri, hem yüksek verimli termal yönetim sistemlerinin geliştirilmesine olanak tanıyacak hem de daha dayanıklı makine elemanlarının tasarımını mümkün kılacaktır.

Sonuç olarak, MAX fazlarının gelecekteki potansiyeli, mühendislik dünyasında önemli bir yenilikçi güce dönüşebilir. Teknolojik ilerlemelerle birlikte, bu malzemelerin kullanım alanları her geçen gün genişlemekte ve onları gelecekteki uygulamalar için popüler malzemeler haline getirmektedir. Bu gelişmeler, yalnızca sanayi için değil, aynı zamanda sürdürülebilir üretim süreçlerinin oluşturulmasında da önemli adımlar atılmasına olanak tanıyacaktır.

7. KAYNAKÇA

Alam, M. S., Chowdhury, M. A., Khandaker, T., Hossain, M. S., Islam, M. S., Islam, M. M., & Hasan, M. K. (2024). Advancements in MAX phase materials: structure, properties, and novel applications. *RSC advances*, *14*(37), 26995-27041.

Aleksanyan, A. G., Dolukhanyan, S. K., Mayilyan, D. G., Muradyan, G. N., Ter-Galstyan, O. P., & Mnatsakanyan, N. L. (2023). Formation of Ti2AlNx MAX phase by "Hydride Cycle" and SHS methods. *Ceramics International*, *49*(14), 24229-24234.

Atasoy, A., Saka, E., & Koşar, A. (2018). Ti3SiC2 MAX Fazının Elementel Toz Kullanılarak Sentezi. *Engineering Sciences*, *13*(3), 156-166.

Barsoum, M. W. (2013). *MAX phases: properties of machinable ternary carbides and nitrides*. John Wiley & Sons.

Cakir, M., Cicek, H., Duran, S., Yilmaz, A. M., Gulten, G., & Efeoglu, I. (2024). The effect of different annealing temperatures on the mechanical and tribological properties of the Ti2AlN MAX phase films. *Surface Engineering*, *40*(2), 157-167.

Duran S., (2024). *TiNi/MAX kompakt kaplamaların üretilmesi, yapısal, mekanik, tribolojik ve kendi kendini onarma özelliklerinin araştırılması.* ETÜ (Doktora Tezi).

Eklund, P., Beckers, M., Jansson, U., Högberg, H., & Hultman, L. (2010). The Mn+ 1AXn phases: Materials science and thin-film processing. *Thin Solid Films*, *518*(8), 1851-1878.

Gonzalez-Julian, J. (2021). Processing of MAX phases: From synthesis to applications. *Journal of the American Ceramic Society*, *104*(2), 659-690.

Guo, M., Cao, G., Pan, H., Guo, J., Chen, C., Zhang, B., & Hu, J. (2024). Recent progress in synthesis of MAX phases and oxidation & corrosion mechanism: a review. *Materials Research Letters*, *12*(11), 765-796.

Hada, V., Malvi, D., Mili, M., Khan, M. M., Chaturvedi, G., Hashmi, S. A. R., ... & Verma, S. (2022). MXenes: promising 2D materials for wound dressing applications–a perspective review. *Materials Advances*, *3*(20), 7445-7462.

Hopfeld, M., Grieseler, R., Vogel, A., Romanus, H., & Schaaf, P. (2014). Tribological behavior of selected Mn+ 1AXn phase thin films on silicon substrates. *Surface and Coatings Technology*, *257*, 286-294.

Magnuson, M., & Mattesini, M. (2017). Chemical bonding and electronic-structure in MAX phases as viewed by X-ray spectroscopy and density functional theory. *Thin Solid Films*, *621*, 108-130.

Song, G. M. (2012). Self-healing of MAX phase ceramics for high temperature applications: evidence from Ti3AlC2. In *Advances in science and technology of Mn+ 1AXn phases* (pp. 271-288). Woodhead Publishing.

Örnek

LIFE CYCLE COST ANALYSIS BASED ON THE EXTERNAL WALLS OF A HOSPITAL BUILDING[1]

İsmail CANER[2]

Nadir İLTEN[3]

1. INTRODUCTION

When evaluating global energy consumption, the residential and service sectors represent a significant share, ranging between 20% and 40% in developed countries. This highlights the critical role these sectors play in overall energy demand. In Turkey, the distribution of final energy consumption presents a similar pattern, where 35% of energy is used by the residential and service sectors, followed by 34% in the industrial sector and 25% in transportation. This data underscores the importance of addressing energy efficiency in residential and service sectors to achieve meaningful reductions in overall energy use (Dombayci, 2006).

A closer examination of energy consumption within the residential and service sectors reveals variations across countries, particularly in the share attributed to hospitals. Hospitals typically account for 6% to 11% of the energy consumed in these sectors. While this percentage might appear

1 This chapter is derived from İsmail CANER's PhD thesis, Optimization of Heating and Cooling Load in Hospitals in Terms of Thermal Comfort and Energy Consumption, Institute of Science, Balikesir University.

2 Assist. Prof., University of Balikesir, Eng. Faculty, Mech Eng. Dept., ismail@balikesir.edu.tr, ORCID: 0000-0003-1232-649X.

3 Prof. Dr., University of Balikesir, Eng. Faculty, Mech Eng. Dept., nilten@balikesir.edu.tr, ORCID: 0000-0003-4009-5078.

örnektir

relatively modest compared to the total energy usage in the residential sector, its significance becomes evident when considering the potential for energy savings and the importance of maintaining optimal thermal comfort conditions in healthcare facilities.

Hospitals are energy-intensive facilities due to their operational requirements, such as maintaining strict indoor climate control, running advanced medical equipment, and providing uninterrupted services. Thus, they offer considerable opportunities for energy efficiency improvements. Beyond the direct benefits of reduced energy consumption and cost savings, improving hospital thermal comfort conditions is critical for enhancing patient well-being and staff performance. These factors make hospitals a priority target for energy efficiency initiatives and infrastructure upgrades (Khodakarami, 2009).

In light of these considerations, adopting energy-efficient technologies, retrofitting existing hospital facilities, and implementing sustainable energy management practices could profoundly reduce energy consumption while improving the quality of healthcare services (Sharma, 2011, Nwodo, 2019).

Bu The purpose of this chapter is to analyze the energy savings, life cycle savings, and total life cycle costs of the exterior walls of a hospital building based on five different insulation materials under ASHRAE and TS 825 standards. Long-term energy consumption has been assessed through life cycle cost calculations. Based on these calculations and previously determined optimal insulation thicknesses for the hospital building's exterior walls, the energy savings achievable through wall insulation have been evaluated. For residential buildings, the Turkish insulation standard TS 825 specifies an indoor temperature of 19°C. However, the indoor temperatures for hospital buildings are set at 22°C and 24°C. This difference

in temperature settings may lead to variations in energy consumption.

2. MATERIAL AND METHOD

The total heating cost for an N-year lifespan is evaluated using the Present Value Factor (PWF). Life cycle cost analysis is an economic assessment technique that calculates the cost of a component or system over its lifespan (Kon, 2018). This analysis is influenced by factors such as the lifespan, interest rates, and inflation rates, which also impact the optimum insulation thickness. It is important to note that interest (i) and inflation (g) rates are not constant. Changes in these rates lead to variations in the PWF and, consequently, in the optimum insulation thickness (Table 1).

Table 1. Parameters used in the study for fuels and costs

Parameter	Value
Fuel	
Natural gas	
Price, C_y	0.385 \$/m^3
Efficiency, η	0.90
Lover heating value, H_u	34.48510^6 J/m^3
Electricty	
Price	0.107 \$/kWh
Financial values	
Interest rate, (i)	%7.25
Inflation rate, (g)	%11.13
Life, N	10 year
PWF	8.27

Kaynak: Caner, 2020.

Table 2 provides the indoor temperatures considered in the degree day calculation based on the standards used in the study.

Table 2. Heating-cooling degree-day values to be used in calculations for the building (Caner, 2020).

	Heating Degree-day	Cooling Degree-day	Indoor air temperature (^oC)
TS 825	2719	194	22
ASHRAE 55	3277	23	24

The total annual heating and cooling fuel cost consumed is (Kon, 2021);

$$C_{A,H,C} = \left(\frac{86400PWF.0.5}{R_{t,w}+x/k}\right).\left(\frac{C_y.IDG}{H_u.\eta}+\frac{C_e.SDG}{COP}\right) \quad (1)$$

The total heating and cooling cost is;

$$C_{t,H,C} = \left(\frac{86400PWF.0.5}{R_{t,w}+x/k}\right).\left(\frac{C_y.IDG}{H_u.\eta}+\frac{C_e.SDG}{COP}\right)+\left(C_{ylt}.x\right) \quad (2)$$

The optimum insulation thickness for heating and cooling is;

$$x_{optH,C} = 293.94.\left(\frac{IDG.C_y.k.PWF.0.5}{H_u.C_{ylt}.\eta}+\frac{SDG.C_e.k.PWF0.5}{C_{ylt}.COP}\right)^{1/2} - k.R_{t,w} \quad (3)$$

Payback period of insulation material;

$$PP = \frac{C_{t,ylt}}{A_s} \quad (4)$$

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

Equations 1 to 4 were used to calculate the Energy savings, life cycle savings, total life cycle cost, and payback periods for five different insulation products. The results are given in Table 1.

Table 3. Energy savings, life cycle savings, total life cycle cost, and payback periods were calculated for five different insulation materials for building external walls according to ASHRAE and TS 825 standards.

Standard	EPS	XPS	GW	RW	PUR
Energy Saving ($/m2)					
TS 825	9.6358	7.4328	12.2316	11.8426	7.6741
ASHRAE	13.6741	10.9842	14.9246	14.4312	10.2158
Life cycle cost ($/m2)					
TS 825	25.8613	21.9416	33.5832	32.4332	20.3124
ASHRAE	33.3846	29.5198	42.0216	40.9614	26.7418
Life cycle total cost ($/m2)					
TS 825	105.1622	115.4224	85.2718	88.9078	121.7314
ASHRAE	118.4318	127.6814	94.9310	97.0618	134.256
Payback period (year)					
TS 825	0.81	0.61	1.23	1.17	0.55
ASHRAE	0.91	0.75	1.38	1.30	0.66

When examining the Energy Savings, Life Cycle Savings, and Life Cycle Costs graphs for five different insulation materials used on walls according to ASHRAE-55, the energy savings were calculated as follows: 13.67 ($/m²) for EPS insulation, 10.98 ($/m²) for XPS insulation, 14.92 ($/m²) for GW insulation, 14.43 ($/m²) for RW insulation, and 10.21 ($/m²) for PUR insulation. According to ASHRAE-55, the life

cycle savings for EPS insulation were 33.38 ($/m²), 29.51 ($/m²) for XPS insulation, 42.02 ($/m²) for GW insulation, 40.96 ($/m²) for RW insulation, and 26.74 ($/m²) for PUR insulation. The life cycle costs for insulation materials under ASHRAE-55 were calculated as follows: 118.43 ($/m²) for EPS, 127.68 ($/m²) for XPS, 94.93 ($/m²) for GW, 97.06 ($/m²) for RW, and 134.25 ($/m²) for PUR. According to ASHRAE-55, the payback periods of the insulation materials were determined to be 0.91 years for EPS, 0.75 years for XPS, 1.38 years for GW, 1.30 years for RW, and 0.66 years for PUR.

When examining the Energy Savings, Life Cycle Savings, and Life Cycle Costs graphs for five different insulation materials used on walls according to TS 825, the energy savings were calculated as follows: 9.63 ($/m²) for EPS insulation, 7.43 ($/m²) for XPS insulation, 12.23 ($/m²) for GW insulation, 11.84 ($/m²) for RW insulation, and 7.67 ($/m²) for PUR insulation. According to TS 825, the life cycle savings for EPS insulation were 25.86 ($/m²), 21.94 ($/m²) for XPS insulation, 33.58 ($/m²) for GW insulation, 32.43 ($/m²) for RW insulation, and 20.31 ($/m²) for PUR insulation. The life cycle costs for insulation materials under TS 825 were calculated as follows: 105.16 ($/m²) for EPS, 115.42 ($/m²) for XPS, 85.27 ($/m²) for GW, 88.90 ($/m²) for RW, and 121.73 ($/m²) for PUR. According to TS 825, the payback periods of the insulation materials were determined to be 0.81 years for EPS, 0.61 years for XPS, 1.23 years for GW, 1.17 years for RW, and 0.55 years for PUR.

4. CONCLUSIONS

The following results were obtained when the data obtained from the study were analysed;

According to ASHRAE-55, energy savings were calculated as EPS 13.67 $/m², XPS 10.98 $/m², GW 14.92 $/m², RW 14.43 $/m², and PUR 10.21 $/m². Life cycle costs were determined as EPS 118.43 $/m², XPS 127.68 $/m², GW 94.93 $/m², RW 97.06 $/m², and PUR 134.25 $/m². The shortest payback periods were for PUR (0.66 years) and XPS (0.75 years). According to TS 825, GW (12.23 $/m²) and RW (11.84 $/m²) had the highest energy savings, while PUR had the lowest (7.67 $/m²). GW was the most cost-effective option for life cycle costs at 85.27 $/m².

Efforts should focus on improving insulation materials' performance and developing more sustainable production processes.

Ömer

5. REFERENCES

Caner, İ. (2020) Optimization of Heating and Cooling Load in Hospitals in Terms of Thermal Comfort and Energy Consumption, PhD thesis, Balikesir University Institute of Science.

Dombayci, Ö. A., Gölcü, M. and Pancar, Y. (2006) 'Optimization of insulation thickness for external walls using different energy-sources', Applied Energy, doi: 10.1016/j.apenergy. 2005.10.006.

Khodakarami, J., Knight, I. and Nasrollahi, N. (2009) 'Reducing the demands of heating and cooling in Iranian hospitals', Renewable Energy, Vol. 34, No. 4, pp.1162–1168, Elsevier Ltd, doi: 10.1016/j.renene.2008.06.023.

Kon, O. (2018). Calculation of fuel consumption and emissions in buildings based on external walls and windows using economic optimization.

Kon, O., Caner, İ., & İlten, N. (2021). Life cycle assessment of energy-efficient improvement for external walls of hospital building. International Journal of Global Warming, 25(3-4), 408-424.

Nwodo, M. N., & Anumba, C. J. (2019). A review of life cycle assessment of buildings using a systematic approach. Building and Environment, 162, 106290.

Sharma, A., Saxena, A., Sethi, M., & Shree, V. (2011). Life cycle assessment of buildings: a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(1), 871-875.

Örnekir

PLA, PLA KOMPOZİT VE KARIŞIMLARININ UYGULAMA ALANLARI VE ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Hakan KAZAN

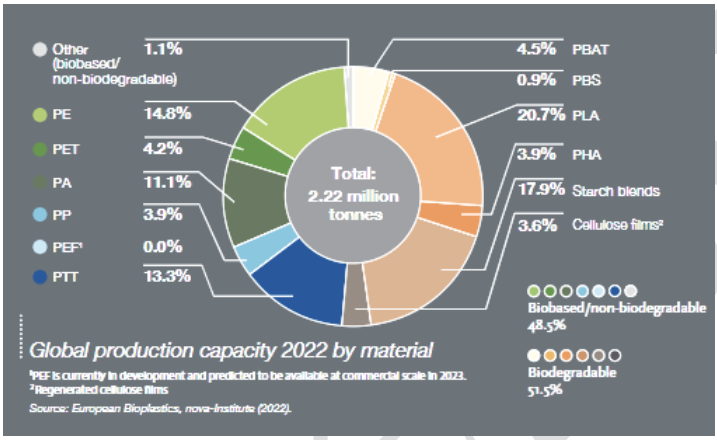
1. GİRİŞ

Petrol türevi plastikler atıldıktan sonra çevrede yüzlerce yıl kalabildikleri için küresel kirliliğin önemli bir kaynağıdır. Plastik üretimi, kullanımı ve imhası, döngüsel yaklaşımın ekonomik faydalarından tam olarak yararlanamamakta ve ciddi çevresel zararlara neden olmaktadır. Bu sebeple, plastik ürünlerin kullanım ömrü sonunda yaşanan verimsizliklerin nedenlerini belirleyerek daha verimli yöntem ve malzemelerin kullanımı ile döngüsel ekonomiye geçiş yapabilecek stratejiler geliştirmek kritik önem taşımaktadır (Robaina vd., 2020). Sürekli artan dünya nüfusu ile bağlantılı olarak plastik üretimi de artış göstermekte olup günümüzde yaklaşık 430 milyon tona ulaşmıştır. Bununla birlikte bu üretilen plastiklerin yalnızca %1'i biyo-bazlı ve doğada çözünebilen malzemelerden oluşmaktadır (Plastics Europe, 2023). Hafif, dayanıklı, düşük maliyetli ve kolay üretilebilir olmaları petrol bazlı plastikleri tercih sebebi yapmakla beraber uygunsuz bertaraf ve yönetim nedeniyle %80'i doğaya geri dönen bu plastikler çevresel atık olarak değerlendirilmektedir (Soares vd., 2021). Mevcut yaklaşımlardan plastik çöplerin çöplüklere bırakılması, yeraltı suyunu ve toprağı kirletip bozmakta ve sonuç olarak atıkların besin zincirine girmesine sebep olmaktadır. Atıkların yakılması diğer bir seçenek olarak değerlendirilmekte ancak bu yöntem de küresel ısınmaya, toprağın ağır metallerden kirlenmesine ve sağlık risklerine neden olmaktadır. Geri dönüşüm plastik çöpleri

kontrol etmenin en etkili yolu olsa da değişkenlik gösterebilir (Filho vd., 2021). Dünya genelinde biriken plastik atık miktarının 1 milyar tonun üzerinde olduğu tahmin edilmektedir. Filtre kısımlarında plastik bulunan sigara izmaritleri en yaygın atıklar olmakla birlikte, yiyecek ambalajları, plastik şişeler ve bunların kapakları ile alışveriş poşetleri her geçen gün denizleri ve doğayı kirletmeye devam ediyor. Plastik çöplerin ayrıştırılması ve geri dönüştürülmesinden kaynaklanan mali kaybın yılda 80 ila 120 milyar dolar arasında olduğu tahmin ediliyor. Bu da atık plastiklerin oluşturduğu ekonomik zararı ortaya koymaktadır (*Visual Feature | Beat Plastic Pollution*, t.y.).

Biyolojik olarak parçalanabilen plastikler, standart plastiklerle aynı nitelikleri sunar ancak yeterli atık yöntemiyle kullanıldığında çevre üzerinde daha düşük CO_2 etkisine sahiptir. Bu nedenle, düşük maliyetli, ekolojik olarak kabul edilebilir plastik malzemeler, plastik atık yönetimi ve kirlilik kontrolü endişelerini karşılamak için yüksek talep görmektedir (Moshood vd., 2022). Sürdürülebilirlik ihtiyacı, çevresel ve sosyal farkındalık ve artan petrol fiyatlarının etkisiyle, hizmet ömürleri boyunca çevresel açıdan pozitif ayrışan olan biyopolimerlerin gelişimi hem endüstri hem de akademi de büyük önem arz etmektedir (Tseng, 2013; Zhao & Zhou, 2014). Petrol bazlı polimerlerle karşılaştırıldığında biyopolimerler, petrolden türetilen kimyasalların miktarında azalma gibi bir dizi fayda sağlar. Biyopolimerler ve kompozitler üstün işlevsellik sunmalarının yanı sıra, yenilenebilir ve biyolojik olarak parçalanabilirler ve çevresel risk oluşturmazlar (Mochane vd., 2020). Çöplüklerdeki ve doğal ekosistemlerdeki plastik çöpler varlığını sürdürmekte çünkü çoğunlukla fosil yakıtlardan yapılan bu plastiklerin parçalanması yüzlerce yıl alabilmektedir. Bu sebeple hem endüstri ve hem de akademik araştırmalar, plastik atığı azaltarak aynı zamanda koruma ve saklama gibi

temel paketleme işlevlerini sağlamaya devam eden yenilenebilen biyo bazlı ve biyolojik olarak parçalanabilen polimerlere yönelmektedir.



Şekil 1. Malzeme bazında küresel üretim kapasitesi

Kaynak: Plastics Europe, 2023.

Çevresel sonuçları daha da azaltmak için biyobazlı polimerler, atık biyokütle ve mikroorganizmaların yanı sıra mısır, şeker kamışı ve patates gibi yenilenebilir kaynaklardan giderek daha fazla üretilmektedir (Umesh vd., 2022). Bu polimerler biyolojik olarak parçalanabilen, endüstriyel kompostlama tesislerinde veya doğal ortamda parçalanabilen şekilde tasarlanabilir. Biyobazlı malzemelerin kullanılması petrole olan bağımlılığı azaltır ve plastik üretimiyle ilişkili karbon ayak izini en aza indirir (Suarez vd., 2022). Bununla birlikte, biyobozunur polimerler, yan ürünler olarak biyokütle, karbondioksit ve su üreten mikroorganizmaların etkisi yoluyla doğal olarak ayrışacak şekilde yapılır. Şekil 1 malzeme bazında 2022 yılına ait üretim kapasitelerini göstermektedir. Grafiğe göre, 2.2 milyon ton plastiğin %48.5'i biobazlı ancak biyobozunmayan malzemelerden oluşmaktayken %51.5'lik kısım aynı zamanda biyobozunabilirdir. En yüksek üretim

kapasitesine sahip olan polimerin %20.7 ile polilaktik asit (PLA) ile olduğu belirtilmiştir.

2. PLA

PLA, nişasta açısından zengin tarım ürünlerinden elde edilen döngüsel bir dilakton olan laktidin halka açılma polimerizasyonuyla üretilen alifatik bir poliesterdir. PLA'nın termoplastik işlenebilirliği, dayanıklılığı, şeffaflığı ve kompostlanabilirliği nedeniyle birçok uygulamada tercih edilen biyopolimerlerden biri olmuştur (Ncube vd., 2020). PLA, standart yöntem ve aletlerle işlenebilen termoplastik bir malzemedir. Yüksek modüle (yaklaşık 3,5 GPa) ve dayanıklılığa (60-70 MPa) sahiptir (Kabasci, 2020). Kırılma noktasındaki düşük uzama ve kırılganlık ile birlikte cam geçiş sıcaklığında (Tg=60°C) civarındaki mekanik özelliklerde gözle görülür bir düşüş, kullanımını kısıtlayan önemli dezavantajlardır. Geri dönüştürülebildiği ve biyolojik olarak parçalanabildiği için PLA çevreye zarar vermeyen bir polimerdir. Bu faydaların yanı sıra PLA üretimi ve kullanımı, önemli miktarda enerji tasarrufu ve sera gazı emisyonlarında azalma ile sonuçlanır. Bu değişkenler sürdürülebilir bir çevre için kritik öneme sahiptir (Scaffaro ve diğerleri, 2019). Mısırın yetiştirilmesinden PLA peletlerinin nakliyesine kadar PLA üretme sürecinin tamamının 75,4 MJ/kg enerjiye ihtiyaç duyduğu tahmin edilmektedir. Bu toplam enerji tüketimi fosil ve yenilenebilir enerji kaynaklarına ayrılabilir. Yenilenebilir enerji içeriği 24,6 MJ/kg'dır. Buna karşılık, fosil enerji kullanımı 50,8 MJ/kg olup, kömür, petrol, gaz ve nükleer enerji birincil kaynaklardır (Vink ve diğerleri, 2007). Petrol bazlı kaynaklardan yapılan diğer geleneksel plastiklerle karşılaştırıldığında PLA üretimi yüzde 25 ila 55 arasında daha az fosil yakıt kullanıyor. Ayrıca rüzgar enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının üretimin çeşitli aşamalarında kullanılması fosil yakıt kullanımını neredeyse %90 oranında azaltabilir (Vink

ve diğerleri, 2003). Ayrıca, PLA'nın biyolojik parçalanması sırasındaki CO_2 emisyonu, tarımsal hammadde büyümesi sırasında çevreden alınan CO_2 ile dengelendiğinden, PLA ile bağlantılı sera gazı emisyonları düşüktür. PP, PS, PET ve naylonun CO_2 emisyonları sırasıyla 1850, 2740, 4140 ve 7150 kg/metrik ton iken, PLA'nın emisyon oranı yaklaşık 1600 kg/metrik tondur. Zamanla PLA bir CO_2 havuzu olarak işlev görmeye başlayacak ve biyokütle veya tarımsal atıklardan yapılmışsa sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yardımcı olacaktır (Mohanty ve diğerleri, 2005).

3. PLA UYGULAMA ALANLARI

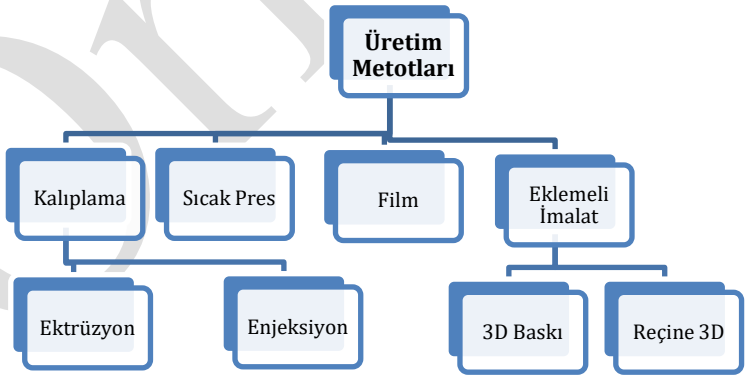
PLA, yüksek mekanik mukavemet ve modül, biyolojik olarak parçalanabilirlik, biyouyumluluk ve işlenme kolaylığı dahil olmak üzere diğer alifatik polyesterlerden üstün nitelikler sunar. Biyobozunabilirlik, geri dönüştürülebilirlik, ısı direnci, kopolimerizasyon ve bükülebilirlik gibi avantajları nedeniyle PLA ve PLA bazlı kompoziteler birçok endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır (Qi vd., 2017). PLA'nın doğal biyouyumluluğu ve vücut içerisinde doğal olarak parçalanabilmesi medikal uygulamalarda sıklıkla kullanılmasına neden olmuştur (Buj-Corral vd., 2022; Saini vd., 2016; Tyler vd., 2016). Bu doğal parçalanabilme yeteneği sayesinde hastanın vücuda yerleştirilen yabancı cisme gösterdiği tolerans artarken, parçayı çıkarmak için ek bir cerrahi operasyon gerektirmemesi de önemli bir kazanım olarak ortaya çıkmaktadır (DeStefano vd., 2020) Ortopedi, kardiyoloji, dental, plastik cerrahi ve onkoloji gibi alanlar PLA ve PLA bazlı kompozitlerin en yaygın kullanıldığı medikal alanlardır (Casalini vd., 2019). PLA suya dayanıklılığı, yüksek moleküler ağırlığı, işlenebilirliği ve biyolojik olarak parçalanabilirliği nedeniyle ideal bir ambalaj malzemesidir. PLA, Çekme modülü, koku bariyeri açısından PE, PET veya esnek PVC ile benzer özelliklere sahiptir. PLA, PS'ye benzer

sıcaklık stabilitesi işlenebilirlik sunar, ancak polietilen, basılabilirlik ve yağ direncine sahiptir. PLA, enjeksiyonla kalıplanmış ürünlere, filmlere ve kaplamalara kalıplanabilen ve onu büyük ölçekli ticarileştirmeye uygun hale getiren erken dönem biyo bazlı bir polimerdir. PLA kaplar, filmler ve kağıt ve karton kaplamalar halinde üretilebilir. Üstün nem bariyeri ve mekanik özellikleri dolayısıyla yoğurt, peynir, yağ paketlemesinde tercih edilen PLA, düşük gaz bariyeri ve kırılgan yapısı sebebiyle şişe uygulamalarında sınırlı kullanım alanına sahiptir. (Jamshidian vd., 2010; Nilsen-Nygaard vd., 2021; Reichert vd., 2020). PLA kullanımının yaygın olduğu alanlardan bir diğeri ise otomotiv uygulamalarıdır. Otomotiv endüstrisinde malzemelerin termal ve mekanik özelliklerinden ödün vermeden daha hafif malzemeler kullanılması ile ilgili yoğun çalışmalar yapılmaktadır (Faruk vd., 2017; Rosenthal vd., 2020) Bunun temel sebebi otomobilleri hafifleterek yakıt tüketimi ve böylelikle sera gazı tüketimlerini azaltmaktır. Araç ağırlığının yaklaşık %10 azaltılmasının yakıt tüketiminin azaltılmasına %6-8 oranında katkıda bulunduğu belirtilmiştir (Pradeep vd., 2017). Aralarında Ford, Mazda, Toyota ve Hyundai Motors'un da bulunduğu çok sayıda otomobil üreticisi tarafından farklı parçaların üretiminde biyo bazlı PLA ve PLA kompozit/ karışımları kullanılmıştır. PLA aynı zamanda otomobilin iç bileşenlerinde de kullanılabilir. Mazda koltuk kaplamasında, Toyota %100 PLA ile paspaslarda, yine Toyota kenaf elyafı ve PLA kompozitinden yedek lastik muhafazasında, Honda tavan köşelerinde, Hyundai iç mekan, aydınlatma ve motor muhafazasında PLA ve PLA kompozitlerini kullanmışlardır (Niaounakis, 2013, 2015; Rahman vd., 2023; Tseng, 2013). Bunun dışında kapı ve kapı kolları, akü muhafazası, jant kapakları, gösterge paneli, basamak plakaları gibi uygulamalarda da kendisine yer bulmuştur (Bouzouita vd., 2018). PLA'yı bu iş için mükemmel bir seçim haline getiren temel özelliklerden bazıları, mekanik ve fiziksel özelliklerinin

yanı sıra mükemmel biyolojik olarak parçalanabilirlik ve geri dönüştürülebilirliktir. Bununla birlikte ham PLA henüz termal stabilite ve kırılganlık sergilememiştir. Uygun değiştiricilerin ve eklemelerin kullanılması bu sorunların üstesinden gelinmesine yardımcı olabilir.

4. PLA ÜRETİM METODLARI

Farklı üretim yöntemleri ve bu üretim yöntemleri sırasında kontrol edilen parametreler final parçası üzerinde önemli etkilere sahiptir (Rajak vd., 2019). Örneğin enjeksiyonlu kalıplama ve sıcak presleme orta boyutlu bileşenler oluşturmak için kullanılabilirken; uzun, tutarlı kesitli parçalar oluşturmak için pultrüzyondan yararlanılır. Ayrıca, en iyi prosedürün seçimi, nihai ürünün boyutu, maliyeti ve ihtiyaç duyulan bileşenlerin miktarı gibi faktörler tarafından belirlenir (Ho vd., 2012). PLA ve PLA bazlı kompozitlerin üretimi için Şekil 2 de verilen yöntemler kullanılır.



Şekil 2. PLA ve PLA bazlı karşım/kompozit üretim yöntemleri

4.1. Ekstrüzyon

Ekstrüzyon yönteminde granül haldeki polimerler bir huni içerisinden tek veya çift vidaya sahip silindir içerisine aktarılır. Silindir etrafına sarılı ısıtıcılar vasıtasıyla farklı ısı bölgelerinde ısı verilerek ergitilen polimer filament, boru veya ekstrüzyon kalıplama yönteminde ise doğrudan final ürün olarak üretilir. PLA ve PLA kompozitleri elde edebilmek için ideal bir yöntemdir. Silindir içerisine atılan karışım tek veya çift vida sistemi ile homojenize edilerek enjekte edilir. Burada çift vida yöntemi kullanmak karışımın homojenizasyonuna doğrudan katkı sağlayacaktır. Isı ve hız gibi parametreler kontrol edilerek optimize edilir ve böylece istenilen karışım ve vizkozitede ürün elde edilir. PLA/selüloz elyaf kompozitleri üretmek için önemli sayıda deneyde ekstrüzyon kalıplama yöntemi kullanılmıştır (Chaitanya & Singh, 2017; Komal vd., 2020).

4.2. Enjeksiyon Kalıplama

Enjeksiyon kalıplama yöntemi de ekstrüzyon yöntemi gibi granül halindeki polimerin ergitilerek bir kalıba enjekte edilmesi ve soğutulup sertleşmesi ile gerçekleşir. Kalıp maliyeti ve süresi gibi handikapları olsa da proses optimizasyonu sağlandıktan sonra seri üretim için en ideal yöntemdir. Farklı kalıp montajları gerçekleştirilerek dizayn esnekliği sağlaması, final ürünün ikincil bir işlem gerektirmemesi, yüksek hassasiyet gerektiren küçük veya karmaşık parçaların üretimine uygun olması en büyük avantajları arasındadır. Hem saf PLA hem de PLA kompozit ve karışımlarının enjeksiyon kalıplama yöntemiyle üretilmesi ile alakalı çok sayıda araştırma mevcuttur (Komal vd., 2020; Pääkkönen vd., 2017; Relinque vd., 2019).

4.3. Sıcak Pres

Bazen sıkıştırmalı kalıplama olarak da adlandırılan sıcak presleme, levha şekillendirmeyle karşılaştırılabilecek bir üretim işlemidir. Polimer (PLA) levhalar veya peletler ve elyaflar, elyaf keçeleri veya gevşek kıyılmış elyaflar halinde, işlem için ihtiyaç duyulan temel malzemelerdir. Çoğu durumda, fiberler ısıtılmadan ve sıkıştırılmadan önce kapalı bir kalıpta polimer tabakalarla dönüşümlü olarak katmanlanır. Kalıbın uygun sıcaklığa ısıtılması ilk adımdır. Temizlendikten sonra, bitmiş kompozit panellerin çıkarılmasını kolaylaştırmak için kalıba uygun bir ayırıcı madde dökülür. Daha sonra elyaflar ve polimer kalıp üzerine yerleştirilir ve kalıp kapatılır. Kalıba istenilen basınç sağlanır ve sıcaklık PLA'nın erime noktasına yaklaştırılır. İşlem süresi tasarım gereksinimlerine göre değişmekle birlikte genellikle 4 ila 8 dakika arasındadır. İşlem tamamlandıktan sonra kalıp soğutulur ve basınç tahliye edilir. Daha sonra kalıp çıkarılır ve son ürün, ejektör pimleri kullanılarak kalıptan çıkarılır (Ochi, 2015).

4.4. Film

PLA film ve levha üretimi arasındaki temel fark, kalınlıklarının getirdiği sertlik ve esneklikteki değişikliktir; aksi takdirde neredeyse aynıdırlar. Levhaların kalınlığı tipik olarak ≥0,25 mm (0,01 inç) iken filmlerin kalınlığı tipik olarak ≤0,076 mm'dir (0,003 inç). Film döküm ekstrüzyonu sürecinde erimiş PLA bir tabaka kalıptan itilir ve su ile sirküle edilen cilalı kromdan yapılmış silindirlerde hızla soğutulur. PLA'nın ısıya duyarlılığı nedeniyle, kalıba harici pedler koymak önerilmez çünkü pedlerin altındaki çürüyen reçine kenar dengesizliğine neden olabilir. Çoğunlukla hedef levha kalınlığından %10 veya 25–50 μm (1–2 mil) daha fazla olacak şekilde kalıp aralığı tercih edilir (NatureWorks, 2005)

Ekstrüzyon ve solvent döküm yöntemlerinin PLA filmleri üretmek için en yaygın kullanılan işlemler olduğu rapor edilmiştir (Guzman vd., 2011; Muller vd., 2017). Solvent dökümü, PLA reçinesinin kloroform veya diklorometan gibi bir solvent içinde çözülmesini ve ardından yüksek şeffaflık ve parlaklık elde etmek için elde edilen filmlerin dökümünü içerir (Gao vd., 2017). Bir film oluşturmak için, PLA paletinde kalan nemi uzaklaştırmak amacıyla film çözeltisi kurumaya bırakılır (Qin vd., 2017). Vakumla kurutmanın büzülmeyi azalttığı gösterilmiştir.

4.5. 3D Baskı

Yaygın olarak 3D baskı olarak da bilinen eklemeli imalat yöntemi son yıllarda biyokompozit üretiminde en çok tercih edilen yöntemlerden birisi olmuştur. Eriyik Yığdırmalı Modelleme (FDM); PLA, ABS gibi termoplastik polimerler ve bunların fiber takviyeli biyokompozitleri için en basit ve uygun maliyetli eklemeli imalat yöntemi olarak göze çarpmaktadır. Temel çalışma prensibi enjeksiyon kalıplama ve ektrüzyon yöntemine benzerlik gösterse de tasarım programı vasıtasıyla çizimi yapılan model makaraya bağlı olan filamentin ekstrüzyon başlığına ve eridiği yer olan nozula iletilmesiyle başlar. Ekstrüzyon başlığı kullanılarak, üç eksenli bir sisteme bağlı olarak X, Y ve Z yönlerinde hareket edebilir. Erimiş malzeme ince iplikler halinde çıkarılır ve belirli konumlarda katman katman depolanır; burada soğur ve katılaşır. Malzemenin soğumasını hızlandırmak için ekstrüzyon başlığına soğutma fanları yerleştirilebilir. Bir alanı doldurmak için birden fazla geçiş yapmak gerekir. Bir katman tamamlandıktan sonra, inşa edilen platform makine ayarlarına bağlı olarak yukarı veya aşağı hareket eder ve yeni bir katman eklenir. Bu işlem parça tamamlanana kadar devam eder (R vd., 2021; Regina vd., 2018). Nozul çapı, table ve malzeme ergime sıcaklığı, yazdırma hızı

gibi parametreler final ürün kalitesini doğrudan etkiler (Gonabadi vd., 2020; Tang vd., 2020)

Uzun üretim süreleri sebebiyle seri üretim için uygun olmamakla birlikte, yeni bir kalıp tasarımı gerektirmediğinden kişiselleştirilmiş ve kompleks parçaların üretiminde ideal bir üretim yöntemidir (MacDonald & Wicker, 2016; Sun vd., 2015). Başta karbon fiber olmakla birlikte selüloz, kenevir, bambu, ahşap vb. birçok farklı katkı malzemeleriyle elde edilen organik ve inorganik polimer karışım ve kompozitleri yaygın olarak 3D yazıcılarda üretilmiş ve özellikle medikal olmak üzere farklı uygulamalarda kullanılmıştır (Dong vd., 2019; Islam vd., 2010, s. 3; Kariz vd., 2018; Porras & Maranon, 2012; Tian vd., 2017)

4.6. Reçine 3D

Son yıllarda yaygın olarak kullanılan diğer bir üretim yöntemi ise reçine malzemenin katmanlı imalatının gerçekleştirildiği foto polimerizasyon yöntemidir. Bu teknikte, ışıkla sertleşen bir reçine olan foto polimer bir tankta depolanır ve görünür veya UV ışığı ile işlenir. Işık, polimerizasyon tepkimesini tetikler ve ortaya çıkarır, bu da polimer zincirleri oluşturur veya bunları çapraz bağlayarak katı bir reçine haline getirir. Fotopolimerizasyon, kürleme yönteminde genellikle lazerler (SLA) ve dijital projeksiyon (dijital ışık işleme (DLP)) yöntemleri kullanılır. SLA teknolojisine sahip 3D yazıcı, ışıkla sertleşen reçineyle doldurulmuş şeffaf bir tankın içine batırılmış bir platform kullanır. Platform reçineye daldırıldığında, lazer ışını inşa alanını izler ve dilimlenmiş STL şablonuna göre alanları sertleştirir. Bir katman oluşturulduktan sonra, platform, makinenin üstten alta veya alttan üste bir işlem kullanmasına bağlı olarak, bir katmanın yüksekliğine eşit olan sabit bir miktar kadar Oz yönünde aşağıya veya yukarıya hareket ettirilir (Bártolo, 2011). DLP teknolojisi, yalnızca kürleme yöntemi bakımından SLA'dan farklıdır. Bir lazer kaynağını yansıtmak

için bir ayna yerine, dijital bir ışık projektörü kullanılır. SLA teknolojisi ile karşılaştırıldığında, DLP süreci daha hızlıdır çünkü her katman dijital ekrandan projekte edilen kürleme ışığına tamamen maruz kalır. DLP teknolojisi dijital bir ışık projektörü kullandığından, her katman pikselleşmiş görünür ve basılan parçanın doğruluğu büyük ölçüde projektör çözünürlüğüne bağlıdır (Redwood vd., 2017).

Bu alanda yapılan akademik çalışmalar sınırlı olmakla beraber PLA-polyurethane acrylate, PEG PLA gibi karışımların medikal sektörüne uygulanalabilirliği ve biyobozunma kabiliyetleri incelenmiştir (Feng vd., 2019; Melchels vd., 2010; Seck vd., 2010).

5. SONUÇ

Sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda en popüler biyoplastiklerden biri PLA ve PLA kompozitleridir. PLA, biyolojik olarak parçalanabilen yapısı, minimum çevresel etkisi ve yenilenebilir hammadde kaynağı nedeniyle bir dizi endüstriyel uygulama için tercih edilen bir seçimdir. Bununla birlikte, yüksek sıcaklık direnci veya esneklik gerektiren uygulamalarda, bazı mekanik ve termal kısıtlamalar nedeniyle PLA dezavantajlı olabilir. PLA'nın niteliklerini geliştirmek ve yeni uygulamalara yol açmak için çeşitli üretim teknikleri ve PLA kompozitleri oluşturulmuştur. PLA ve PLA kompozitleri üretmek için en popüler teknikler arasında enjeksiyonlu kalıplama, ekstrüzyon, şişirme kalıplama, ısıyla şekillendirme, 3D baskı ve reçine 3D yazdırma gibi yöntemler yer alır. PLA'nın nitelikleri her üretim sürecini optimize etmek için kullanılır ve gerektiğinde performansı artırmak için elyaf veya katkı maddeleri eklenir. Örneğin enjeksiyon kalıplama ve ekstrüzyon, PLA'nın paketleme ve otomobil endüstrisi de dahil olmak üzere çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılmasına olanak tanıyan verimli ve yüksek

hacimli üretim teknikleridir. Son araştırmalara göre PLA kompozitleri, fiber ilaveleri ile güçlendirilebiliyor veya mekanik niteliklerini iyileştirmek için diğer biyopolimerlerle harmanlanabiliyor. Bu kompozit yapılar, PLA'nın gücünü ve sıcaklığa karşı direncini arttırırken kırılganlığını azaltmak için çok önemli bir taktik sağlıyor. Ayrıca, özellikle düşük hacimli ve özelleştirilmiş üretimde, 3D baskı ve diğer katmanlı üretim teknolojilerinin ilerlemesi, PLA ve PLA kompozitleri için yeni beklentiler ortaya çıkarmaktadır.

Bu nedenle, PLA ve PLA kompozitlerinin sürdürülebilir üretim teknikleri kullanılarak üretilmesi hem ucuz hem de çevreye faydalı endüstriyel kullanımlar için büyük bir potansiyele sahiptir. PLA'nın termal ve mekanik sınırlarının aşılması, gelişmiş kompozit teknolojilerinin ve üretim süreçlerinin geliştirilmesini gerektirir. Gelecekte yeni üretim yöntemleri, katkı maddeleri ve harmanlama teknikleri üzerine yapılan çalışmaların artması ve PLA'nın daha geniş bir uzun ömürlü ürün yelpazesinde kullanılmasına olanak sağlanması beklenmektedir.

Örnektir

6. KAYNAKÇA

Filho, W. L., Salvia, A. L., Bonoli, A., Saari, U. A., Voronova, V., Klõga, M., Kumbhar, S. S., Olszewski, K., De Quevedo, D. M., & Barbir, J. (2021). An assessment of attitudes towards plastics and bioplastics in Europe. Science of The Total Environment, 755, 142732. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142732

Mochane, M. J., Sefadi, J. S., Motsoeneng, T. S., Mokoena, T. E., Mofokeng, T. G., & Mokhena, T. C. (2020). The effect of filler localization on the properties of biopolymer blends, recent advances: A review. Polymer Composites, 41(7), 2958-2979. https://doi.org/10.1002/pc.25590

Moshood, T. D., Nawanir, G., Mahmud, F., Mohamad, F., Ahmad, M. H., & AbdulGhani, A. (2022). Sustainability of biodegradable plastics: New problem or solution to solve the global plastic pollution? Current Research in Green and Sustainable Chemistry, 5, 100273. https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2022.100273

Plastics Europe. (2023). Plastics—The Fast Facts 2023.

Robaina, M., Murillo, K., Rocha, E., & Villar, J. (2020). Circular economy in plastic waste—Efficiency analysis of European countries. Science of The Total Environment, 730, 139038. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139038

Soares, J., Miguel, I., Venâncio, C., Lopes, I., & Oliveira, M. (2021). Public views on plastic pollution: Knowledge, perceived impacts, and pro-environmental behaviours. Journal of Hazardous Materials, 412, 125227. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125227

Örnek

Zhao, D., & Zhou, Z. (2014). Applications of Lightweight Composites in Automotive Industries. İçinde Lightweight Materials from Biopolymers and Biofibers (C. 1175, ss. 143-158). American Chemical Society. https://doi.org/10.1021/bk-2014-1175.ch009

Bártolo, P. J. (2011). *Stereolithography: Materials, processes and applications*. Springer Science & Business Media.

Bouzouita, A., Notta-Cuvier, D., Raquez, J.-M., Lauro, F., & Dubois, P. (2018). Poly (lactic acid)-based materials for automotive applications. *Industrial Applications of Poly (lactic acid)*, 177-219.

Buj-Corral, I., Sanz-Fraile, H., Ulldemolins, A., Tejo-Otero, A., Domínguez-Fernández, A., Almendros, I., & Otero, J. (2022). Characterization of 3D printed metal-PLA composite scaffolds for biomedical applications. *Polymers*, *14*(13), 2754.

Casalini, T., Rossi, F., Castrovinci, A., & Perale, G. (2019). A perspective on polylactic acid-based polymers use for nanoparticles synthesis and applications. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, *7*, 259.

Chaitanya, S., & Singh, I. (2017). Processing of PLA/sisal fiber biocomposites using direct- and extrusion-injection molding. *Materials and Manufacturing Processes*, *32*(5), 468-474. https://doi.org/10.1080/10426914.2016.1198034

DeStefano, V., Khan, S., & Tabada, A. (2020). Applications of PLA in modern medicine. *Engineered Regeneration*, *1*, 76-87.

Dong, J., Mei, C., Han, J., Lee, S., & Wu, Q. (2019). 3D printed poly(lactic acid) composites with grafted cellulose nanofibers: Effect of nanofiber and post-fabrication

annealing treatment on composite flexural properties. *Additive Manufacturing*, *28*, 621-628. https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.06.004

Faruk, O., Tjong, J., & Sain, M. (2017). *Lightweight and sustainable materials for automotive applications*. CRC Press Boca Raton.

Feng, Z., Li, Y., Hao, L., Yang, Y., Tang, T., Tang, D., & Xiong, W. (2019). Graphene-reinforced biodegradable resin composites for stereolithographic 3D printing of bone structure scaffolds. *Journal of Nanomaterials*, *2019*(1), 9710264.

Gao, H., Fang, X., Chen, H., Qin, Y., Xu, F., & Jin, T. Z. (2017). Physiochemical properties and food application of antimicrobial PLA film. *Food Control*, *73*, 1522-1531.

Gonabadi, H., Yadav, A., & Bull, S. (2020). The effect of processing parameters on the mechanical characteristics of PLA produced by a 3D FFF printer. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *111*, 695-709.

Guzman, A., Gnutek, N., & Janik, H. (2011). *Biodegradable polymers for food packaging–factors influencing their degradation and certification types–a comprehensive review*.

Ho, M., Wang, H., Lee, J.-H., Ho, C., Lau, K., Leng, J., & Hui, D. (2012). Critical factors on manufacturing processes of natural fibre composites. *Composites Part B: Engineering*, *43*(8), 3549-3562. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.10.001

Islam, M. S., Pickering, K. L., & Foreman, N. J. (2010). Influence of accelerated ageing on the physico-mechanical properties of alkali-treated industrial hemp

fibre reinforced poly(lactic acid) (PLA) composites. *Polymer Degradation and Stability*, *95*(1), 59-65. https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2009.10.010

Jamshidian, M., Tehrany, E. A., Imran, M., Jacquot, M., & Desobry, S. (2010). Poly-lactic acid: Production, applications, nanocomposites, and release studies. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, *9*(5), 552-571.

Kabasci, S. (2020). Chapter 4—Biobased plastics. İçinde T. M. Letcher (Ed.), *Plastic Waste and Recycling* (ss. 67-96). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817880-5.00004-9

Kariz, M., Sernek, M., Obućina, M., & Kuzman, M. K. (2018). Effect of wood content in FDM filament on properties of 3D printed parts. *Materials Today Communications*, *14*, 135-140. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2017.12.016

Komal, U. K., Lila, M. K., & Singh, I. (2020). PLA/banana fiber based sustainable biocomposites: A manufacturing perspective. *Composites Part B: Engineering*, *180*, 107535. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107535

MacDonald, E., & Wicker, R. (2016). Multiprocess 3D printing for increasing component functionality. *Science*, *353*(6307), aaf2093.

Melchels, F. P., Velders, A. H., Feijen, J., & Grijpma, D. W. (2010). Photo-cross-linked poly (dl-lactide)-based networks. Structural characterization by HR-MAS NMR spectroscopy and hydrolytic degradation behavior. *Macromolecules*, *43*(20), 8570-8579.

Mohanty, A. K., Misra, M., Drzal, L. T., Selke, S. E., Harte, B. R., & Hinrichsen, G. (2005). Natural fibers, biopolymers,

and biocomposites: An introduction. İçinde *Natural fibers, biopolymers, and biocomposites* (ss. 17-51). CRC press.

Muller, J., Quesada, A. C., González-Martínez, C., & Chiralt, A. (2017). Antimicrobial properties and release of cinnamaldehyde in bilayer films based on polylactic acid (PLA) and starch. *European Polymer Journal*, *96*, 316-325.

NatureWorks, L. (2005). Sheet extrusion processing guide. *NatureWorks LLC, Minnetonka, MN*.

Ncube, L. K., Ude, A. U., Ogunmuyiwa, E. N., Zulkifli, R., & Beas, I. N. (2020). Environmental Impact of Food Packaging Materials: A Review of Contemporary Development from Conventional Plastics to Polylactic Acid Based Materials. *Materials*, *13*(21). https://doi.org/10.3390/ma13214994

Niaounakis, M. (2013). Introduction to biopolymers. *Biopolymers reuse, recycling, and disposal*, 1-75.

Niaounakis, M. (2015). Automotive applications. *Biopolymers: applications and trends*, 257-289.

Nilsen-Nygaard, J., Fernández, E. N., Radusin, T., Rotabakk, B. T., Sarfraz, J., Sharmin, N., Sivertsvik, M., Sone, I., & Pettersen, M. K. (2021). Current status of biobased and biodegradable food packaging materials: Impact on food quality and effect of innovative processing technologies. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, *20*(2), 1333-1380.

Ochi, S. (2015). Flexural properties of long bamboo fiber/PLA composites. *Open Journal of Composite Materials*, *5*(3), 70-78.

Pääkkönen, E., Wikström, L., Peltola, H., Valta, K., & Retulainen, E. (2017). Recycled fibres and fibrous sludge as reinforcement materials in injection moulded polypropylene (PP) and poly (lactic acid)(PLA) composites. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, *2*(3), 116-122.

Porras, A., & Maranon, A. (2012). Development and characterization of a laminate composite material from polylactic acid (PLA) and woven bamboo fabric. *Natural Materials in Composites Engineering*, *43*(7), 2782-2788. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.04.039

Pradeep, S. A., Iyer, R. K., Kazan, H., & Pilla, S. (2017). Automotive applications of plastics: Past, present, and future. İçinde *Applied Plastics Engineering Handbook* (ss. 651-673). Elsevier.

Qi, X., Ren, Y., & Wang, X. (2017). New advances in the biodegradation of Poly(lactic) acid. *International Biodeterioration & Biodegradation*, *117*, 215-223. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.01.010

Qin, Y., Li, W., Liu, D., Yuan, M., & Li, L. (2017). Development of active packaging film made from poly (lactic acid) incorporated essential oil. *Progress in Organic Coatings*, *103*, 76-82.

R, R. M., R, V., & S, R. (2021). Experimental analysis on density, micro-hardness, surface roughness and processing time of Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) through Fused Deposition Modeling (FDM) using Box Behnken Design (BBD). *Materials Today Communications*, *27*, 102353. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102353

Rahman, M. Z., Rahman, M., Mahbub, T., Ashiquzzaman, M., Sagadevan, S., & Hoque, M. E. (2023). Advanced biopolymers for automobile and aviation engineering applications. *Journal of Polymer Research*, *30*(3), 106. https://doi.org/10.1007/s10965-023-03440-z

Rajak, D. K., Pagar, D. D., Menezes, P. L., & Linul, E. (2019). Fiber-Reinforced Polymer Composites: Manufacturing, Properties, and Applications. *Polymers*, *11*(10). https://doi.org/10.3390/polym11101667

Redwood, B., Schffer, F., & Garret, B. (2017). *The 3D printing handbook: Technologies, design and applications*. 3D Hubs.

Regina, F., Lavecchia, F., & Galantucci, L. M. (2018). Preliminary study for a full colour low cost open source 3D printer, based on the combination of fused deposition modelling (FDM) or fused filament fabrication (FFF) and inkjet printing. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, *12*(3), 979-993. https://doi.org/10.1007/s12008-017-0432-x

Reichert, C. L., Bugnicourt, E., Coltelli, M.-B., Cinelli, P., Lazzeri, A., Canesi, I., Braca, F., Martínez, B. M., Alonso, R., & Agostinis, L. (2020). Bio-based packaging: Materials, modifications, industrial applications and sustainability. *Polymers*, *12*(7), 1558.

Relinque, J. J., de León, A. S., Hernández-Saz, J., García-Romero, M. G., Navas-Martos, F. J., Morales-Cid, G., & Molina, S. I. (2019). Development of Surface-Coated Polylactic Acid/Polyhydroxyalkanoate (PLA/PHA) Nanocomposites. *Polymers*, *11*(3). https://doi.org/10.3390/polym11030400

Rosenthal, S., Maaß, F., Kamaliev, M., Hahn, M., Gies, S., & Tekkaya, A. E. (2020). Lightweight in automotive components by forming technology. *Automotive Innovation*, *3*(3), 195-209.

Saini, P., Arora, M., & Kumar, M. R. (2016). Poly (lactic acid) blends in biomedical applications. *Advanced drug delivery reviews*, *107*, 47-59.

Scaffaro, R., Maio, A., Sutera, F., Gulino, E. F., & Morreale, M. (2019). Degradation and Recycling of Films Based on Biodegradable Polymers: A Short Review. *Polymers*, *11*(4). https://doi.org/10.3390/polym11040651

Seck, T. M., Melchels, F. P., Feijen, J., & Grijpma, D. W. (2010). Designed biodegradable hydrogel structures prepared by stereolithography using poly (ethylene glycol)/poly (d, l-lactide)-based resins. *Journal of Controlled Release*, *148*(1), 34-41.

Suarez, A., Ford, E., Venditti, R., Kelley, S., Saloni, D., & Gonzalez, R. (2022). Rethinking the use of bio-based plastics to accelerate the decarbonization of our society. *Resources, Conservation and Recycling*, *186*, 106593. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106593

Sun, J., Peng, Z., Zhou, W., Fuh, J. Y., Hong, G. S., & Chiu, A. (2015). A review on 3D printing for customized food fabrication. *Procedia Manufacturing*, *1*, 308-319.

Tang, C., Liu, J., Yang, Y., Liu, Y., Jiang, S., & Hao, W. (2020). Effect of process parameters on mechanical properties of 3D printed PLA lattice structures. *Composites Part C: Open Access*, *3*, 100076.

Tian, X., Liu, T., Wang, Q., Dilmurat, A., Li, D., & Ziegmann, G. (2017). Recycling and remanufacturing of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites.

Journal of Cleaner Production, *142*, 1609-1618. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.139

Tseng, S. C. W. (2013). *Using bio-based materials in the automotive industry*.

Tyler, B., Gullotti, D., Mangraviti, A., Utsuki, T., & Brem, H. (2016). Polylactic acid (PLA) controlled delivery carriers for biomedical applications. *Advanced drug delivery reviews*, *107*, 163-175.

Umesh, M., Shanmugam, S., Kikas, T., Lan Chi, N. T., & Pugazhendhi, A. (2022). Progress in bio-based biodegradable polymer as the effective replacement for the engineering applicators. *Journal of Cleaner Production*, *362*, 132267. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132267

Vink, E. T. H., Glassner, D. A., Kolstad, J. J., Wooley, R. J., & O'Connor, R. P. (2007). ORIGINAL RESEARCH: The eco-profiles for current and near-future NatureWorks® polylactide (PLA) production. *Industrial Biotechnology*, *3*(1), 58-81. https://doi.org/10.1089/ind.2007.3.058

Vink, E. T. H., Rábago, K. R., Glassner, D. A., & Gruber, P. R. (2003). Applications of life cycle assessment to NatureWorks™ polylactide (PLA) production. *Polymer Degradation and Stability*, *80*(3), 403-419. https://doi.org/10.1016/S0141-3910(02)00372-5

Visual Feature | Beat Plastic Pollution. (t.y.). Geliş tarihi 23 Ekim 2024, gönderen http://unep.org/interactive/beat-plastic-pollution/

KAYIT FORMU Lütfen bu formu bilgisayarınıza indirerek doldurunuz ve diğer belgelerle beraber mail yoluyla gönderiniz.		
Kitap Bölümünüze İlişkin Temel Alan:		MÜHENDİSLİK
Kitap Bölümünüze İlişkin Bilim Alanı:		MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ
Bölüm başlığınız:		Evaluation of Investment Projects in Terms of Turkey's Energy Supply Security
Yazar 1	*Ad-Soyad:*	Oğuzhan ERBAŞ
	Unvan:	Doç. Dr.
	Üniversite / Fakülte / Bölüm:	Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü
	Mail:	oguzhan.erbas@dpu.edu.tr
	Telefon:	+90 505 359 26 48
	ORCID No:	0000-0001-9424-4273
Yazar 2(*)	*Ad-Soyad:*	Halit ARAT
	Unvan:	Dr. Öğr. Üyesi
	Üniversite / Fakülte / Bölüm:	Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü
	Mail:	halit.arat@dpu.edu.tr
	Telefon:	+90 538 346 19 58
	ORCID No:	0000-0002-6634-2535
Sorumlu yazar (*birden fazla yazarın olduğu çalışmalarda süreçle ilgili tüm yazışma ve bilgi paylaşımları sorumlu yazarla yapılacaktır.***)**		Doç. Dr. Oğuzhan ERBAŞ

(*) İkiden Fazla Yazar olması halinde Yazar 2'nin altına tabloya ekleyebilirsiniz.

Örnektir

ALÜMİNYUM DÖKÜMÜNDE KULLANILAN ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ETKİSİ

Murat ÇOLAK*

1. GİRİŞ

Alüminyum alaşımları, yüksek elektriksel ve termal iletkenlik, düşük ergime noktası, mükemmel mekanik özellikler, hafiflik, kolay imalat, yüksek mukavemet ve iyi korozyon direnci gibi özelliklerinden dolayı çeşitli endüstrilerde yaygınca kullanılmaktadır [1-3]. Otomobillerden uçaklara, bina yapılarından yüksek hızlı demiryolları endüstrisine kadar geniş bir yelpazede tercih edilen alüminyum alaşımları, ağırlık tasarrufu amacıyla özellikle otomobillerde giderek artan bir şekilde kullanılır [4]. Havacılık endüstrisinde ise, hafif yapıları ve mükemmel mekanik özellikleri sayesinde yoğunluğun azaltılması, artan sertlik, geliştirilmiş kırılma tokluğu ve yorulma çatlağı büyümesine karşı direnç gibi avantajlar sunmaktadır [5]. Bronz, bakır, kurşun ve demir gibi yüzyıllardır bilinen ve üretilen malzemelere rağmen günümüzde en çok kullanılan demir dışı metal alüminyum olup metal pazarında demir-çelikten sonra ikinci sırayı almaktadır [6].

2. ALÜMİNYUM DÖKÜM ALAŞIMLARI

Alüminyum döküm alaşımlarının döküm kalitesini etkileyen faktörler arasında alaşım bileşimi, döküm sıcaklığı, mikroyapı, porozite, ultrasonik işlem, katkı maddeleri ve döküm

* Doçent Doktor, Bayburt Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon), mcolak@bayburt.edu.tr , ORCID: :0000-0002-8255-5987

işlemleri gibi unsurlar yer almaktadır. Alaşım bileşimi, özellikle katkı maddelerinin içeriği, döküm alaşımının mekanik özelliklerini ve mikroyapısını belirlemede kritik bir rol oynar [7]. Alüminyum alaşımları esas olarak alüminyumdan ve az miktarda diğer metallerden oluşmaktadır. Alaşıma ilave edilen elementler safsızlıklar da dahil olmak üzere alüminyum alaşımlarının bileşimi, döküm sürecini ve çevresel sürdürülebilirliği etkileyebilmektedir [8]. Kullanılan alaşımlar, katılaşma sırasındaki soğuma hızları ve mikro/makro ayrışma gibi faktörler, döküm alüminyum alaşımlarının mikro ve makro yapısını etkiler [9]. Alüminyum alaşımlarında yaygın kullanıma ve artan kalite beklentilerine bağlı olarak geliştirme çalışmaları her geçen gün devam etmektedir. Bu kapsamda, döküm yöntemlerinde farklı teknikler araştırılmakla birlikte çalışmaların çoğu alaşım elementi ilavesine odaklanmış durumdadır. Bu çalışmada alüminyum alaşımlarında kullanılan bazı alaşım elementlerinin etkilerini şu şekilde ifade edebiliriz.

2.1. Titanyumun Etkisi

Alüminyum alaşımlarının dökümünde titanyum elementinin etkileri, özellikle mikro yapı ve mekanik özellikler üzerinde önemli değişiklikler yaratmaktadır. [10,11]. Çalışmalar, %0,2''ye kadar ağırlık konsantrasyonlarında titanyum eklenmesinin, çekme mukavemeti ve sertlik gibi alaşımın mekanik özelliklerini iyileştiren rafine bir mikro yapıya yol açabileceğini göstermiştir. Titanyum ilavesi ile yapıda hızlı bir şekilde ve önemli derecede tane inceltme etkisi gözlenmektedir. Alüminyum tanelerinde inceltilmiş yapının küçük, düzenli ve eşeksenli biçime dönüşmesi sayesinde mekanik özellikler daha izotropik, alaşım daha mukavemetli olur. Bu durum döküm kusurlarını ortadan kaldırmaya ve malzemenin genel bütünlüğünü artırmaya yardımcı olur [11]. Tane inceltme işlemi gözenek miktarı ve boyutunu azaltmakta, böylece alaşımın besleme kabiliyetini artırdığı bilinmektedir

[12]. Tane inceltmenin beslenebilirlik üzerine etkisinin incelendiği bir çalışmada; Etial160 alüminyum döküm alaşımı ile yapılan kum dökümlerde besleme etkinliğinin tane boyutunun küçülmesi ile arttığını ve buna bağlı olarak makro porozite oluşumunun azaldığını göstermiştir. İyi derecede tane inceltilmiş bir dökümde dendrit blokajı sınırını belirleyen kritik katı oranı %50 iken bu oran tane inceltilmemiş bir dökümde %35 olarak ölçülmüştür [13].

Araştırmalar, titanyumun agresif ortamlarda alüminyum alaşımlarının korozyon direncini artırabileceğini göstermektedir; bu, malzemelerin zorlu koşullara maruz kaldığı havacılık ve otomotiv endüstrilerindeki uygulamalar için özellikle faydalıdır [14]. Ayrıca, titanyumun alüminyumla kararlı intermetalik bileşikler oluşturma yeteneği, termal kararlılığın ve yüksek sıcaklıkta oksidasyona karşı direncin iyileştirilmesine katkıda bulunabilir [15]. Ayrıca, titanyumun varlığı, alüminyum alaşımının döküm sürecinde daha homojen bir mikro yapı elde edilmesine yardımcı olur, bu da mekanik özelliklerin iyileşmesine katkıda bulunur [10]. Döküm sürecinde titanyumun kullanımı, ayrıca alaşımın işlenebilirliğini ve dayanıklılığını artırarak, endüstriyel uygulamalarda daha geniş bir kullanım alanı sağlar [16]. Titanyumun varlığının alüminyum eriyiklerinin ıslanabilirliğini iyileştirdiği, diğer alaşım elementlerinin ve takviye parçacıklarının daha iyi ilave edilmesini kolaylaştırdığı ve böylece döküm alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerini daha da geliştirdiği bildirilmiştir [17]. Titanyum eklenmesi, ZL108 alaşımının aşınma direncini artırmakta ve bu durum, titanyumun alaşımın mikro yapısındaki etkileriyle ilişkilidir [11]. Titanyum ve alüminyum alaşımlarının bir arada kullanılması, bu malzemelerin birleşiminden elde edilen kompozitlerin mekanik özelliklerini de geliştirmektedir [18].

2.2. Borun Etkisi

Bor, alüminyum alaşımlarında tane inceltici olarak kullanıldığında, alaşımın mekanik özelliklerini artırmakta ve döküm kalitesini iyileştirmektedir. Bor ilavesi, döküm işlemi sırasında oluşan soğuma hızını etkileyerek, daha ince ve homojen bir mikro yapı elde edilmesine olanak tanımaktadır [19, 20]. Dahası, borun alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri üzerindeki etkileri, katılaşma sürecindeki rolü aracılığıyla daha iyi anlaşılabilir. Borun eklenmesi, alaşımın mekanik özelliklerini belirlemede kritik öneme sahip olan intermetalik bileşiklerin oluşumunu etkileyebilir. Örneğin, bor oksitlerinin alüminyumla reaksiyonu, alaşımın yaşlanma işlemini ve mekanik performansını önemli ölçüde etkileyebilen AlB2 ve AlB12 gibi bileşiklerin oluşumuna yol açabilir [21]. Borun eklenmesinin, alüminyum dökümlerde mekanik bütünlüğü ciddi şekilde etkileyebilen yaygın bir kusur olan katılaşma sırasında gözenek oluşumunu azalttığı gösterilmiştir [22]. Bor, aynı zamanda alaşımın korozyon direncini artırmakta ve döküm sırasında oluşabilecek oksidasyon ve diğer safsızlıkların etkilerini azaltmaktadır. Bu bağlamda, bor ilavesinin, alüminyum alaşımının sıvı metal kalitesini artırarak, döküm sırasında meydana gelen hataların azaltılmasına katkı sağladığı belirtilmektedir [23].

Bor, özellikle bor karbür (B4C) formunda, alüminyum alaşımlarının sertlik, mukavemet ve aşınma direnci gibi mekanik özelliklerini geliştirdiği bilinmektedir. Bu geliştirme, öncelikle borun döküm işlemi sırasında kolaylaştırdığı ince taneli yapıdan kaynaklandığı düşünülmektedir. Araştırmalar, alüminyum alaşımlarına bor karbür nanopartiküllerinin eklenmesinin matris içinde parçacıkların daha düzgün bir şekilde dağılmasına yol açtığını ve bunun da alaşımın tane yapısını incelttiğini göstermektedir. Örneğin, ultrasonik kavitasyon destekli döküm kullanan çalışmalar, alüminyum alaşımı-nano bor karbür

kompozitlerinin mikro yapısının önemli ölçüde rafine matris taneleri sergilediğini ve bunun da iyileştirilmiş mekanik özelliklere katkıda bulunduğunu göstermiştir [24]. Bor karbürünün varlığı yalnızca sertliği artırmakla kalmaz, aynı zamanda alüminyum matris kompozitlerinin aşınma direncini de iyileştirerek bunları yüksek dayanıklılık gerektiren uygulamalar için uygun hale getirir [25].

Bor, belirli uygulamalarda işlevsel roller de üstlenir. Örneğin, bor içeren alüminyum alaşımları, nötron kalkanlama özellikleri, özellikle de yüksek nötron emilim kesitine sahip B-10 izotopu nedeniyle nükleer uygulamalarda kullanılır. Bu özellik, bor katkılı alüminyum alaşımlarını radyasyon kalkanının gerekli olduğu bağlamlarda değerli kılar [26]. Ancak, borun belirli özellikleri artırabilmesine rağmen, aşırı miktarların dökümlerde kırılganlığa ve sünekliğin azalmasına yol açabileceğini belirtmek önemlidir. Bu kırılganlık genellikle matris içinde gerilim konsantrasyonları oluşturabilen bor karbür parçacıklarının aglomerasyonuna atfedilir [27]. Bu nedenle, bor içeriğinin ve döküm işlemi parametrelerinin dikkatli bir şekilde kontrol edilmesi, alüminyum alaşımlarının performansını optimize etmek için çok önemlidir.

2.3. Stronsiyumun Etkisi

Özellikle Al-Si alaşımlarına stronsiyum eklenmesi, alaşımın mikro yapısında belirgin değişiklikler yaparak, özellikle laminar morfolojideki kaba ötektik Si fazının inceltilmesine yardımcı olur. Al-Si alaşımlarında, silisyum fazı tipik olarak kırılganlığa ve sünekliğin azalmasına yol açabilen kaba, levha benzeri bir yapı sergiler. Ancak, stronsiyumun eklenmesi bu yapıyı daha ince, lifli bir morfolojiye dönüştürür ve bu da alaşımın sünekliğini ve tokluğunu artırır [28]. Bu morfolojik değişim, çekme dayanımı ve uzama gibi mekanik özelliklerin iyileştirilmesine yol açan silisyum parçacıklarının

boyut ve en boy oranındaki azalmaya atfedilir [28, 29]. Stronsiyumun eklenmesi alaşım içindeki intermetalik fazların oluşumunu da etkileyebilir. Örneğin, stronsiyum, alaşımın korozyon direncini ve genel dayanıklılığını etkileyebilen belirli demir açısından zengin intermetaliklerin oluşumunu teşvik eder [30]. Alaşım içerisindeki stronsiyumun eklenmesinin katılaşma davranışını etkilediği, ötektik fazın çekirdeklenme ve büyüme özelliklerini değiştirebildiği ve bu da matris boyunca silisyum parçacıklarının daha düzgün bir şekilde dağılmasına neden olduğu tespit edilmiştir [31]. Bu düzgünlük, mekanik yükleme sırasında çatlak başlama olasılığını en aza indirdiği ve böylece alaşımın yorulma direncini artırdığı için kritik öneme sahiptir. Çalışmalar, stronsiyumla modifiye edilmiş alaşımların, özellikle mikro yapıyı daha da rafine eden ve gözeneklilik seviyelerini azaltan T6 ısıl işlemine tabi tutulduğunda, modifiye edilmemiş muadillerine kıyasla üstün yorulma ömrü sergilediğini göstermiştir [32]. Stronsiyumun dökümdeki diğer bir etkisi, alaşımın termal iletkenliğini artırmasıdır. Ayrıca, stronsiyumun eklenmesi, alaşımın yüksek sıcaklık dayanımını artırarak, özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında önemli avantajlar sağlar [33]. Stronsiyumun katı çözelti güçlendirme etkisi, yüksek sıcaklıklarda gelişmiş performansa katkıda bulunur ve stronsiyum modifiyeli alaşımları termal kararlılığın kritik olduğu uygulamalar için uygun hale getirir [34]. Bu, bileşenlerin çalışma sırasında genellikle yüksek sıcaklıklara maruz kaldığı otomotiv ve havacılık endüstrilerinde özellikle önemlidir. Ancak stronsiyumun aşırı eklenmesi (örneğin, %0,2 Sr üzeri) alaşımın mekanik özelliklerini olumsuz etkileyebilir. Bu durumda alüminyum ve silisyum ile birleşip istenmeyen intermetalik fazların (Al2SrSi2 ve Al4SrSi2 gibi) oluşmasını sebep olabilir. Ayrıca ötektik üstü alaşımlarda görülen birincil silisyum parçacıklarını inceltmek için eklenen fosfor ile birlikte kullanılmasında da problem riski söz konudur [29].

2.4. Erbiyumun Etkisi

Nadir bir toprak elementi olan erbiyum, tane yapılarını rafine edebilen ve alüminyum alaşımlarının mukavemet özelliklerini iyileştirebilen etkili bir mikro alaşımlama elementi olarak kullanılmaktadır. Çalışmalar, erbiyumun eklenmesinin, katılaşma sırasında tane inceltme için çekirdeklenme alanları olarak hareket eden birincil Al3Er fazlarının oluşumuna yol açtığını göstermiştir. Ayrıca, erbiyumun maksimum katı çözünürlüğünün, alüminyum alaşımlarında optimum mikro yapısal özelliklere ulaşmak için kritik olan ötektik sıcaklıkta meydana geldiğini bildirmiştir [35]. Al3Er çökeltilerinin varlığının, özellikle yüksek sıcaklıklarda, dislokasyon hareketini engelleyerek ve alüminyum matris içindeki elastik etkileşimleri iyileştirerek alaşımların mekanik özelliklerini iyileştirdiği gösterilmiştir [36]. Er içeriği %0,15 civarında olduğunda, 6061 alüminyum alaşımının çekme dayanımı 243 MPa'ya kadar çıkabilmektedir [37]. Erbiyumun alüminyum alaşımındaki ikinci faz olarak işlev görmesi ve bu fazın ısıl işlemle birlikte mekanik özellikleri iyileştirmesi ile ilişkilidir [36].

Tane inceltmenin yanı sıra, erbiyum ayrıca hipoötektik Al-Si alaşımlarında ötektik silisyumun morfolojisini de değiştirir. Erbiyumun eklenmesinin ötektik silisyumunun kaba levha benzeri yapılarını daha ince lifli formlara dönüştürdüğü gözlemlenmiştir; bu da alaşımın genel mekanik özelliklerini iyileştirir [38]. Bu değişiklik, yalnızca mukavemeti değil aynı zamanda sünekliği de iyileştirdiği ve alaşımı çeşitli uygulamalar için daha çok yönlü hale getirdiği için önemlidir. Al-Si-Mg bazlı döküm alaşımlarında yapılan çalışmalarda, Er eklenmesinin döküm sırasında daha iyi akışkanlık ve daha az iç boşluk ile sonuçlanmasını sağlayarak döküm kalitesini artırdığı belirtilmiştir. Ayrıca alaşımın yüksek sıcaklık dayanımını artırarak, otomotiv ve havacılık gibi yüksek performans gerektiren uygulamalarda kullanılabilirliğini artırmaktadır [39].

2.5. Niyobyumun Etkisi

Niyobyum, katılaşma sırasında mikro yapının modifiye edilmesine yardımcı olan yüksek ergime noktası nedeniyle güçlü bir alaşım elementi görevi görür. Bu rafine etme, daha küçük tane boyutlarına yol açtığı ve bu da alaşımın akma dayanımı ve sertlik gibi mekanik özelliklerini iyileştirdiği için önemlidir. Çalışmalar, niyobyum eklenmesinin, katılaşma sırasında niyobyum ve niyobyum karbür çökeltilerinin oluşumuna atfedilen tane boyutunda önemli bir azalmaya yol açtığını göstermiştir [40]. Yapılan çalışmalar, A356 alüminyum alaşımına %0,03, %0,06 ve %0,1 oranında Nb ilavesinin mikroyapı üzerinde olumlu etkiler yarattığını göstermektedir. Ayrıca, niyobyumun katılaşma sürecindeki etkisi, alaşımın soğuma hızını ve dolayısıyla mekanik özelliklerini de olumlu yönde etkilemektedir [41]. Niyobyum ve alüminyum arasındaki sinerji, alaşımın sünekliği ve tokluğuna da uzanır. Araştırmalar, niyobyumun kırılma olmadan deformasyon gerektiren işlemler için hayati önem taşıyan alüminyum alaşımlarının sünekliğini artırabileceğini göstermektedir [42]. Bu iyileştirme, şekillendirme ve soğutma sırasında mekanik gerilimlere dayanma yeteneğinin kritik olduğu döküm işlemlerinde özellikle önemlidir. Alüminyum alaşımlarının genel olarak yüksek korozyon direncine sahip olduğu bilinmektedir, ancak Nb ilavesi ile bu özelliklerin daha da iyileştirilebileceği düşünülmektedir. Bu durum, özellikle otomotiv ve havacılık endüstrilerinde, hafif ve dayanıklı malzemelere olan talebin arttığı günümüzde büyük bir avantaj sağlamaktadır [43]. Niyobyumun kararlı oksitler oluşturma yeteneği, alaşımın koruyucu özelliklerine daha fazla katkıda bulunur ve böylece zorlu koşullarda hizmet ömrünü uzatır [44]. Niyobyum, alüminyum alaşımlarının termal özelliklerini de etkiler. Niyobyumun yüksek erime noktası, özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında faydalı olan daha iyi termal stabilite sağlar. Bu özellik, malzemelerin sıklıkla aşırı termal koşullara maruz kaldığı havacılık ve otomotiv

gibi endüstriler için çok önemlidir. Dahası, niyobyumun alüminyum ve silisyumla kombinasyonunun oksidasyon direncini artırdığı ve böylece alaşımın termal stres altındaki dayanıklılığını iyileştirdiği gösterilmiştir [45].

2.6. Skandiyumun Etkisi

Skandiyum, özellikle hafif ve yüksek mukavemetli malzemelerin önemli olduğu havacılık ve otomotiv sektörlerinde olmak üzere çeşitli uygulamalarda alüminyum alaşımlarının performansını artıran güçlü bir mikro alaşımlama elemanı görevi görür. Skandiyum, alüminyum matrisinin mikro yapısını etkileyerek, alaşımın genel performansını artırır. Örneğin, skandiyum ilavesi, alüminyum alaşımının tane boyutunu küçülterek, daha homojen bir mikro yapı elde edilmesine yardımcı olur [44]. Skandiyumun tane inceltme etkisi, termodinamik olarak kararlı olan ve yüksek sıcaklıklarda düşük kabalaşma oranları gösteren ince, tutarlı Al_3Sc çökeltilerinin oluşumu nedeniyle meydana gelir. Bu tür çökeltiler, deformasyon süreçleri sırasında dislokasyon hareketini engelledikleri için gelişmiş sürünme direncine ve mekanik mukavemete katkıda bulunur [46,47]. Araştırmalar, skandiyumun küçük eklemelerinin bile (genellikle ağırlıkça yaklaşık %0,35-0,4) mukavemette %20-25'lik bir artışa yol açabileceğini ve buna ağırlıkta %10-15'lik bir azalmanın eşlik ettiğini ve bu alaşımları hafif uygulamalar için özellikle avantajlı hale getirdiğini göstermektedir [48]. Skandiyum alüminyum alaşımlarının yaşlanma davranışını da etkiler. Skandiyumun eklenmesi, yaşlanma sırasında ince Al_3Sc parçacıklarının çökelmesi nedeniyle sertlikte ve çekme mukavemetinde önemli bir artışa yol açan aşırı doymuş bir katı çözeltinin oluşumunu teşvik eder [49]. Bu yaşlanma tepkisi, kontrollü ısıl işlem süreçleri aracılığıyla mekanik özelliklerin optimizasyonuna izin verdiği için yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemet gerektiren uygulamalar için kritik öneme sahiptir

[50]. Ayrıca, skandiyum ilavesinin, alaşımın korozyon direncini de artırdığı gösterilmiştir, bu da özellikle dış ortam koşullarında uzun ömürlü ürünler elde edilmesine olanak tanır. Döküm işlemlerinde skandiyumun etkisi, ayrıca alaşımın akışkanlık özelliklerini de iyileştirmektedir. Skandiyum ilavesi, alüminyum alaşımının akışkanlığını artırarak, daha karmaşık kalıp geometrilerinin doldurulmasını kolaylaştırır [51].

Skandiyumun maliyeti diğer alaşım elementlerine kıyasla nispeten yüksek olsa da, performans iyileştirmeleri açısından faydaları, üst düzey uygulamalarda kullanımını haklı çıkarır [52]. Skandiyum için daha verimli çıkarma ve işleme yöntemlerine yönelik devam eden araştırmalar, alüminyum alaşımlarında önemli bir alaşım elementi olarak uygulanabilirliğini daha da artırabilir [53].

2.7. Vanadyumun Etkisi

Vanadyum, özellikle mukavemet, süneklik ve termal kararlılık açısından alüminyum alaşımlarının genel performansını artırabilen bir mikro alaşımlama elemanı görevi görür. Özellikle, alaşımın sertliğini artırmakta ve aşınma direncini geliştirmektedir [54]. Ayrıca havacılık ve otomotiv endüstrileri gibi yüksek mukavemet-ağırlık oranlarının kritik olduğu uygulamalarda önemli olduğu belirtilmiştir [55]. Vanadyumun alüminyum alaşımlarına eklenmesinin, tane yapısını iyileştirebilen ve mekanik özellikleri iyileştirebilen belirli vanadyum içeren fazların oluşumuna yol açabileceği ifade edilmektedir [56,57]. Vanadyum eklenmesi, ince çökeltilerin oluşumunu teşvik ederek, ferrit büyümesini engellemektedir. Bu durum, daha küçük ferrit tanelerinin oluşmasına yol açmakta ve dolayısıyla alaşımın mekanik dayanımını artırmaktadır [58]. Vanadyum alaşımlamasının alüminyum-silisyum-bakır alaşımlarında artan çekme mukavemeti, süneklik ve sertlikle sonuçlandığını bildirmiştir [59].

Vanadyumun varlığı, alaşımın bütünlüğünün 400 °C'ye kadar sıcaklıklarda korunmasına yardımcı olabilir. Bu termal kararlılık, alaşımın mekanik özelliklerinin operasyonel koşullar altında bozulmamasını sağlamak için önemlidir ve bu da özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında avantaj sağlamaktadır. Ayrıca, vanadyumun varlığı, alüminyum alaşımının döküm sürecinde daha iyi bir akışkanlık sağlamakta ve bu da döküm kalitesini artırmaktadır [60]. Bununla birlikte, vanadyum eklenmesi belirli mekanik özellikleri iyileştirebilirken, aşırı miktarlar alaşımın sünekliğini tehlikeye atabilecek kırılgan fazların oluşumuna yol açabilir [56]. Bu nedenle, döküm uygulamalarında alüminyum alaşımlarının performansını optimize etmek için vanadyum içeriğinin dikkatli bir şekilde kontrol edilmesi gerekir.

3. SONUÇLAR

Alüminyum alaşımlarına ilave edilen alaşım elementlerinin etkileri özet olarak aşağıda verilmiştir;

- Alüminyum alaşımlarında sıvı metal içerisine %0,01 gibi az miktarlarda bile titanyum (Ti) ve bor (B) elementlerinin ilavesiyle yapıda hızlı bir şekilde ve önemli derecede tane inceltme etkisi gözlenmektedir.
- Titanyumun alüminyum alaşımlarındaki etkileri, mikro yapı, mekanik özellikler, oksidasyon direnci ve gelişmiş korozyon direncine katkıda bulunarak alüminyum alaşımlarını zorlu uygulamalar için daha uygun hale getirir.
- Stronsiyum elementi, alüminyum alaşımlarının dökümünde mikro yapıyı iyileştirme, mekanik özellikleri artırma ve poroziteyi azaltma gibi önemli etkilere sahiptir. Ancak, stronsiyumun aşırı kullanımı,

olumsuz sonuçlar doğurabileceğinden, dikkatli bir şekilde optimize edilmesi gerekmektedir. Ötektik silisyum morfolojisini değiştirerek, katılaşma davranışını iyileştirerek ve yüksek sıcaklık performansını artırarak stronsiyum ilavesi, çeşitli endüstriyel uygulamalar için gelişmiş alüminyum alaşımlarının geliştirilmesinde değerli bir stratejidir.

- Bor elementinin alüminyum alaşımlarının dökümünde kullanımı, mekanik özelliklerin iyileştirilmesi, mikro yapının modifikasyonu ve döküm kalitesinin artırılması açısından önemli faydalar sağlamaktadır. Ancak özelliklerin artırılması ile kırılganlık gibi olumsuz etkilerin önlenmesi arasındaki denge hayati önem taşımaktadır.
- Erbiyum; tane inceltme ve ötektik silisyum modifikasyonu gibi mekanizmalar aracılığıyla mikro yapısal ve mekanik özelliklerini önemli ölçüde artırır. Skandiyum gibi diğer nadir toprak elementlerine kıyasla maliyet etkinliği, erbiyumu yüksek performanslı alüminyum malzemelerin geliştirilmesinde değerli bir alaşım elementi olarak daha da konumlandırır.
- Niyobyum elementinin alüminyum alaşımlarının dökümünde kullanımı, mekanik özelliklerin iyileştirilmesi, korozyon direncinin artırılması, mikroyapının homojenleşmesi, termal kararlılık ve süneklikte önemli iyileştirmeler gibi önemli faydalar sağlamaktadır.
- Skandiyum alüminyumun mekanik özelliklerini, mikro yapısal özelliklerini, korozyon direncini ve akışkanlık özelliklerinin iyileşmesine katkı sağlar. Tane yapısını iyileştirme, sürünme direncini artırma,

kaynaklanabilirliği iyileştirme ve yaşlanma tepkilerini optimize etme yeteneği, skandiyumu zorlu uygulamalar için gelişmiş alüminyum alaşımlarının geliştirilmesinde değerli bir unsur haline getirir.

- Vanadyumun alüminyum alaşımlarının dökümünde sağladığı faydalar, mekanik özelliklerin iyileştirilmesi, mikro yapının kontrolü, sünekliliği, termal kararlılığı ve döküm kalitesinin artırılması gibi birçok yönü kapsamaktadır. Ancak, süneklik ve genel performans üzerindeki olası olumsuz etkilerden kaçınmak için vanadyum içeriğinin optimizasyonu çok önemlidir.

Örnektir

4. KAYNAKLAR

Ahmad, R., Wahab, N. A., Hasan, S., Harun, Z., Rahman, M. M., & Shahizan, N. R. (2019). Effect of erbium addition on the microstructure and mechanical properties of aluminium alloy. *Key Engineering Materials*, *796*, 62-66.

Arslan, İ., Gavgalı, E., & Çolak, M. (2019). Kum Kalıba Dökülen Farklı Alüminyum Alaşımlarının Dökümünde Al5Ti1B ve Al10Sr İlavesinin Mikroyapı Özelliklere Etkisinin İncelenmesi. *Academic Platform-Journal of Engineering and Science*, *7*(2), 237-244.

Baril, E., Labelle, P., & Pekguleryuz, M. (2003). Elevated temperature Mg-Al-Sr: creep resistance, mechanical properties, and microstructure. *Jom*, *55*, 34-39.

Cengiz, S. (2020). Comparison of different amount of cerium and silicon in aluminum alloys. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(2), 980-993.

Chen, S., Li, L., Chen, Y., & Huang, J. (2011). Joining mechanism of Ti/Al dissimilar alloys during laser welding-brazing process. Journal of alloys and compounds, 509(3), 891-898.

Chen, W. F., & Kim, S. E. (2005, January). Advanced Analysis for Steel Design: From Theory to Practice. In *Fourth International Conference on Advances in Steel Structures* (pp. 61-67). Elsevier Science Ltd.

Choe, K., Lim, K., Lee, S., & Lee, K. (2010). The effect of vanadium and chromium on the precipitation of carbide in si-mo ferritic ductile cast iron. *Key Engineering Materials*, *457*, 102-107.

Dahle, A. K., Nogita, K., McDonald, S. D., Zindel, J. W., & Hogan, L. M. (2001). Eutectic nucleation and growth in hypoeutectic Al-Si alloys at different strontium levels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, *32*, 949-960.

Dai, Y., Yan, L., & Hao, J. (2022). Review on micro-alloying and preparation method of 7xxx series aluminum alloys: progresses and prospects. *Materials*, *15*(3), 1216..

Dybowski, B., Rzychoń, T., & Chmiela, B. (2014). The influence of strontium on the microstructure of cast magnesium alloys containing aluminum and calcium. *Key Engineering Materials*, *607*, 37-42.

Feng, Z. H., Ding, X. F., Feng, X., Nan, H., & Zhang, A. B. (2021, July). Comparative Study of Surface Contaminated Layer on Titanium Aluminum Alloy and Titanium Alloy Investment Castings. In *Materials Science Forum* (Vol. 1035, pp. 602-607). Trans Tech Publications Ltd.

Fujii, S., Suzuki, E., Inazu, N., Tsubaki, S., Fukushima, J., Takizawa, H., & Wada, Y. (2020). Microwave irradiation process for Al–Sc Alloy production. *Scientific reports*, *10*(1), 2689.

Gómez, P., Elduque, D., Sarasa, J., Pina, C., & Javierre, C. (2016). Influence of composition on the environmental impact of a cast aluminum alloy. *Materials*, *9*(6), 412.

Gumen, O., Selina, I., & Kruzhkova, M. (2022). A study of the properties and development in technology for obtaining multi-component systems of particle reinforced aluminum and titanium alloys. *Construction of Optimized Energy Potential Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym*, *11*(1), 17-21.

Haskel, T., Verran, G. O., & Barbieri, R. (2018). Rotating and bending fatigue behavior of A356 aluminum alloy: Effects of strontium addition and T6 heat treatment. *International Journal of Fatigue*, *114*, 1-10.

Hu, X., Jiang, F., Ai, F., & Yan, H. (2012). Effects of rare earth Er additions on microstructure development and mechanical properties of die-cast ADC12 aluminum alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, *538*, 21-27.

Hui, L., Han-Guang, F., Jiang, J., & Jun, W. (2018). Effect of heat treatment on microstructure and property of high vanadium wear-resistant alloy. *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik*, *49*(12), 1485-1493.

Ji, K., Li, L., Liang, J., Li, C., Zhao, X., Han, Q., ... & Zhang, Y. (2024, June). Effect of Strontium Modification on Microstructure and Mechanical Property Al12SiCuMgNi Alloy in Squeeze Casting. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2785, No. 1, p. 012153). IOP Publishing.

Kadhim, M. H., Latif, N. A., Harimon, M. A., Shamran, A. A., & Abbas, D. R. (2020). Effects of side-groove and loading rate on the fracture properties of aluminium alloy AL-6061. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, *51*(6), 758-765.

Kaiser, M. (2021). Properties of al-6mg-xsc (x = 0 to 0.6 wt.%) alloy subjected to thermal treatment: a review. *Reviews on Advanced Materials and Technologies*, 3(1), 42-54.

Kayıkcı, R., & Çolak, M. (2009). Kuma Dökülen Etial160 Alüminyum Alaşımında Tane İnceltmenin Beslenebilirlik Üzerine Etkisinin İncelenmesi, 5th. In *International Advanced Technologies Symposium, May* (pp. 13-15).

Khatami, N., Mirdamadi, S., & Razavizadeh, H. (2011). The Boron Effect on Mechanical Properties of Aged 2024 Aluminum Alloy. *Advanced Materials Research*, *339*, 152-156.

Kuo, Y. S. (2011). Effects of solidification time on porosity content in A201 aluminum alloy castings. *Advanced Materials Research*, *311*, 648-652.

Lee, W. S., Chen, T. H., Lin, C. F., & Chen, M. S. (2010). Impact deformation behaviour and dislocation substructure of Al–Sc alloy. *Journal of alloys and compounds*, *493*(1-2), 580-589.

Lei, X., Zhang, Z., Dong, H., Wang, C., & Du, X. (2020). Effect of erbium on microstructure and mechanical properties of Al-Si-Mg-Cu alloy. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, *51*(10), 1389-1397.

Liu, N. C., Li, J. Q., & Li, G. (2011). Influence of Different Titanium Alloying Methods on the Microstructure and Wear Behavior of ZL108 Alloy. *Advanced Materials Research*, *311*, 712-715.

Lv, W. J., Li, B. L., Qi, P., & Nie, Z. R. (2017, July). The effect of the erbium content on the microstructure and mechanical property of 6061 aluminum Alloys. In *Materials Science Forum* (Vol. 898, pp. 35-40). Trans Tech Publications Ltd.

Makhambetov, E. N., Vorobkalo, N. R., Baisanov, A. S., & Mynzhasar, E. A. (2023). Smelting of vanadium-containing alloys with using non-standard reducing agents. *CIS Iron and Steel Review*,*(25)*, 21, 25.

Matsuura, K., Koyanagi, T., Ohmi, T., & Kudoh, M. (2003). Aluminide coating on niobium by arc surface alloying. *Materials Transactions*, *44*(5), 861-865.

Mohamed, A. M. A., Samuel, F. H., Samuel, A. M., Doty, H. W., & Valtierra, S. (2008). Influence of tin addition on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Cu-Mg and Al-Si-Mg casting alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, *39*, 490-501.

Mohammadpour, M., Khosroshahi, R. A., Mousavian, R. T., & Brabazon, D. (2014). Effect of interfacial-active elements addition on the incorporation of micron-sized SiC particles in molten pure aluminum. *Ceramics International*, *40*(6), 8323-8332.

Moreira Coutinho, M., Saraiva Silva, J. I., Primo Sousa, T., & Monteiro Rosa, D. (2019). Upward unsteady-state solidification of dilute Al–Nb alloys: microstructure characterization, microhardness, dynamic modulus of elasticity, damping, and XRD analyses. *Metals*, *9*(6), 713.

Nakamura, T., Matsuo, T., Ikeda, M., & Komatsu, S. (2007). Effect of scandium addition on aging behavior of 6061 aluminum alloy. *Advanced Materials Research*, *15*, 7-12.

Novich, K. A., Pedersen, S. V., Borrelli, R. A., Christensen, R., & Jaques, B. J. (2021). Synthesis of boron carbide reinforced aluminum castings through mechanical stir casting. *Journal of Composite Materials*, *55*(16), 2165-2177.

Ovsyannikov, B. V., & Zamyatin, V. M. (2014, July). Behavior of scandium in aluminum alloys of different alloying systems. In *Materials science forum* (Vol. 794, pp. 1002-1007). Trans Tech Publications Ltd.

Pantelakis, S., Setsika, D., Chamos, A., & Zervaki, A. (2016). Corrosion damage evolution of the aircraft aluminum alloy 2024 T3. *International Journal of Structural Integrity*, *7*(1), 25-46.

Peeratatsuwan, C., Pandee, P., Patakham, U., & Limmaneevichitr, C. (2021). Effect of erbium on the rheocast quality index of A356 semisolid feedstock. *Materials Science and Technology*, *37*(4), 424-438.

Poovazhagan, L., Kalaichelvan, K., & Sornakumar, T. (2016). Processing and performance characteristics of aluminum-nano boron carbide metal matrix nanocomposites. *Materials and Manufacturing Processes*, *31*(10), 1275-1285.

Sadki, A., Hattali, M. L., Bradai, M., Younes, R., & Mesrati, N. (2016). Characterization and modeling of the mechanical behavior of aeronautical alloy based composite. *Universal Journal of Chemistry*, *4*(1), 10-19.

Sangchan, A., Plookphol, T., Wannasin, J., & Wisutmethangoon, S. (2014). Effect of strontium on microstructure and mechanical properties of semi-solid A356 Al alloy. *Advanced Materials Research*, *893*, 353-356.

Shaha, S. K., Czerwinski, F., Kasprzak, W., Friedman, J., & Chen, D. L. (2015). Microstructure and mechanical properties of Al–Si cast alloy with additions of Zr–V–Ti. *Materials & Design*, *83*, 801-812.

Sighworth,G.K., Kuhn, T.A., (2007). Refinement of Aluminium Casting Alloys, *AFS Transactions*, *115*, 1-12.

Stojanovic, B., Bukvic, M., & Epler, I. (2018). Application of aluminum and aluminum alloys in engineering. *Applied Engineering Letters: Journal of Engineering and Applied Sciences*.

Sun, N., & Apelian, D. (2011). Friction stir processing of aluminum cast alloys for high performance applications. *Jom*, *63*, 44-50.

Švecová, I., Tillová, E., & Kuchariková, L. (2017). Structural analysis of iron based intermetallic phases in secondary alsi6cu4 cast alloy. *Production Engineering Archives*, *15(15)*, 3-6.

Tamura, Y., & Suematu, S. (2018). Use of KBF4–Al Mixed Powder to Produce Boron-Bearing 6063 Aluminum Alloys. *MATERIALS TRANSACTIONS*, *59*(1), 104-109.

Teixeira, R. L. P., de Lacerda, J. C., Conceição, I. C., da Silva, S. N., Siqueira, G. O., & Moura Filho, F. (2021). The effecTs of Niobium oN The bioacTiviTy of Ni-Ti-al-Nb shape memory alloys. *Archives of Metallurgy and Materials*, *66*(2).

Tokatlı, M., Saydam, F., Hal, M., Koşatepe, A., Çolak, M., & Yüksel, Ç. (2022). Investigation of liquid metal cleaning methods commonly used in the casting of aluminium alloys. *Journal of the Institute of Science and Technology*, *12*(1), 423-434.

Tonn, J., Grotjohann, A., Kocks, C., & Jupke, A. (2023). Nucleation Kinetics of Rare Earth Scandium Salt: An Experimental Investigation of the Metastable Zone Width. *Crystals*, *13*(7), 1074.

Tussolini, M., Ichikawa, T., Gallina, A. L., Banczek, E. D. P., & Rodrigues, P. R. P. (2015, July). Electrochemical Study of Ceramics Based on Niobium Oxide over Aluminum Alloy AA 3003. In *Materials Science Forum* (Vol. 820, pp. 225-230). Trans Tech Publications Ltd.

Vinayaka, N., Christiyan, K. J., Shreepad, S., Padhi, S. N., Dambhare, S. G., Puse, R. K., ... & Nagarajan, S. (2023). Tribological Behavior on Stir-Casted Metal Matrix Composites of Al8011 and Nano Boron Carbide Particles. *Journal of Nanomaterials*, *2023*(1), 6453166.

Voron, M. M., Pruss, M. F., & Byba, O. Y. (2021). Microalloying and Modification of Cast Aluminum Alloys for Increasing their Level of Exploitation Properties at Elevated Temperatures. A Review. *Foundry Process. Technol. Mater*, *145*, 61-68.

Wang, Q. G. (2003). Microstructural effects on the tensile and fracture behavior of aluminum casting alloys A356/357. *Metallurgical and materials Transactions A*, *34*, 2887-2899.

Yağcı, T., Cöcen, Ü., Çulha, O., & Korkmaz, A. (2021). Alüminyum Döküm Alaşımlarına Dair Son Yıllardaki Akademik Ve Endüstriyel Gelişmelere Genel Bakış Ve Değerlendirme. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, *26*(3), 1191-1210.

Yalçın, Ö., Tokatlı, M., Tigli, A., & Çolak, M. (2024). A356 alüminyum alaşımının dökümünde katılaşma zamanı ve Nb ilavesinin mikroyapıya etkisinin incelenmesi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, *14*(2), 479-492.

Yang, Y., Zhang, Y., Liu, X., & Zhang, H. (2023). Study on chemical corrosion properties of titanium alloy in 2A14 aluminum melt. *Materials Research Express*, *10*(10), 106512.

Yunak, T., Duru, E., Sevinç, S., & Aslan, S. (2023). Al-5Ti-0, 2B ve Al-5Ti-1B Tane İncelticilerin AA 1050 Alüminyum Alaşımının Mekanik Özellikleri Üzerine Etkileri. *Open Journal of Nano*, *8*(2), 99-106.

Zhang, X. D., Gao, F., Gong, X. Z., Wang, Z. H., & Liu, Y. (2019, February). Life cycle assessment of erbium oxide and scandium oxide. In *Materials Science Forum* (Vol. 944, pp. 1130-1136). Trans Tech Publications Ltd.

Zhao, H., Song, Y., Li, M., & Guan, S. (2010). Grain refining efficiency and microstructure of Al–Ti–C–RE master alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, *508*(1), 206-211.

Zhu, Q. F., Meng, Y., Kang, Y. L., Kong, S. P., Ou, Y. P., & Zuo, Y. B. (2019). Effect of cooling rate on morphology and type of vanadium-containing phases in Al-10V master alloy. *China Foundry*, *16*(5), 300-306.

ADVANCED TECHNIQUES FOR EFFICIENCY IMPROVEMENT OF DIESEL ENGINES

Hasan Üstün BAŞARAN[1]

1. INTRODUCTION

Diesel engines have a significant place in our world. They are highly preferred in farming, various industrial applications, automotive vehicles and marine vessels. High reliability and durability, high efficiency and relatively matured technology enable diesel engines to be widely utilized in many different power production facilities and transportation industry. Despite those desirable advantages, high emission rates due to diesel engines have become lately a serious threat for their widespread application (Ni et al., 2020). Several environmental authorities have set some strict limits in emission rates of diesel-driven vehicles. Therefore, there is an ongoing work to improve diesel engine – related emission rates. Also, the high demand in fuel consumption due to growing population is a significant concern for future diesel engines (Ahmad & Zhang, 2020). Those challenges drive engine producers to design more efficient and low emission diesel engines in the coming decade.

Dealing with stringent emission regulations is a noticeable difficulty for diesel engine manufacturers. Current Euro VI standards for heavy-duty (HD) diesel engines, as seen in Fig. 1, are already highly strict (Dieselnet, 2024). NOx rate of 0.4 g/kWh and PM rate of 0.01 g/kWh are not allowed for current trucks and buses using HD diesel engines. However,

1 Dr. Öğr. Üyesi, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği, hustun.basaran@ikcu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-1491-0465.

Euro VII standards, which is planned to be valid in 2028, will be even stricter than Euro VI. Lower than 0.2 g/kWh of NOx rates and lower than 0.008 g/kWh of PM rates are demanded in future Euro VII standards, which is highly challenging for future diesel engines.

Stage	Date	Test	CO	HC	CH_4	NOx	NH_3	N_2O	PM	PN	Smoke
			g/kWh							1/kWh	1/m
Euro I	1992, ≤ 85 kW	ECE R-49	4.5	1.1		8.0			0.612		
	1992, > 85 kW		4.5	1.1		8.0			0.36		
Euro II	1996.10		4.0	1.1		7.0			0.25		
	1998.10		4.0	1.1		7.0			0.15		
Euro III	*1999.10 EEV only*	ESC & ELR	*1.5*	*0.25*		*2.0*			*0.02*		*0.15*
	2000.10		2.1	0.66		5.0			0.10[a]		0.8
Euro IV	2005.10		1.5	0.46		3.5			0.02		0.5
Euro V	2008.10		1.5	0.46		2.0			0.02		0.5
Euro VI	2013.01	WHSC	1.5	0.13		0.40	10 ppm		0.01	8.0×10^{11}[b]	
Euro VII	2028.05.29		1.5	0.080[d]	0.5	0.200	0.060	0.20	0.008	6.0×10^{11}[c]	

[a] PM = 0.13 g/kWh for engines < 0.75 dm^3 swept volume per cylinder and a rated power speed > 3000 min^{-1}
[b] PN_{23}
[c] PN_{10}
[d] NMOG

Figure 1. EU emission standards for heavy-duty CI (diesel) engines: Steady-state testing

Reference: Dieselnet, 2024.

There are some effective inner-engine methods such as exhaust gas recirculation (EGR) and variable valve timing (VVT) or engine-independent exhaust gas after-treatment systems such as selective catalytic reduction (SCR) and diesel particulate filter (DPF) units to diminish engine-out tailpipe emission rates. However, those techniques generally increase the cost, which is undesirable and needs to be considered by future engine designers. Moreover, those advanced strategies can, in some cases, be insufficient to satisfactorily minimize emission rates of highway vehicles. Therefore, it is predicted that combined application of some effective engine-dependent or

non-engine methods will be favorable in the future to achieve desirable low-emission operations (Wang and Chen, 2023).

Another difficulty for the engine producers is the increasing demand for the high-efficient diesel engines. The population of the world have exceeded 8 billion, which dramatically rises the demand in transportation and power production needs of several industrial plants. Currently, most of those needs are met through fossil fuels, which have been highly depleted since the rise of the industry revolution. Extracting new oil or natural gas reserves requires either drilling to ever deeper on land or exploring out in the harsh-condition oceans, which is costly. Considering the dependency on fossil fuels will continue for the foreseeable future and full-electric vehicles and vessels can only dominate in the transportation sector in the long term, the improvement in vehicle/vessel fuel consumption is seen to be the best option in the short term (Baweja and Kumar, 2021). Therefore, high efficiency is a must for diesel engines in order to remain their place in transportation in the future.

This chapter explores the latest strategies for the efficiency improvement of compression-ignition engines. Waste heat recovery (WHR), variable valve timing (VVT), advanced combustion techniques, advanced fuel injection and alternative fuels are examined as the reliable methods to enhance diesel engine efficiency. In the following sections, the potential of those aforementioned methods in the development of future high-efficient diesel engines is presented.

2. ADVANCED METHODS TO IMPROVE ENGINE EFFICIENCY

Current diesel engine systems need some advanced modifications or in some cases additional components to increase efficiency and curb emission rates. Most of those

advanced methods attempt to control either in-cylinder airflow or fuel injection pressure or engine-out waste energy to enhance the thermal efficiency of the diesel engine system.

2.1. Variable valve timing (VVT)

One effective technique to enhance the fuel efficiency in diesel engines is to implement VVT. Proper airflow and exhaust flow in a diesel engine can be handled with valves placed on top of the engine system. Particularly, control of intake valve is significant as it is directly linked to the flow of the fresh air charge into the cylinders.

It is observed in different studies that early intake valve closure (EIVC) is effective to enhance engine thermal efficiency (Basaran and Ozsoysal, 2017; Pelić et al., 2020). EIVC has the potential to minimize pumping loss, which leads to high efficiency, particularly at light loads. In addition to EIVC, late intake valve closure (LIVC) is explored via use of an advanced valve mechanism in a heavy-duty diesel engine (Garg et al., 2016). Base closure timing is moved forward up to 100^{o}CA and the system brake power is sustained constant through fuel injection actuation in this research. It is seen that LIVC technique can remove some part of the inlet air back to the inlet port, diminishes volumetric efficiency and thus, results in relatively lower pumping loss and better efficiency. This method is also effective to elevate exhaust temperature, which is useful to keep selective catalytic reduction (SCR) systems above a certain temperature (250^{o}C) at low loads (Basaran, 2023).

A typical VVT system is seen in Fig. 2 (Aisinaftermarket, 2024). The cams placed in the camshaft are responsible to actuate the motion of the intake and exhaust valves. An oil control valve (OCV) is added to the camshaft system as demonstrated in the plot. The OCV maintains the rotation of the camshaft through modulating the oil inside the vanes, which

directly affects the valve motions above the piston. Therefore, in this advanced VVT technology, unlike a camshaft mechanism, it is possible to operate the valves more than one opening or closure timing.

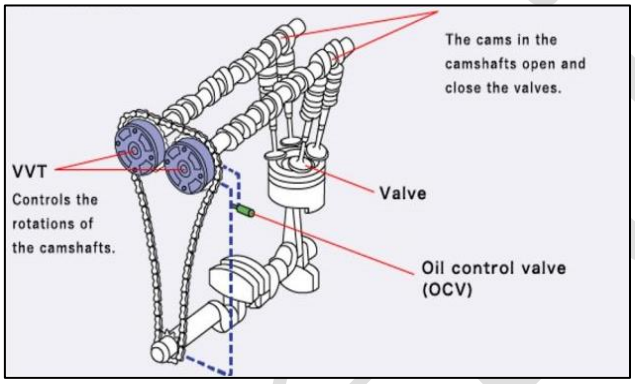


Figure 2. A typical VVT mechanism

Reference: Aisinaftermarket, 2024.

2.1.1. Waste heat recovery (WHR)

Compression-ignition engines utilize chemical energy of diesel fuel (lower heating value of close to 42 MJ/kg) to produce useful power, which drives the wheels in highway vehicles and the propeller in marine vessels. Due to the 2nd law of thermodynamics, it is not possible to convert all of that chemical energy into useful work (Çengel and Boles, 2015). Only a limited percent (30 to 35% in diesel engines) of the total added energy can be utilized as desired useful output. A noticeable portion of the chemical energy (up to 30%) is inevitably discharged as exhaust gas energy into the environment in diesel engine systems so as to maintain the cycle and keep the system operational. Thus, there is a considerable energy loss that needs to be evaluated in these systems, which, when evaluated correctly, enables engine researchers and producers to increase system efficiency.

2.1.2. Turbocharging

The wasted exhaust gas energy can be utilized in different engineering components to produce additional work and thus, enhance the thermal efficiency. Implementing a turbocharger system is one effective way to produce extra useful work in a diesel engine system. Needless to say, diesel engines require high in-cylinder air charge to combust high fuel and thus, to generate high torque for heavy-duty applications. Without a turbocharger unit, fresh air charge is limited and engine volumetric efficiency remains at low levels. However, with a turbocharger unit, exhaust gas in a diesel engine system can be channeled to a turbine, which is directly connected to an air compressor. The expanded exhaust gas inside the turbine produces rotational work, which is utilized in the compressor to induct more air into the cylinders. Therefore, it is possible to burn extra fuel inside the cylinders using the wasted exhaust energy, without any need of outer electrical energy (Muqeem et al., 2015).

The turbocharging is highly advantageous since highway vehicles and marine vessels do not always operate at low loads. Depending on the weather and route conditions, they may need to work at high loads, which demands additional airflow into the cylinders. Proper arrangement of a turbocharger system can provide the fresh airflow without requirement of any additional energy. Recently, engine researchers focus on the impact of variable geometry turbocharger (VGT) technology in diesel engine systems to improve boosting and exhaust energy recovery (Mazuro and Kozak, 2024). Unlike a fixed geometry turbocharger (FGT), VGT can offer alternative operating modes of the turbocharger, which is beneficial considering the aforementioned variable working conditions of transportation vehicles. VGT system increases the cost compared to a FGT system. However, it enables optimum turbocharger performance

through adjustable vanes placed inside the turbine and thus, is more effective at thermal efficiency, transient response of the engine and emission characteristics (Feneley et al., 2017). Therefore, cost-effective and advanced VGT systems will probably have a significant role for future diesel engines to further improve boosting, emissions and exhaust energy recovery.

2.1.3. Turbo-Compounding

Similar to turbocharging, turbo-compounding is an effective technique to yield useful work from discharged exhaust gas energy in diesel engines. Mainly mechanical series turbo-compounding and parallel turbo-compounding, as shown below in Fig. 3 & Fig. 4, can be designed in diesel engine systems to recover waste heat energy (Dieselnet, 2024).

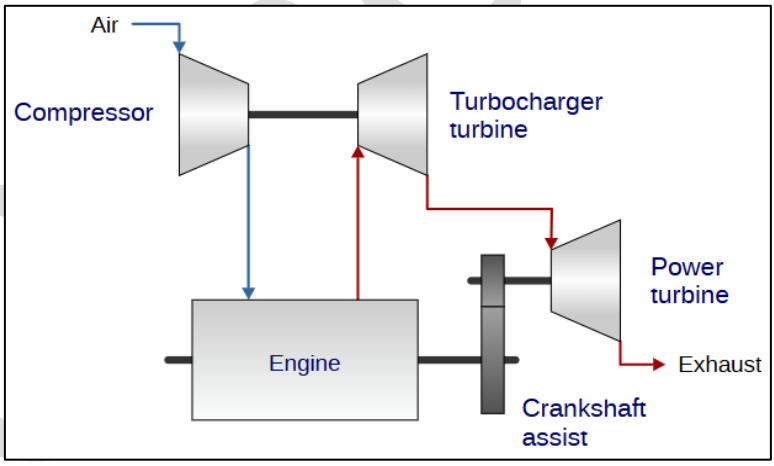


Figure 3. Mechanical series turbo-compounding

Reference: Dieselnet, 2024.

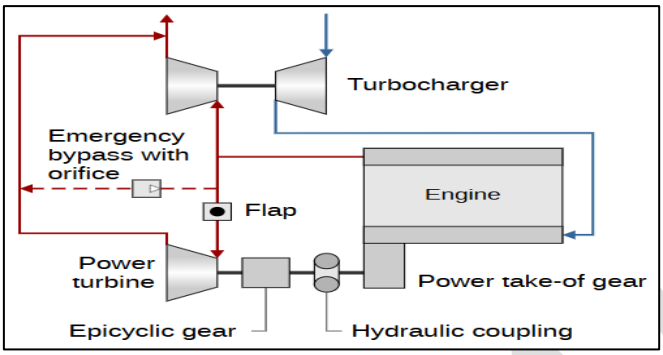


Figure 4. Parallel turbo-compounding

Reference: Dieselnet, 2024.

In turbo-compounding system, similar to turbocharging, the exhaust gas is directed to a turbine (usually named power turbine). The engine-out gas is expanded in this turbine and thus, a useful rotational work is obtained. However, unlike turbocharging, the power turbine is connected to the engine crankshaft (not to a compressor) and the additional useful work is directly utilized by the main engine. Since that extra work does not require any additional fuel injection in the main engine, the overall efficiency of the system is improved. In mechanical series turbo-compounding, exhaust gas leaving the turbine in the turbocharger system flows through the power turbine and the main engine is assisted with the work produced. However, in parallel turbo-compounding, a flap is placed at the downstream of the exhaust system, which divides the exhaust flow to the turbocharger unit and the power turbine. As the high pressure exhaust gas is expanded in the latter approach, a more amount of additional work can assist the main engine system in the parallel turbo-compounding. It is demonstrated in a six-cylinder, 13 L diesel engine model that parallel and series turbo-compounding can reduce the fuel consumption by 2.5% and 1.9%, respectively (Teo et al., 2015). Novel turbo-compounding systems seem to be needed in the future diesel engines to produce more

additional work, assist the main engine and improve the thermal efficiency (Ramkumar et al., 2024).

2.1.4. Organic Rankine Cycle (ORC)

Another WHR technique for the efficiency improvement in diesel engine systems is to equip an ORC unit at the downstream of the exhaust system. In general, a Rankine cycle includes a pump, a condenser, a boiler and a turbine to produce useful work. The working fluid in this cycle is water and energy required in the boiler to superheat the steam is obtained from coal, nuclear, geothermal or solar power (Çengel and Boles, 2015). However, in an ORC system, the additional energy to superheat the working fluid in the evaporator (as in boiler) is gained from a wasted heat source (such as exhaust gas energy). Instead of using water in the cycle, an organic working fluid such as isopentane, n-butane or R123, etc. is preferred. Those fluids have low boiling points, are less likely to condense at the end of the expansion process and do not wear the turbine, which enables them as ideal for low temperature applications. A simple ORC system with the related components is shown in Fig. 5 (Rahbar et al., 2017).

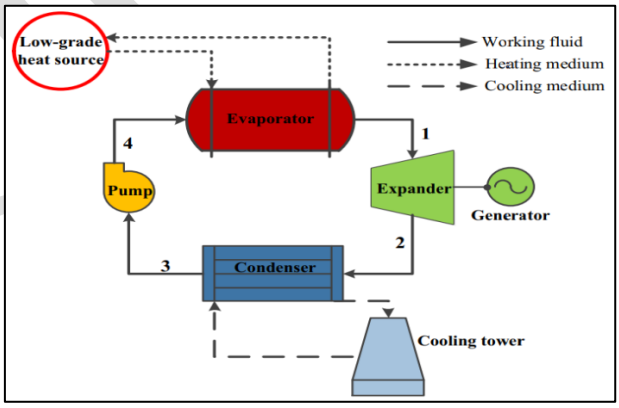


Figure 5. A simple ORC system layout

Reference: Rahbar et al., 2017.

The ORC system seen above is maintained between high pressure evaporator and low pressure condenser. An expander (turbine) is placed between those elements to lower the pressure of the working fluid. At the exit of the expander, there is only exhausted low-pressure fluid. However, its expansion inside the turbine results in rotational work, which is converted to electrical work in a generator linked to the turbine. This useful work can be easily used for auxiliary machinery, air-conditioning or ventilation needs of HD vehicles or marine vessels (Konur et al., 2022). Decreasing the installation cost of ORC systems, shortening the payback period and reducing their size and weight will be positive for future high efficient diesel engines.

2.2. Advanced combustion techniques

Combustion process noticeably affects the thermal efficiency and emission rates of a diesel engine. In order to minimize NOx rates, in-cylinder temperature need to be controlled since NOx is directly proportional to the temperature. EGR and delayed injection timing are beneficial to maintain low in-cylinder temperature and thus, low NOx rate. However, excessive use of those techniques leads to rich mixture (due to rise of fuel consumption or decreased rate of fresh air in the mixture) and thus, high local equivalence ratio, as shown in Fig. 6 (Wang, 2008). Increased equivalence ratio elevates the soot rates, which is, similar to high NOx rates, undesirable in diesel engines. Therefore, in most cases, it is not possible to keep both NOx and soot rates at low levels simultaneously. This is generally defined as “PM-NOx tradeoff” in diesel engine systems.

örnekir

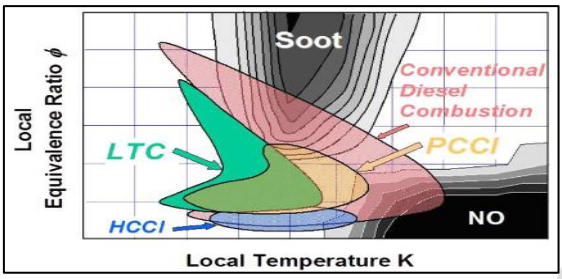


Figure 6. Comparison of different combustion modes depending on the local equivalence ratio and local temperature.

Reference: Wang, 2008.

As demonstrated in Fig. 6, some unconventional combustion modes can be applied in diesel engines, in which both local temperature and equivalence ratio are sustained at low levels and thus, both soot and NOx rates are minimized. Currently, many researchers concentrate on the effect of low temperature combustion (LTC) methods in the diesel engine performance (Krishnamoorthi et al., 2019).

LTC techniques include homogenous charge compression ignition (HCCI), premixed charge compression ignition (PCCI) and reactivity controlled charge ignition (RCCI). HCCI enables the pre-mixture of air and fuel before charging the mixture into the cylinders. The technique utilizes compression to achieve auto-ignition temperature of the mixture so that, unlike gasoline engines, it does not need any spark-plug for the ignition. PCCI is another method for pre-mixture of the charge. The time interval between the injection and the combustion is increased through injecting the fuel during the compression phase and thus, improved pre-mixture is achieved. RCCI utilizes a low-reactivity and high-reactivity fuel to modulate the fuel reactivity inside the cylinders to maintain optimum combustion. A comparison of conventional diesel engine and LTC engine on performance characteristics is presented in Table 1 (Seong et al., 2012).

Factors	CI Engine	LTC Engine
Major emissions	Low CO & HC, High PM & NOx	CO, HC
Exhaust gas treatment	Required, thus increase cost	Do not require, so economical
Net work output	44%	45-53%
Heat transfer losses	16%	14%
Temperature	High (2700 K)	Low (below 2100 K)
Fuel air ratio (Φ)	Rich (fuel rich regions present)	Lean (fuel rich regions absent)
Thermal efficiency	30-35%	50%

As shown in Table 1, LTC engine is highly beneficial to PM and NOx rates. However, CO and HC rates remain at high levels in those engines, which force researchers to explore advanced LTC systems to overcome that disadvantage in future engine systems (Pachiannan et al., 2019). Unlike conventional CI engine, lean fuel air mixture is provided, temperature is sustained below 2100 K and no significant exhaust after-treatment is needed in LTC engines. It is also seen that thermal efficiency, which remains between 30-35% in traditional CI engines, can be elevated up to 50% in LTC engines, which is advantageous to improve not only fuel consumption but also emission rates.

2.3. Advanced fuel injection

Fuel injection timing, the amount of fuel per injection and fuel injection pressure are considerable characteristics for a diesel engine system. While conventional diesel engines usually have only single fuel injection process, modern ones have the capability to implement the injection process in multi periods, as seen in Fig. 7 (Dieselnet, 2024).

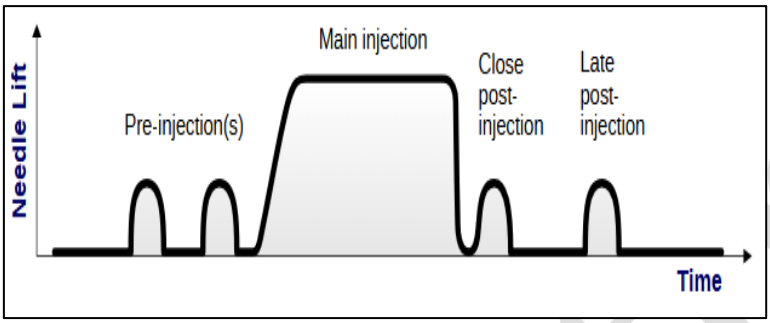


Figure 7. The process of multiple fuel injection

Reference: Dieselnet, 2024.

In compression-ignition engine systems, it is possible to reduce NOx rates via multiple fuel injection. As long as more fuel is injected far from the TDC and low in-cylinder temperature is maintained, NOx can be decreased (Sindhu et al., 2018). However, fuel injection at low pressure medium generally results in high soot rates, which restricts the aggressive use of late fuel injection. Therefore, currently researchers attempt to optimize the injection rates in different periods of multiple injection to control both NOx and soot rates (Motlagh et al., 2020).

In addition to multiple injection, increased fuel injection pressure is a considerable technique to control emission rates and improve engine efficiency (Agarwal et al., 2013). High pressure injection, known as common rail system (CRS) injection, enhances the quality of atomization, enables improved fuel vaporization and thus, provides more effective combustion in diesel engines. Development of CRS injection is shown in Fig. 8.

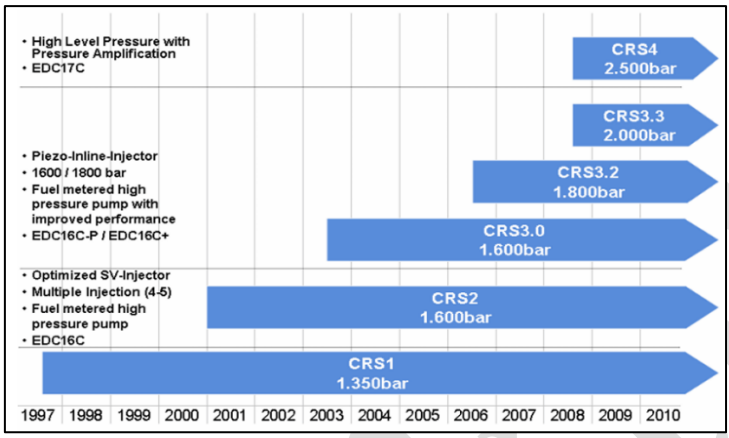


Figure 8. Evolution of CRS injection

Reference: Busch, 2004.

Fig. 8 indicates that fuel injection pressure in CRS4 mode (2500 bar) is almost twice higher than in CRS1 mode (1350 bar), which emphasizes the ongoing desire to achieve high pressure injection by the engine producers. Different from a mechanical fuel injection, CRS injection is electronically controlled, operates with piezo-actuated injectors and has the benefit of using high pressure fuel pumps to improve in-cylinder combustion. It is estimated that future common rail injection will focus on advanced actuators, improved control systems and novel nozzle designs to further enhance the injection pressure and thus, to meet strict emission regulations (Gerald Liu and Munnannur, 2020).

2.4. Variable Compression Ratio

Compression ratio is a significant parameter for the thermal efficiency of diesel engines. In conventional diesel engines, compression ratio remains fixed since the clearance volume of the engine is constant during the operation. However, in variable compression ratio (VCR) engine, as seen in Fig. 9, an actuator motor can modulate the control shaft, which can move

the lower-link (L-link) and thus, the piston stroke inside the cylinder is altered, its vertical position is changed (Nissan Motor Corporation, 2024). The modulation of the piston stroke enables the application of different compression ratio in the system.

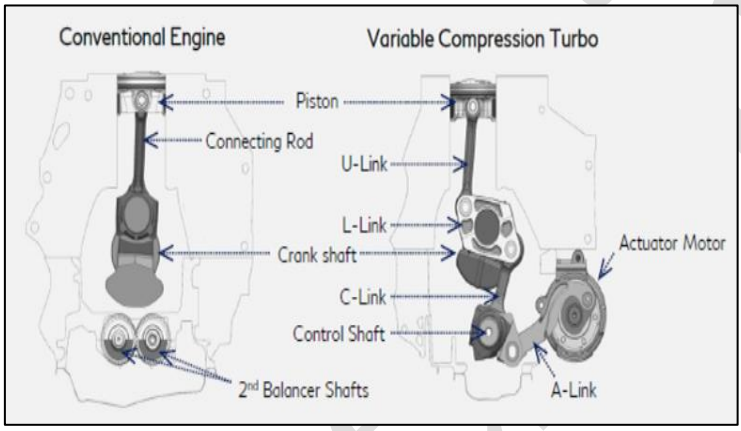


Figure 9. Comparison of conventional engine and variable compression ratio engine

Reference: Nissan Motor Corporation, 2024.

There are mainly three approaches to utilize the benefits due to VCR in diesel engines, as shown in Fig. 10 (Brauer et al., 2017). Firstly, at low loads, high compression ratio achieved in VCR engine enhances the thermal efficiency, which helps to reduce CO_2 rates and meet the stringent emission legislations. Also, at part-loaded engine operations, VCR can enable elevated specific engine power and thus, a decrease in displacement and in friction loss. Secondly, VCR is capable of lowering the compression ratio at the high-loaded operation zones of the engine, which may allow more supercharging and higher EGR for the system compared to that in conventional fixed-compression-ratio engine. That is considered to be advantageous to enhance soot/NOx trade-off at upper load range of the engine system. Thirdly, the increased compression ratio in VCR engine

can improve the thermal management in diesel engines at different ambient conditions. Therefore, unlike conventional diesel engine, it can be particularly effective at cold-start and high-altitude conditions through improving the fuel conversion efficiency and emission rates.

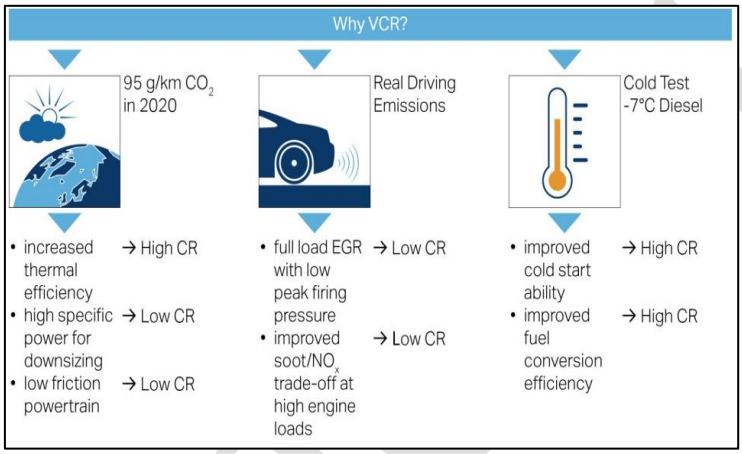


Figure 10. The benefits of VCR technology in diesel engines

Reference: Brauer et al., 2017.

3. CONCLUSION

In this study, the potential of some current techniques to increase diesel engine efficiency is explored in the literature. VVT, EHR techniques, LTC strategies, advanced fuel injection techniques and variable compression ratio are examined for the efficiency improvement. It is seen that control of intake charge via VVT can lower the pumping loss and increase the diesel engine efficiency. Also, producing extra work through channeling the wasted exhaust gas into additional components (such as a turbocharger or a power turbine or an ORC system) is highly helpful to achieve high efficiency. Decreasing the in-cylinder temperature through LTC methods is useful to improve not only thermal efficiency but also emission rates of diesel

engines. Instead of single and low-pressure fuel injection, diesel engines can be operated thermally better through multiple and high-pressure injection of the fuel. Moreover, it is seen that future diesel engines, unlike conventional engines, will probably be designed with the capability to perform with variable compression ratio. It has the potential to provide increased efficiency, low emission rates and enhanced thermal management through modulating engine displacement at different loads and at different ambient conditions.

Örnektir

4. REFERENCES

Agarwal, A. K., Srivastava, D. K., Dhar, A., Maurya, R. K., Shukla, P. C. and Singh, A. P. (2013). Effect of fuel injection timing and pressure on combustion, emissions and performance characteristics of a single cylinder diesel engine. Fuel, Vol. 111, pp. 374-383.

Ahmad, T. and Zhang, D. (2020). A critical review of comparative global historical energy consumption and future demand: The story told so far. Energy Reports, Vol. 6, pp. 1973-1991.

Aisinaftermarket. http://aisinaftermarket.eu/story/.The story behind the development of the variable valve timing. (Retrieved December 5th, 2024).

Basaran, H. U. & Ozsoysal, O. A. (2017). Effects of application of variable valve timing on the exhaust gas temperature improvement in a low-loaded diesel engine. Applied Thermal Engineering, Vol. 122, pp. 758-767.

Basaran, H. U. & Ozsoysal, O. A. (2023). Enhanced Exhaust After-treatment Warmup in a Heavy-Duty Diesel Engine System via Miller Cycle and Delayed Exhaust Valve Opening. Energies, Vol. 16(12), p. 4542.

Baweja, S. and Kumar, R. (2021). Efficiency Improvement of Internal Combustion Engines Over Time. In *Novel Internal Combustion Engine Technologies for Performance Improvement and Emission Reduction*, pp. 147-173.

Brauer, M., Schramm, C., Werler, A., Diezemann, M., Severin, C. and Kratzsch, M. (2017). Continuously variable compression ratio for downsizing diesel engines – approach to improving efficiency, emissions and performance. In *Internationales Wiener Motorensymposium*, pp. 263-291.

Busch, R. (2004). Advanced diesel common rail injection system for future emission legislation. In *10th Diesel Emission Reduction Conference*, pp. 1-27.

Çengel, Y. A. and Boles, M. A. (2015). The Second Law of Thermodynamics. In *Thermodynamics: An Engineering Approach*, pp. 275-312. McGraw-Hill Education, New York, 8th edition.

Çengel, Y. A. and Boles, M. A. (2015). Vapor and Combined Power Cycles. In *Thermodynamics: An Engineering Approach*, pp. 553-589. McGraw-Hill Education, New York, 8th edition.

Dieselnet. http://dieselnet.com/standards/eu/hd.php. EU: Heavy-Duty Truck and Buses. (Retrieved December 5th, 2024).

Dieselnet. http://dieselnet.com/tech/diesel_fi.php. Diesel fuel injection. (Retrieved December 9th, 2024).

Dieselnet. http://dieselnet.com/tech/engine_whr_turbocompound.php. Turbo-compounding. (Retrieved December 6th, 2024).

Feneley, A. J., Pesiridis, A. and Andwari, A. M. (2017). Variable geometry turbocharger technologies for exhaust energy recovery and boosting – A Review. Renewable and sustainable energy reviews, Vol. 71, pp. 959-975.

Garg, A., Magee, M., Ding, C., Roberts, L., Shaver, G., Koeberlein, E., Shute, R., Koeberlein, D., McCarthy Jr, J. and Nielsen, D. (2016). Fuel-efficient exhaust thermal management using cylinder throttling via intake valve closing timing modulation. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, Vol. 230(4), pp. 470-478.

Örnektir

Gerald Liu, Z. and Munnannur, A. (2020). Future diesel engines. In *Design and development of heavy duty diesel engines*, pp. 887-914.

Konur, O., Colpan, C. O. and Saatcioglu, O. Y. (2022). A comprehensive review on organic Rankine cycle systems used as waste heat recovery technologies for marine applications. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, Vol. 44(2), pp. 4083-4122.

Krishnamoorthi, M., Malayalamurthi, R., He, Z. and Kandasamy, S. (2019). A review on low temperature combustion engines: Performance, combustion and emission characteristics. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 116, p. 109404.

Mazuro, P. and Kozak, D. (2024). Effect of variable geometry turbocharger on the performance of the opposed piston engine – An experimental approach. Applied Thermal Engineering, Vol. 236, p. 121602.

Motlagh, T. Y., Azadani, L. N. and Yazdani, K. (2020). Multi-objective optimization of diesel injection parameters in a natural gas/diesel reactivity controlled compression ignition engine. Applied Energy, Vol. 279, p. 115746.

Muqeem, M., Ahmad, M. and Sherwani, A. F. (2015). Turbocharging of diesel engine for improving performance and exhaust emissions: a review. Journal of Mechanical and Civil Engineering, Vol. 12(4), pp. 22-29.

Ni, P., Wang, X. and Li, H. (2020). A review on regulations, current status, effects and reduction strategies of emissions from marine diesel engines. Fuel, Vol. 279, p. 118477.

örnektir

Nissan Motor Corporation, VC-Turbo Engine. http://nissan-global.com/EN/INNOVATION/TECHNOLOGY/ARCHIVE/VC_TURBO_ENGINE/. (Retrieved December 12th, 2024).

Pachiannan, T., Zhong, W., Rajkumar, S., He, Z., Leng, X. and Wang, Q. (2019). A literature review of effects on performance and emission characteristics of low-temperature combustion strategies. Applied Energy, Vol. 251, p. 113380.

Pelić, V., Mrakovčić, T., Medica-Viola, V. and Valčić, M. (2020). Effect of early closing of the inlet valve on fuel consumption and temperature in a medium speed marine diesel engine cylinder. Journal of Marine Science and Engineering, Vol. 8(10), p. 747.

Rahbar, K., Mahmoud, S., Al-Dadah, R. K., Moazami, N. and Mirhadizadeh, S. A. (2017). Review of organic Rankine cycle for small-scale applications. Energy conversion and management, Vol. 134, pp. 135-155.

Ramkumar, J., Anand, K. and Ramesh, A. (2024). Novel approaches of charging and compounding a single-cylinder diesel engine. International Journal of Engine Research, p. 14680874241295578. DOI: 10.1177/14680874241295578.

Seong, H., Lee, K. O., Choi, S., Adams, C. and Foster, D. E. (2012). Characterization of particulate morphology, nanostructures, and sizes in low-temperature combustion with biofuels. SAE Technical Paper 2012-01-0441. DOI: 10.4271/2012-01-0441.

Sindhu, R., Rao, G. A. P. and Murthy, K. M. (2018). Effective reduction of NOx emissions from diesel engine using split injections. Alexandria Engineering Journal, Vol. 57(3), pp. 1379-1392.

Teo, A. E., Yahya, W. J., Romagnoli, A., Rajoo, S. and Noor, A. M. (2015). Effectiveness of series and parallel turbo compounding on turbocharged diesel engine. Journal of Mechanical Engineering and Sciences, Vol. 8, pp. 1448-1459.

Wang, J. (2008). Hybrid robust air-path control of diesel engines operating conventional and low temperature combustion modes. IEEE Transactions on Control Systems Technology. Vol. 16(6), pp. 1138-1151.

Wang, J. and Chen, L. (2023). The impact of Miller cycle in combination to exhaust gas recirculation and post-injection on controlling diesel engine NOx. Energy Sources, Part A: Reovery, Utilization, and Environmental Effects. Vol. 45(3), pp. 7914-7931.

Örnektir

PARAMETERS AFFECTING COMBUSTION EFFICIENCY IN CIRCULATING FLUIDIZED BED SYSTEMS

Oguzhan ERBAS[1]

Halit ARAT[2]

1. INTRODUCTION

The low calorific value associated with low-quality lignite coal presents significant challenges when it comes to generating heat in large quantities. To effectively achieve the required heat outputs, it becomes necessary to feed exceptionally high flow rates of this coal into the boiler's combustion chamber. However, feeding coal at elevated flow rates is not simple; it entails a complex and labor-intensive series of pre-preparation processes. These processes include several critical stages: transportation of the coal from its source, blending different coal types to optimize performance, crushing to reduce the size of the coal pieces, screening to remove impurities, conveying to move the coal to the boiler, drying to eliminate excess moisture, and grinding to achieve the desired particle size for optimal combustion efficiency (Bosoaga et al., 2006; Chomiak et al., 1989).

For investments in these extensive preparation processes to be economically justified, the combustion system's capacity

1 Assoc. Prof. Dr., Kutahya Dumlupinar University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Kutahya, Turkey, 0000-0001-9424-4273, oguzhan.erbas@dpu.edu.tr.

2 Asst. Prof. Dr., Kutahya Dumlupinar University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Kutahya, Turkey, 0000-0002-6634-2535, halit.arat@dpu.edu.tr.

must align with an economically viable scale. This means that the system needs to be sufficiently sized to handle large quantities of coal without incurring excessive costs (Guo et al., 2019; Vamvuka et al., 2011).

Moreover, a direct relationship exists between increasing the combustion system's capacity and the steam flow rate it can produce. It is essential to enhance the speed at which coal combusts to achieve higher capacities. This improvement relies on two key factors: the particle shape factor and the turbulence within the combustion chamber. By optimizing these aspects, the coal introduced to the combustion chamber can be burned more efficiently, thereby minimizing the time required for complete combustion. This maximizes heat output and improves overall system performance, resulting in a more economical and effective combustion process (Mazumdar et al., 2000 ; Iordanidis et al., 2018).

The capability to utilize low-quality fuels while ensuring complete combustion is crucial for reducing environmental impacts associated with energy production. This involves managing the emissions of sulfur dioxide (SO_2) and nitrogen oxides (NO_x) to meet regulatory standards and minimize harmful effects on air quality. In this regard, fluidized bed combustion technology, particularly circulating fluidized bed (CFB) technology, stands out as an advanced and effective solution for the combustion of low-quality fuels. CFB technology allows for a more uniform mixing of fuel and air, which promotes efficient combustion, even with fuels that might otherwise be challenging to burn (Martín et al., 2006; Adanez et al, 1995).

Additionally, CFB systems are designed to operate at lower temperatures, enhancing the overall combustion process and significantly reducing the formation of NO_x emissions. The

ability to capture and recycle the bed material within the system further improves heat transfer and fuel utilization, making CFB a sustainable alternative for energy production. Overall, this technology represents a promising approach to achieving energy efficiency while mitigating adverse environmental impacts (Suksankraisorn et al., 2004 ; Shi et al., 2019). Circulating fluidized bed (CFB) technology is the most suitable technology for efficient combustion of low-quality fuels and effective control of emissions. The advantages of this technology include homogeneous heat distribution, flexibility, efficient combustion, and emission control. Therefore, it is considered the ideal solution for burning low-quality fuels in accordance with complete combustion conditions (Pang et al., 2019; Topal et al., 2003).

2. PARAMETERS AFFECTING COMBUSTION AND EFFICIENCY IN A FLUIDIZED BED

In fluidized bed systems, the combustion chamber is maintained at an approximately 850 to 950 °C temperature range. This specific temperature range enhances the retention of sulfur dioxide (SO_2), with the retention efficiency increasing as temperatures fall below 1000 °C. Furthermore, these conditions significantly reduce nitrogen oxides (NO_x) formation, as NO_x emissions are effectively suppressed under the same temperature threshold. The addition of appropriate adsorbents, such as limestone, plays a crucial role in these processes, often eliminating the need for extensive flue gas treatment facilities that are typically required in other combustion systems (Erbas, 2021).

In circulating fluidized bed boilers, the dynamics within the bed are characterized by a highly turbulent environment. This turbulence, coupled with the unique layout of the combustion chamber, facilitates a much more efficient heat

transfer to the heating surfaces compared to conventional combustion systems. As a result, the dimensions of both the combustion chamber and the associated heating surfaces can be significantly reduced. This not only optimizes space but also leads to a decrease in relevant investment costs, making these systems more economically viable (Arslan et al. 2021).

In circulating fluidized bed systems, the heat transfer mechanism to the heating surface is highly complex. It occurs within the combustion chamber and is influenced by the dynamic behavior of particle clusters and the dispersed phase that exists close to the heating surface. This interaction occurs between the bed's core flow region and the heating surface itself, creating an efficient transfer of heat. The intricate interplay of these factors results in enhanced thermal efficiency and operational effectiveness within the system (Erbas, 2021). The structure of a circulating fluidized bed combustion system is shown in Figure 1.

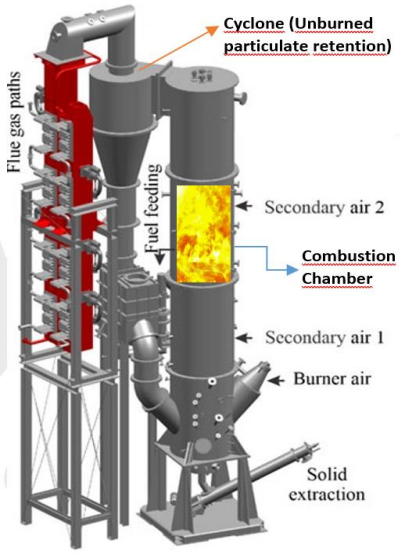


Figure 1. Circulating fluidized bed combustion system structure
Reference: Alobaid et al., 2022.

In a fluidized bed reactor, the system's dynamics result from a delicate balance between several forces. The drag force generated by pressurized combustion air interacts with the particles within the bed, while the ambient lift force acts in an upward direction. These forces counterbalance the gravitational forces exerted by the bed particles, which act downward. This interplay creates a unique environment where the bed material exhibits unstable and highly turbulent behavior, resulting in fluid-like characteristics that enhance mixing and reaction rates.

The abbreviation G + 3T represents the fundamental conditions necessary for combustion processes. It is a concise representation derived from the initial letters of four key concepts: Gazification, Turbulence, Temperature, and Time. Each of these elements plays a critical role in achieving efficient combustion. Gazification refers to the conversion of solid or liquid fuel into gas, enabling better ignition and burning. Turbulence pertains to mixing air and fuel, which enhances the combustion reaction. Temperature is essential for sustaining the reaction, as higher temperatures generally increase the rate of combustion. Lastly, Time (T3) signifies the duration for which the fuel and air mix remains in the combustion zone, impacting the completeness of the combustion process. Together, these components form the foundation for understanding and optimizing combustion systems.The intense turbulence within the fluidized bed plays a crucial role in facilitating the thorough mixing of the fuel introduced into the system with the combustion air. This process occurs under what is referred to as the T1 (Turbulance) condition of combustion, where the rapid movement of particles and air fosters an efficient interaction of the reactants (Erbas, 2007).

For the fuel/air mixture to ignite successfully, the temperature of this mixture must be elevated swiftly to exceed its ignition temperature. The inherent properties of the fluidized

bed contribute significantly to this process. Due to its high heat storage capacity and the turbulence generated by the upward flow of air, the system efficiently increases the temperature of the combustible mixture. This temperature rise allows the mixture to breach the ignition threshold, thereby achieving the necessary conditions for combustion, designated as the T2 (Temperature) condition.

Furthermore, in a circulating fluidized bed, the substantial turbulence and large heat storage capacity create ideal environments for the complete combustion of coke particles. These particles undergo gasification facilitated by the presence of CO_2 and H_2O, ensuring that they fully combust and contribute to the overall efficiency of the combustion process. This thorough and controlled reaction mechanism underscores the advantages of utilizing fluidized bed technology to enhance the combustion of solid fuels.

In contrast to many conventional combustion systems, which typically operate at combustion chamber temperatures exceeding 1500 ºC, fluidized bed combustion systems maintain their combustion chamber temperature within a range of 850 to 900 ºC. This lower temperature range is strategically chosen to facilitate effective internal retention of sulfur dioxide (SO_2) emissions and avoid ash melting, which can lead to operational challenges and equipment damage.

The combustion process within a fluidized bed environment is characterized as low-temperature combustion. This unique capability to sustain such temperatures is primarily attributed to two key factors: the significant heat storage capacity inherent in the bed material and the vigorous turbulence generated within the fluidized bed. The heat storage helps maintain temperature stability, while the intense turbulence enhances mixing and promotes uniform combustion, leading to

more efficient energy conversion and reduced emissions (Yilmazoglu, 2012).

When the fuel is introduced into the boiler, its moisture content quickly evaporates. This initial phase is crucial as it prepares the fuel for efficient combustion. The devolatilization process, which involves the breakdown of the fuel, releases various combustible gases. These gases play a significant role in the overall combustion chemistry and are critical for achieving high-temperature burning. For a comprehensive understanding of the combustion reactions associated with this process, refer to Table 1., which outlines the specific chemical reactions that occur during the devolatilization of the fuel. This information highlights the complexity and efficiency of fuel transformation within the boiler system (Huang, 2024).

Table 1. Kinetic model for combustion reactions in a fluidized bed (Huang, 2024).

Reaction equation	Reaction rate	Reaction rate coefficient (mol m^{-3} s^{-1})
$H_2O(moisture) \rightarrow H_2O(g)$	R1 = $k1$ [H_2O]	$k1 = 5.13 \times 10^{10} \exp(-10585/T)$
Volatile$\rightarrow \alpha_1$Tar+α_2CO+α_3CO_2+ α_4CH_4+α_5H_2 +$\alpha_6H_2O(g)$+α_7NH_3+α_8HCN+α_9 H_2S	R2 = k2 [Volatile]	$k2 = 0.5T \exp(-5500/T)$
$CO+0.5O_2 \rightarrow CO_2$	R3 = $k3$ [CO] [O_2]	$k3 = 10^{10} \exp(-15119/T)$
$CH_4+2O_2 \rightarrow CO_2+2H_2O$	R4 = $k4$ [CH_4] [O_2]	$k4 = 5.01 \times 10^{11} \exp(-3430/T)$
$H_2+0.5O_2 \rightarrow H_2O$	R5 = $k5$ [H_2]$^{1.5}$ [O_2]	$k5 = 1.03 \times 10^{14} T^{-1.5} \exp(-3430/T)$
$Tar + O_2 \rightarrow CO_2+2H_2O$	R6 = $k6$ [Tar] [O_2]	$k6 = 3.8 \times 10^{7} \exp(-6710/T)$
$C+0.5O_2 \rightarrow CO$	R7 = $k7$ [O_2]	$k7 = 1.47 \times 10^{8} \theta_c T \exp(-6710/T)$
$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$	R8 = $k8$ [H_2O]	$k8 = 6.36 m_c T \exp(-13590/T)$
$CO + H_2 \rightarrow C + H_2O$	R9 = $k9$ [H_2] [CO]	$k9 = 5.218 \times 10^{-4} m_c T^2 \exp(-6319/T-17.29)$
$C + CO_2 \rightarrow 2CO$	R10 = $k10$ [CO_2]	$k10 = 6.36 m_c T \exp(-22645/T)$
$2CO \rightarrow C + CO_2$	R11 = $k11$ [CO]	$k11 = 5.218 m_c T^2 \exp(-2363/T-20.92)$
$H_2S+1.5O_2 \rightarrow H_2O + SO_2$	R12 = $k12$ [H_2S][O_2]	$k12 = 5.2 \times 10^{8} \exp(-19300/RT)$

Several combustion losses emerge during coal combustion that can significantly impact efficiency and emissions. One notable loss is the heat released from unburned

carbon present in fly ash. This unburned carbon represents the fuel that did not participate in the combustion process and contributes to the overall thermal inefficiency of the system. Additionally, the presence of moisture in the coal can lead to further energy losses, as water must be evaporated before combustion can effectively occur.

Moreover, incomplete combustion of the coal can result in the formation of carbon monoxide and other volatile organic compounds, which not only represent lost energy but also contribute to air pollution. The design of the combustion chamber, the mixing of air and coal, and the operational parameters all play a crucial role in minimizing these losses. Effective management and optimization of these factors are essential for improving the efficiency of coal combustion processes and reducing environmental impacts.

The heat loss due to unburned carbon in fly ash, denoted as q, was calculated using Equation (1). (Li, 2024).

$$q = \frac{C_u \times \mathrm{A_d} \times 0.7 \times q_c}{q_{\mathrm{coal}}} \quad (1)$$

"C_u" signifies the unburned carbon content present in the fly ash, expressed as a weight percentage (wt.%). A_d illustrates the ash content found in the coal, also represented in weight percentage (wt.%). The calorific values, which quantify the energy content, for carbon and coal are denoted by "Q_c" and "Q_{coal}", respectively, and are measured in kilojoules per kilogram (kJ/kg). In the simulation process, the proportions of fuel nitrogen (ammonia- N and coal-N) conversion to NO, represented as X_N, was computed using Eq. (2).

$$X_{\mathrm{N}} = \frac{\mathrm{M_N} \times \frac{Q \times C_{NO}}{22.4}}{Q_{coal} \times \mathrm{N} + \frac{Q_{NH_3}}{22.4} \times \mathrm{M_N}} \quad (2)$$

$$Q = (Q_1 + Q_2 - Q_{O_2}) + Q_{coal} \times 22.4 \times \left(\frac{C}{M_C} + \frac{N}{M_N} + \frac{S}{M_S}\right) + Q_{NH_3} \times 0.5 \quad (3)$$

Where, Q represents the total flue gas flow rate, in L/h; Q_{coal} represents the supply rate of coal, in g/h; Q_1, Q_2, Q_{O2} Q_{NH3} represent the primary air, secondary air, theoretical oxygen demand for ammonia and coal and ammonia injected into the reactor, in L/h; C_{NO} represents the flue gas outlet NO concentration in the experimental or simulated conditions, in vol.%; M_C, M_N, M_S are the molar masses of carbon, nitrogen, and sulfur, in g/mol; C, N, S represent the carbon, nitrogen, and sulfur content in the fuel, in wt.% (Li, 2024).

3. RESULTS AND DISCUSSION

The intense turbulence generated within CFB boilers significantly enhances the mixing of combustion gases and air in the combustion chamber. This dynamic environment facilitates a more effective and efficient combustion process. As a result, the heat transfer to the boiler's heating surfaces is markedly improved compared to traditional combustion systems. This heightened heat transfer optimizes thermal efficiency and contributes to the boiler's overall performance and energy output, making it a more effective solution for various heating applications. The fluidized bed system creates an optimal environment that promotes the clean and efficient combustion of low-quality fuels. This technology features carefully controlled internal combustion conditions, which include precise temperature management and adequate mixing of fuel and air, ensuring complete combustion. Additionally, the fluidized bed is equipped with advanced emission control mechanisms that effectively minimize pollutants released into the atmosphere. As a result, this system enhances energy efficiency and adheres to

stringent environmental standards, making it an ideal solution for utilizing lower-grade fuels while reducing harmful emissions.

The dynamics of particles, emission behavior, and heat transfer in fluidized bed systems are intricately linked to the hydrodynamic parameters and the specific operating conditions of the bed. These hydrodynamic parameters include factors like particle size, bed height, gas velocity, and distribution, all of which significantly influence how the system operates. Moreover, the operating regime, whether it is in a bubbling, turbulent, or circulating mode directly affects the interaction between particles and the gas phase. As these interactions change, they lead to combustion efficiency variations, emissions release and composition, and overall heat transfer characteristics. Understanding these relationships is crucial for optimizing fluidized bed systems' performance and environmental impact.

In our country, there is a critical need to expand the range of research studies focused on the clean and efficient combustion of low-quality lignites within circulating fluidized bed (CFB) systems. It is essential to experimentally determine the optimal combustion conditions specific to these low-grade fuels while also thoroughly investigating the hydrodynamic structures and heat transfer properties that emerge under such operating conditions. This detailed exploration will contribute significantly to our understanding of maximizing efficiency and minimizing environmental impact when using lignites in energy production.

Furthermore, in alignment with our nation’s strategic energy goals, it is vital to enhance the adoption of fluidized bed technology in medium and large-scale energy production facilities. To achieve this, a comprehensive planning initiative is

needed that outlines the implementation and optimization of this technology. Additionally, it is paramount to invest in research and development (R&D) studies aimed at fostering the domestic production of fluidized bed systems. Such endeavors will boost our energy independence and promote innovation and sustainability within our energy sector, aligning with broader national interests and environmental commitments.

Örnektir

4. REFERENCES

Adanez, J., De Diego, L. F., Gayan, P., Armesto, L., & Cabanillas, A. (1995). A model for prediction of carbon combustion efficiency in circulating fluidized bed combustors. *Fuel*, *74*(7), 1049-1056.

Alobaid, F., Kuhn, A., Nguyen, N. M., Johnen, B., Peters, J., & Epple, B. (2022). Numerical and experimental study of co-combustion of refuse-derived fuels in a circulating fluidized bed during load change. *Frontiers in Energy Research*, *10*, 969780.

Arslan, O., & Erbas, O. (2021). Investigation on the improvement of the combustion process through hybrid dewatering and air pre-heating process: A case study for a 150 MW coal-fired boiler. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, *121*, 229-240.

Bosoaga, A., Panoiu, N., Mihaescu, L., Backreedy, R. I., Ma, L., Pourkashanian, M., & Williams, A. (2006). The combustion of pulverised low grade lignite. *Fuel*, *85*(10-11), 1591-1598.

Chomiak, J. L. J. P., Longwell, J. P., & Sarofim, A. F. (1989). Combustion of low calorific value gases; problems and prospects. *Progress in energy and combustion science*, *15*(2), 109-129.

Erbas, O. (2021). Investigation of factors affecting thermal performance in a coal-fired boiler and determination of thermal losses by energy balance method. *Case Studies in Thermal Engineering*, *26*, 101047.

Guo, L., Zhai, M., Wang, Z., Zhang, Y., & Dong, P. (2019). Comparison of bituminous coal and lignite during combustion: Combustion performance, coking and slagging characteristics. *Journal of the Energy Institute*, *92*(3), 802-812.

Huang, X., Jin, X., Dong, L., Li, R., Yang, K., Li, Y., ... & Che, D. (2024). CPFD numerical study on tri-combustion characteristics of coal, biomass and oil sludge in a circulating fluidized bed boiler. *Journal of the Energy Institute*, *113*, 101550.

Iordanidis, A., Asvesta, A., & Vasileiadou, A. (2018). Combustion behaviour of different types of solid wastes and their blends with lignite. *Thermal Science*, *22*(2), 1077-1088.

Li, T., Li, L., Liu, C., Liu, H., Sun, G., Ding, N., ... & Duan, L. (2024). Investigating combustion efficiency and NOx emission reduction in fluidized bed ammonia-coal co-firing. *Combustion and Flame*, *270*, 113735.

Martín, C., Villamañán, M. A., Chamorro, C. R., Otero, J., Cabanillas, A., & Segovia, J. J. (2006). Low-grade coal and biomass co-combustion on fluidized bed: exergy analysis. *Energy*, *31*(2-3), 330-344.

Mazumdar, B. K. (2000). Theoretical oxygen requirement for coal combustion: relationship with its calorific value. *Fuel*, *79*(11), 1413-1419.

Pang, L., Shao, Y., Zhong, W., & Liu, H. (2018). Experimental investigation on the coal combustion in a pressurized fluidized bed. *Energy*, *165*, 1119-1128.

Shi, Y., Zhong, W., Shao, Y., & Liu, X. (2019). Energy efficiency analysis of pressurized oxy-coal combustion system utilizing circulating fluidized bed. *Applied Thermal Engineering*, *150*, 1104-1115.

Suksankraisorn, K., Patumsawad, S., Vallikul, P., Fungtammasan, B., & Accary, A. (2004). Co-combustion of municipal solid waste and Thai lignite in a fluidized bed. *Energy conversion and Management*, *45*(6), 947-962.

Topal, H., Atimtay, A. T., & Durmaz, A. (2003). Olive cake combustion in a circulating fluidized bed☆. *Fuel*, *82*(9), 1049-1056.

Vamvuka, D., & Sfakiotakis, S. (2011). Combustion behaviour of biomass fuels and their blends with lignite. *Thermochimica Acta*, *526*(1-2), 192-199.

Yılmazoğlu, M. Z., & Durmaz, A. (2012). thermodynamıc analysıs of an ıntegrated gasıfıcatıon combıned cycle power plant. *Journal of Thermal Science & Technology/Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, *32*(2).

Örnektir

KOROZİF ORTAMLAR İÇİN MAKİNE ELEMANLARININ TASARIM PRENSİPLERİ

Tuğçe TEZEL[1]

Volkan KOVAN[2]

1. GİRİŞ

Makine elemanlarının tasarımında, çevresel etkenler ve bu etkenlere bağlı olarak malzeme üzerinde meydana gelen bozulmalar her geçen gün daha fazla önem kazanmaktadır. Özellikle, korozyon gibi çevresel faktörlerin etkisi, makine elemanlarının ömrünü ve verimliliğini doğrudan etkileyen kritik bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Korozyon, metalik malzemelerin çevreleriyle kimyasal veya elektro-kimyasal reaksiyona girerek bozulmasına yol açan bir süreçtir. Bu süreç, malzemenin dayanımını, estetiğini, işlevselliğini ve güvenliğini zayıflatarak, sistemin tüm fonksiyonlarını olumsuz yönde etkileyebilir.

Günümüzde korozyon, endüstriyel uygulamalarda önemli bir sorun teşkil etmektedir. Özellikle deniz suyu, asidik ortamlarda çalışan makineler ve agresif kimyasal bileşiklere maruz kalan elemanlar, sürekli olarak korozyon riski ile karşı karşıyadır. Bu nedenle, makine elemanlarının tasarımında korozyona karşı dayanıklı malzemelerin seçilmesi, doğru koruma yöntemlerinin uygulanması ve korozyonun etkilerini en aza indirmek için gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir.

1 Doç. Dr., Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, tugcetezel@akdeniz.edu.tr, ORCID: 0000-0003-0139-442X.

2 Prof. Dr., Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, kovan@akdeniz.edu.tr, ORCID: 0000-0002-0599-525X.

Korozif ortamlar için makine elemanları tasarımı, yalnızca malzeme seçiminden ibaret olmayıp, aynı zamanda tasarım sürecinde korozyon türlerinin doğru şekilde analiz edilmesi ve bu türlere özel çözümler geliştirilmesi gerekmektedir. Korozif ortamlar için tasarım yaparken, genellikle maliyet, dayanıklılık ve performans arasında denge kurmak önemlidir. Yüksek korozyon direncine sahip malzemeler genellikle pahalı olabilir ve işlenebilirlikleri de zordur. Bu yüzden, tasarımda korozyon direnci sağlarken ekonomik ve işlevsel çözümler geliştirmek, mühendislik açısından kritik bir öneme sahiptir. Ayrıca, korozyona dayanıklı yapılar tasarlarken, sistemin bakım ve onarım gereksinimlerinin yanı sıra, elemanların ömrü boyunca meydana gelebilecek aşındırıcı etkilerin göz önünde bulundurulması gereklidir.

Bu bağlamda, korozyonla mücadelede alınacak önlemler, tasarım sürecinin başından itibaren stratejik olarak belirlenmelidir. Tasarımın, malzeme seçimi, yüzey işlemleri, kaplama teknikleri ve çevresel etkenlere karşı dayanıklılığı artırma gibi faktörleri içeren çok yönlü bir yaklaşımı içermesi gerektiği söylenebilir. Ayrıca, korozyonun çeşitli türlerine karşı duyarlı olan tasarım elemanları için risk analizi yaparak, potansiyel sorunların önceden tespit edilmesi ve çözümlenmesi sağlanabilir.

Bu kitap bölümü, korozif ortamlarda karşılaşılan zorluklara uygun tasarım yaklaşımlarını ve mühendislik çözümlerini detaylı bir şekilde ele alacak ve bu alanda çalışan mühendisler için pratik bir rehber niteliği taşıyacaktır. Amacımız, korozyonun makine elemanları tasarımındaki etkilerini anlamak ve bu etkileri minimize etmek için uygulanan yöntemler hakkında bilgi sağlamak, böylece daha güvenilir, dayanıklı ve uzun ömürlü makineler üretmektir.

2. KOROZYON TÜRLERİ VE TASARIM PRENSİPLERİ

Korozif ortamlar, metalik malzemelerin çevresiyle reaksiyona girerek fiziksel ve kimyasal özelliklerinde ölçülebilir değişimlere yol açtığı süreçlerdir. Bu süreç, malzemenin işlevselliğini zayıflatarak, bireysel bileşenlerden tüm sistemlere kadar çeşitli ölçeklerde arızalara neden olabilir. DIN EN ISO 8044 standardına göre, bir sistemin veya bileşenin işlevselliği bozulmadıkça, bu süreç teknik anlamda "korozif" olarak değerlendirilmez. Bu tanım, korozif tasarımın önemini bir kez daha vurgulamaktadır: Malzeme ve sistemlerin işlevselliğini öncelikli olarak korumak, korozif tasarımın temel yaklaşımıdır.

Korozif süreçlerin tamamen önlenmesi genellikle mümkün olmasa da etkilerini azaltmak amacıyla farklı yöntemler uygulanabilir. Örneğin, paslanmaz çelik gibi yüksek krom içeriğine sahip korozyona dayanıklı malzemeler tercih edilebilir. Ancak bu tür malzemeler yüksek maliyetleri ve işlenebilirlik zorlukları nedeniyle çoğu durumda ekonomik değildir. Bu nedenle, "korozyon dirençli" bir yapı tasarlamak yerine, "korozyon toleranslı" bir yapı yaklaşımı daha uygun görülmektedir. Bu yaklaşım, sistemin kritik bileşenlerinin kolayca incelenebilir, korunabilir ve gerekirse değiştirilebilir olmasını sağlayarak ekonomik ve işlevsel bir çözüm sunar.

Korozyonun farklı türlerini ve bunlara karşı uygulanacak tasarım önlemlerini anlamak, etkili bir mühendislik çözümü geliştirmek için gereklidir. Bu bağlamda, korozyon problemlerini tanımlamak ve anlamak için şu ayrımların yapılması faydalı olacaktır:

- Serbest yüzey korozyonu,
- Temasa bağlı korozyon,
- Gerilime bağlı korozyon ve

- Malzeme içinde seçici korozyon.

Tasarımcıların alacağı önlemler, bu korozyon türlerinin nedenlerine ve etkilerine bağlıdır. Bu türlerle ilgili örnekler ve alınabilecek önlemler, aşağıda detaylı olarak ele alınmıştır.

Serbest yüzey korozyonu, yüzeyde homojen bir şeklinde veya lokalize olarak meydana gelebilir. Özellikle lokalize korozyon, homojen aşınmaya kıyasla daha tehlikelidir, çünkü bu durum, yüksek gerilme etkilerine neden olabilir ve genellikle önceden tahmin edilmesi zor olabilmektedir. Bu nedenle, tasarım sürecinde, bu tür risklere açık bölgelerin özel olarak dikkate alınması gereklidir.

Homojen yüzey (üniform) korozyonu, yüzeyde yaygın olarak malzeme kaybının görüldüğü bir durumdur. Genellikle zayıf asidik veya bazik ortamlar, nem ve oksijen ile etkileşim sonucu ortaya çıkar. Bu korozyon türü, malzeme yüzeyinin eşit bir şekilde korozyonuyla karakterizedir. Homojen yüzey korozyonunun başlıca nedenleri arasında, nemli ortamlar ve özellikle zayıf asidik veya bazik elektrolitlerin oluşumu bulunur. Ayrıca, havanın veya çevresel ortamın oksijen içeriğiyle temas ve çiy noktası sıcaklıklarının altına düşüş de bu tür korozyonun tetikleyicilerindendir.

Bu tür korozyon genellikle yüzeyde eşit dağılımlı olarak görünür. Örneğin, normal atmosfer koşullarında çelik yüzeylerde yılda yaklaşık 0,1 mm meydana gelebilir. Ancak ortamın agresifliğinin artması, yüksek akış hızları veya yerel ısınma gibi faktörler bunu hızlandırabilir. Dolayısıyla, tasarımda bu etkilerin göz önünde bulundurulması önemlidir. Homojen yüzey korozyonunu önlemek için, yeterli kalınlık seçimi ve uygun malzeme kullanımı ile uzun ömürlü bir tasarım yapılmalıdır. Ayrıca, nem birikimini önlemek için uygun geometrik şekillendirme, ısı ve soğuk köprülerini engellemek için iyi bir yalıtım sağlanmalı ve yüksek akış hızlarından (>2

m/s) kaçınılmalıdır. Bunun yanı sıra, koruyucu kaplama uygulamaları da bu tür korozyonun etkilerini azaltmaya yardımcı olabilir.

Çukurcuk ve oyuk korozyonu, malzeme yüzeyinde çok küçük, krater şeklinde oyukların oluşmasıyla karakterizedir. Bu tür korozyon genellikle çok lokalize olup, yüzeyde derinleşen küçük çukurlar oluşturur. Çukurcuk korozyonu, malzemenin dayanımını büyük ölçüde zayıflatabileceği için ciddi tehlike arz etmektedir. Bu tür korozyonun başlıca nedenleri arasında, malzeme heterojenliklerinden kaynaklanan anodik ve katodik bölgeler bulunur. Ayrıca, farklı yoğunluklarda oluşan elektrolit konsantrasyonları ve ortam koşullarının bölgesel farklılıkları (örneğin ısı) da çukur korozyonunun meydana gelmesinde etkili olabilir.

Çukurcuk ve oyuk korozyonunun önlenmesi için malzeme homojenliğinin artırılması büyük önem taşır. Ayrıca, koruyucu kaplama uygulamalarının tüm yüzeye uygulanması, bu tür korozyonun etkilerini azaltmak için etkili bir yöntemdir. Bu önlemler, çukur korozyonunun önüne geçilmesinde önemli bir rol oynar.

Aralık korozyonu, genellikle iki yüzey arasındaki dar alanlarda meydana gelir ve elektrolitlerin birikmesi ile tetiklenir. Bu tür korozyon, özellikle paslanmaz çeliklerde görülür ve oksijen eksikliği nedeniyle pasif tabakanın bozulması sonucu ortaya çıkar. Aralık korozyonunun başlıca nedenleri arasında nem birikmesi ve elektrolit oluşumu yer alırken, paslanmaz çeliklerde oksijen eksikliği nedeniyle pasif tabakanın bozulması da önemli bir etkendir.

Aralık korozyonunun önlenmesi için geçiş bölgelerinde pürüzsüz yüzeyler oluşturmak önemlidir. Kaynak işlemlerinde düzgün kök birleşimi sağlanarak, aralıkların oluşması engellenebilir. Ayrıca, bu aralıkların kapatılması ve oksijen

eksikliğinin önlenmesi, aralık korozyonunu önlemek için etkili bir yöntemdir. Bu önlemler, aralık korozyonunun olumsuz etkilerini en aza indirerek, daha uzun ömürlü ve ekonomik bir tasarım sağlamaya yardımcı olur.

Temasa bağlı korozyon, farklı potansiyellere sahip iki metalin, elektrolit varlığında bir arada bulunarak birbirine temas etmesi sonucu meydana gelir. Bu korozyon türü, metal yüzeylerinde galvanik etkiler ve elektrolitlerin etkisiyle gerçekleşir. Temasa bağlı korozyon, iki metalin farklı potansiyellere sahip olması durumunda ortaya çıkar. Bu metaller, bir elektrolit ile temas eder ve aralarındaki bağlantı nedeniyle korozyon başlar. Elektrolit, bu metal birleşim yerlerinde farklı potansiyel farkları oluşturur, bu da galvanik korozyona yol açar.

Daha az soy metal, temas noktasına yakın bölgedeki korozyon etkilerinden daha fazla etkilenir. Bu korozyon, metalin yüzey alanı ne kadar küçükse o kadar yoğun olur. Ayrıca, bu durum, kenar etkisi nedeniyle korozyonun daha da artmasına neden olur. Korozyon ürünleri genellikle yüzeyde çeşitli yan etkiler yaratabilir, örneğin tortu birikmesi, aşındırma ve kirlenme gibi sorunlara yol açabilir.

Temasa bağlı korozyonu önlemek için birkaç yöntem bulunmaktadır. Öncelikle, potansiyel farkları küçük olan metal kombinasyonları kullanmak ve bu şekilde düşük temas korozyon akımları sağlanabilir. Ayrıca, elektrolitin metal yüzeyine etkisini engellemek için metallerin arasına yerel izolasyonlar yerleştirilebilir. Elektriksel etkileşimi ortadan kaldırmak için elektrolitlerin tamamen ortadan kaldırılması da önerilen bir çözümdür. Gerektiğinde, elektrokimyasal olarak daha az soy metalin kontrollü bir şekilde aşındırılması sağlanarak, “kurban anotlar” kullanılabilir.

Birikinti korozyonu, metal yüzeyinde veya aralıklarda yabancı cisimlerin birikmesiyle başlar. Bu yabancı cisimler, genellikle korozyon ürünleri, taşıma sıvılarından kalan kalıntılar veya buharlaşma ürünleri olabilir ve bu da o bölgede potansiyel farkları yaratır.

Birikinti korozyonunun önlenmesi için korozyona neden olan ürünlerin birikmesini engellemek önemlidir. Bu birikintiler, yüzeylerden temizlenebilir ya da yerinden çıkarılabilir. Ayrıca, sistemde durgun su bölgeleri oluşturulmamalıdır. Sistemlerde eşit akış sağlanmalı, düşük hızlardan kaçınılmalı ve kendiliğinden tahliye sağlanmalıdır.

Korozyonlu yorulma, tekrarlı yüklere maruz kalan bir bileşenin, korozyon etkisiyle dayanıklılığının düşmesi sonucu ortaya çıkar. Bu durum, özellikle sürekli yük tekrarı altında kalan bileşenlerde yaşanır. Korozyon, özellikle hafif korozif ortamlarda mikroskobik seviyede gözlemlenir. Malzemenin üzerinde tekrarlayan gerilme ve gevşemeler, korozyonun hızlanmasına neden olur. Bu tür korozyonun önlenmesi için yük tekrarının en aza indirilmesi, yüzeylerdeki gerilme yığılmalarından kaçınılması ve uygun kaplama yöntemlerinin kullanılması önerilmektedir.

Gerilmeli korozyon çatlaması, özellikle bazı hassas malzemelerin, dışarıdan gelen gerilme veya iç gerilmelerle birlikte, belirli bir korozif ortamda çatlama eğilimi göstermesidir. Bu tür korozyon, transkristalin veya interkristalin çatlaklar şeklinde kendini gösterir ve çatlaklar hızlı bir şekilde yayılabilir. Bu durumu önlemek için, korozyon açısından hassas malzemelerden kaçınılması veya gerilme noktalarının ortadan kaldırılması gereklidir. Ayrıca, yüzeylere basınç uygulamak veya gerilme azaltma yöntemleriyle bu tür korozyon engellenebilir.

Erozyon korozyonu, iki yüzey arasında sürtünme hareketi sırasında oluşan korozyondur. Bu, genellikle yüksek yüzey basınçları altında ve hareketli parçaların bir arada bulunduğu durumlarda meydana gelir. Sürtünme, oksitlenme ürünlerinin birikmesine yol açarak, malzemenin yüzeyine zarar verebilir. Bu tür korozyonun önlenmesi için sürtünme hareketini engelleyen elastik destekler veya hidrostatik yataklar kullanılabilir. Ayrıca, yüzeylere dayanıklı kaplamalar uygulamak da etkili bir çözüm sağlar.

Seçici korozyon, malzeme matrisinin yalnızca belirli bileşenlerinin korozyona uğraması durumudur. Bu, özellikle interkristalin korozyon şeklinde ortaya çıkar. Bazı malzeme bileşenleri, korozyona karşı daha hassas olabilir, bu da sadece bu bölgelerde korozyonun başlamasına yol açar. Bu tür korozyonun önlenmesi için uygun malzeme seçimleri ve işleme yöntemleri uygulanmalıdır.

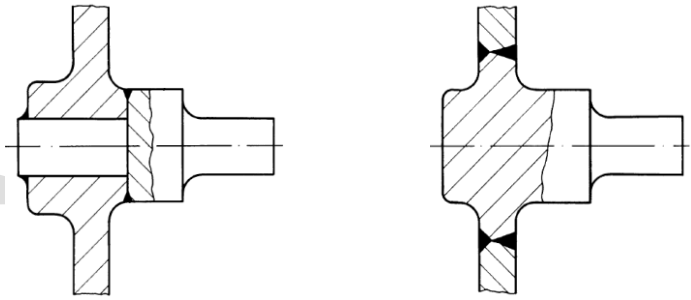
3. UYGULAMA ÖRNEKLERİ

Korozif ortamlarda uzun ömürlü ve dayanıklı makine elemanları tasarımı, özellikle endüstriyel uygulamalarda büyük önem taşır. Bu tasarım süreci, malzeme seçimi, yüzey kaplamaları, bağlantı elemanları ve ısıl işlemler gibi çeşitli unsurları kapsar. Tasarımda öncelikle, korozif etkilerden en az şekilde etkilenecek malzemeler tercih edilmeli ve yüzey kaplamalarıyla koruma sağlanmalıdır. Ayrıca, elemanların şekli ve yerleşimi, elektrolit birikintilerinin engellenmesi ve birikintilerin serbestçe akması gibi tasarımlar üzerine odaklanmalıdır. Kaynak yapılan alanlarda, korozyon riskini azaltmak için dikkat edilmesi gereken unsurlar arasında kök hatalarının önlenmesi ve kesintisiz kaynakların kullanılması yer alır. Isıl işlem ve gerilme giderme teknikleri, malzemenin dayanıklılığını artırmak için doğru şekilde uygulanmalıdır. Akışkan taşıyan yapılar ise, kavitasyon korozyonunu

engellemek ve sıvıların tamamen boşaltılmasını sağlamak amacıyla uygun şekilde tasarlanmalıdır. Bu prensipler, makine elemanlarının uzun ömürlü olmasını sağlayarak, bakım maliyetlerini azaltır ve güvenli kullanım sağlar.

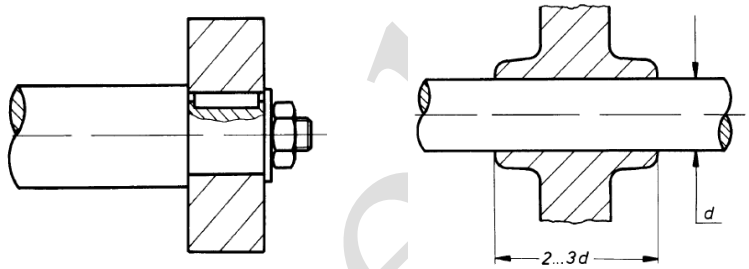
Korozif ortamlar, makine elemanlarının tasarımında dikkate alınması gereken önemli bir faktördür. Bu bölümde, korozif etkilerin en aza indirilmesi ve makine elemanlarının uzun ömürlü hale getirilmesi için kullanılan tasarım yöntemleri ve uygulama örnekleri detaylandırılmıştır. Aşağıda verilen örnekler, korozif ortamların farklı özelliklerine yönelik olarak geliştirilmiş tasarım çözümlerini içermektedir.

Kaynak noktalarının, gerilme yığılmalarını azaltacak şekilde kesit değişikliklerinin olduğu bölgelerden uzaklaştırılması ve daha düşük mekanik zorlanmanın bulunduğu alanlara taşınması, yapıların dayanıklılığı açısından önemlidir (Şekil 1). Özellikle değişken yüklerin etkisinde çalışan ve korozif ortamlarla temas eden birleşim noktalarında bu düzenlemeler, korozyonunun oluşumunu büyük ölçüde sınırlandırabilir. Bu tür tasarım değişiklikleri hem yapının ömrünü uzatır hem de bakım gereksinimlerini azaltır.



Şekil 1. Kaynak noktaları gerilmenin daha düşük olduğu alanlara (b) taşınmalıdır.

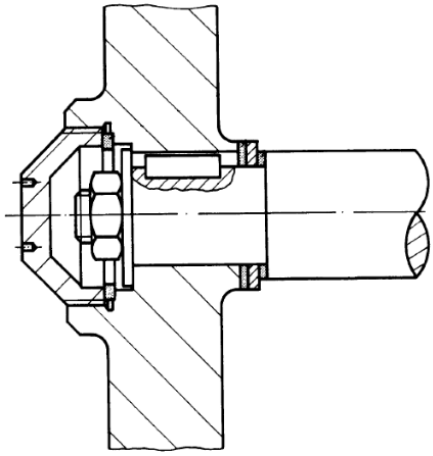
Şaft ve göbek birleşimlerinde, bağlantı boşluklarının yapıştırıcı maddelerle doldurulması, düşük mekanik ve termal yükler altındaki bileşenlerde aralık korozyonunu etkili bir şekilde önler (Şekil 2). Bunun yanı sıra, farklı metallere sahip yüzeylerin temas ettiği durumlarda oluşabilecek temas korozyonu riski de bu yöntemle minimize edilir. Böylece birleşim noktalarının hem dayanıklılığı hem de uzun vadeli performansı artırılmış olur.



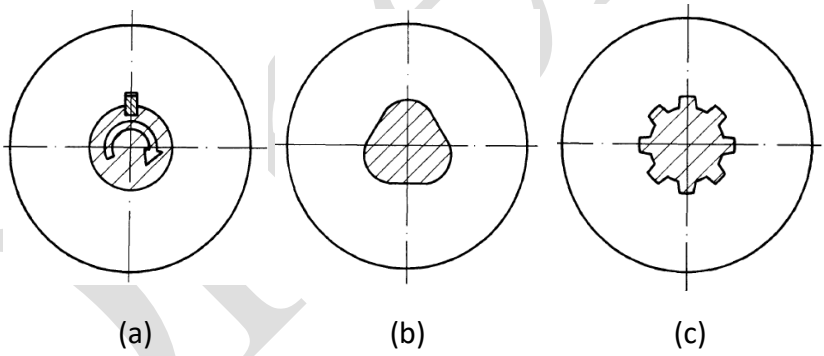
Şekil 2. Yapıştırma bağlantıları (b) kullanılarak boşluklar önlenebilir.

Mil ve göbek birleşimlerinde sızdırmazlık halkalarının kullanılması (Şekil 3), birleşim bölgelerine korozif ortamların ulaşmasını önler. Bu tür koruyucu düzenlemeler, yalnızca birleşim bölgesindeki aralık korozyonunu değil, aynı zamanda sürtünme korozyonunu da önler. Özellikle yoğun korozyon riski taşıyan durumlarda, bu koruma yöntemi somun ve diğer bağlantı elemanlarını da kapsayacak şekilde genişletilmelidir.

Mil ve göbek birleşimlerinde gerilme dağılımının dengeli bir şekilde sağlanması, yerel gerilme yığılmalarını ve aralık korozyonunu önlemek için önemli bir tasarım prensibidir (Şekil 4). Bu tür bir gerilme yönetimi, birleşim elemanlarının daha uzun süre işlevsel kalmasına ve yapının genel güvenliğinin artmasına katkı sağlar.

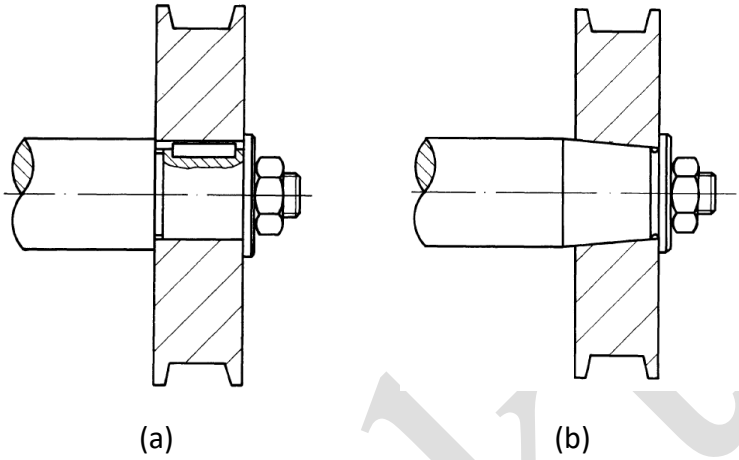


Şekil 3. Aşındırıcı ortamları uzak tutmak için sızdırmazlık halkaları kullanılmalıdır.



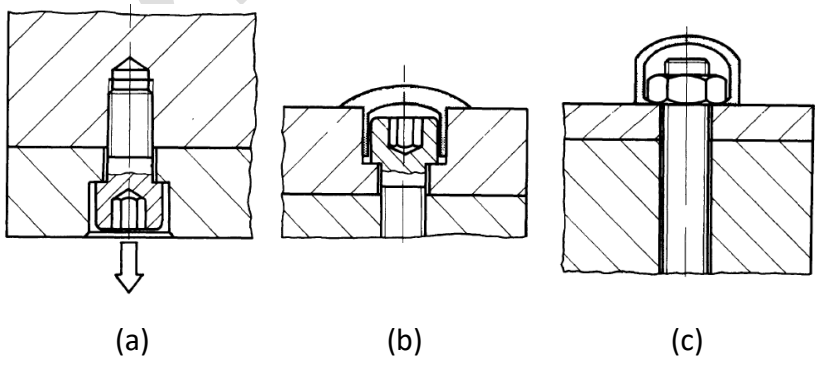
Şekil 4. Mil-göbek bağlantıları, gerilmeyi eşit dağıtacak şekilde tasarlanmalıdır (b, c).

Mil ve göbek birleşimlerinde, bağıl hareketlerin önlenmesi ve buna bağlı erozyon korozyonunun engellenmesi için sıkıştırma basıncı yeterli düzeyde olmalıdır. Bu basınç, konik sıkıştırmalı birleşimler (Şekil 5b), kaynak, lehim veya yapıştırma gibi çeşitli yöntemlerle sağlanabilir. Bu tür tasarımlar, yapı elemanlarının güvenilirliğini artırır ve olası korozyon risklerini ortadan kaldırır.



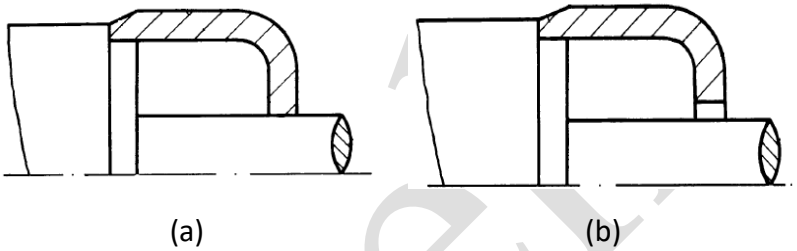
Şekil 5. Temas basıncı, hareketleri ve dolayısıyla korozyonu önleyecek kadar büyük olmalıdır.

Vida ve somun gibi bağlantı elemanlarının düzenlenmesi, kir ve sıvıların birikmesini önleyecek şekilde yapılmalıdır (Şekil 6). Özellikle birleşim boşluklarının alt kısımlarda konumlandırılması, kendi kendini temizleyen sistemler oluşturur. Ayrıca, plastik kapaklar ve sızdırmazlık malzemeleri kullanılarak, korozyon riski taşıyan alanlar daha etkin bir şekilde korunabilir.



Şekil 6. Bağlantı elemanları, kendini temizleyecek veya drenajını sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır.

Birden fazla sıkı geçme birleşimi kullanımı (Şekil 7a), farklı malzemelerin farklı termal genleşmeleri nedeniyle oluşabilecek gerilmeli çatlak ilerlemesini artırabilir. Aynı zamanda bağıl hareketler nedeniyle erozyon korozyonu da meydana gelebilir. Bu tür durumların önüne geçmek için sıkı geçme tasarımlarında sadelik ve işlevsellik esas alınmalıdır (Şekil 7b).

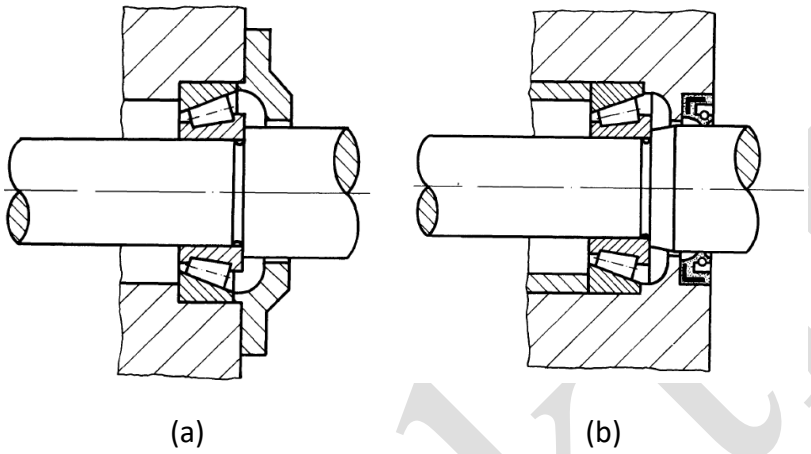


Şekil 7. Çoklu sıkı geçme bağlantılarından (a) kaçınılmalıdır.

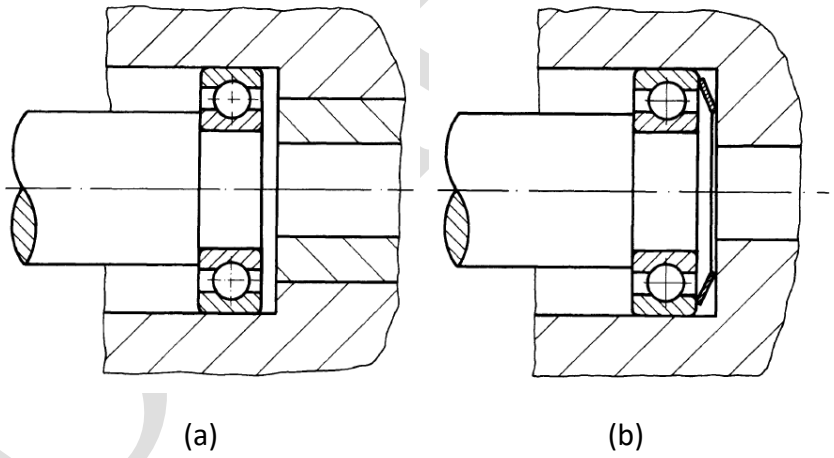
Rulman yuvalarında, düşük bağıl hareket nedeniyle oluşabilecek erozyon korozyonu, yüzeylerin kaplanması (örneğin krom kaplama) ve yağlama ile önlenebilir. Yağlama işleminin etkili olabilmesi için uygun kanal geometrisinin tasarlanması ve bu kanalların düzenli olarak kontrol edilmesi gereklidir.

Rulmanlar, koruyucu contalar yardımıyla korozif ortamların zararlı etkilerinden korunmalıdır (Şekil 8). Örneğin, soğutma sıvılarının rulmanlara girmesi, uygun sızdırmazlık tasarımlarıyla önlenebilir. Bu tür koruma önlemleri, rulmanların işlevselliğini ve ömrünü artırır.

Küçük motorlarda kullanılan rulmanların, bağıl hareketlerin önlenmesi ve sürtünme korozyonunun azaltılması için yay ile desteklenmesi önemlidir (Şekil 9). Bu tür destekleyici yapılar, bileşenlerin daha uzun süre dayanmasını sağlar ve mekanik performanslarını artırır.



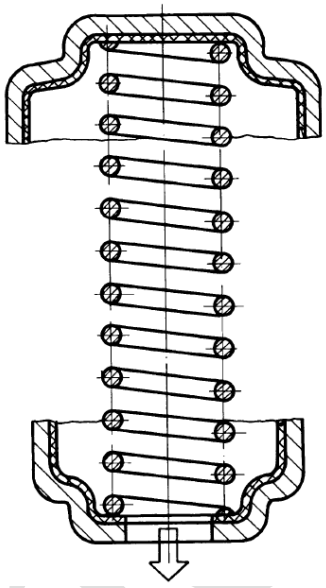
Şekil 8. Rulmanlar, contalar (b) yardımıyla korunmalıdır.



Şekil 9. Rulmanlarda sürtünme korozyonunun azaltılması için yay ile desteklenmesi (b) önemlidir.

Helisel yayların montaj alanında kör noktaların bulunmaması, ayrıca benzer malzemeler arasındaki doğrudan temasın önlenmesi gereklidir (Şekil 10). Yay ve montaj alanı arasındaki mesafenin artırılması, aralık korozyonunun

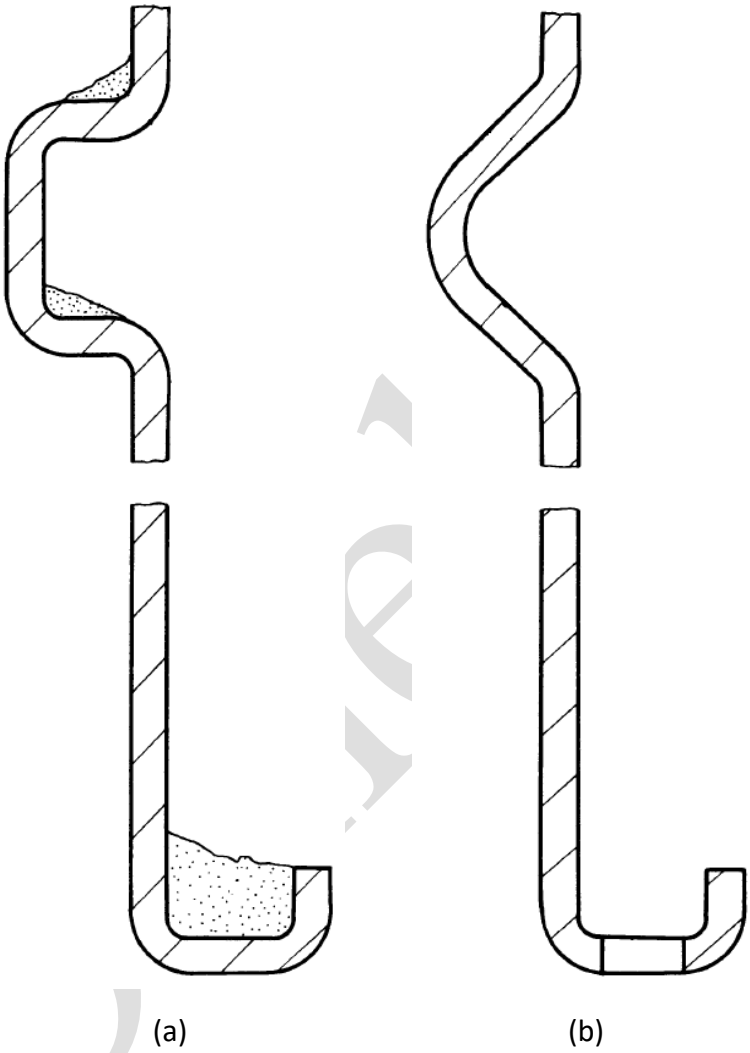
önlenmesine yardımcı olur. Ayrıca, koruyucu kaplamalar kullanılarak temas korozyonu riski azaltılabilir.



Şekil 10. Montajda kör noktaları ve yay ile kılavuz arasında doğrudan temas engellenmelidir.

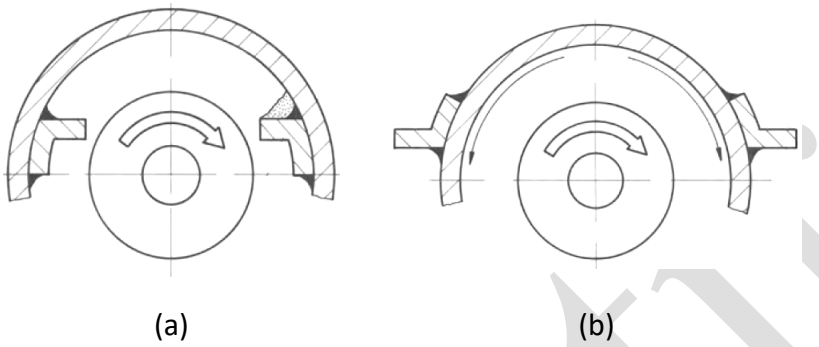
Soğuk şekillendirilmiş levha parçaları tasarlanırken, minimum deformasyon sağlanmalı ve yüksek gerilme alanlarından kaçınılmalıdır. Gerilmeli çatlak ilerlemesinin oluşumunu engellemek için gerilme giderici işlemler uygulanabilir. İç gerilmeler, gerilim giderme tavı veya bilyeli dövme yoluyla azaltılabilir. Bu işlemler, levha parçalarının dayanıklılığını ve uzun vadeli performansını artırır.

Levha kenarlarında yatay yüzeylerden kaçınılmalı ve drenaj açıklıkları oluşturulmalıdır (Şekil 11). Ayrıca, levha kenarlarının plastik dolgularla kaplanması, birikinti korozyonunun önlenmesine yardımcı olur. Bu yaklaşım, özellikle dış ortam koşullarına maruz kalan yapılarda etkili bir koruma sağlar.



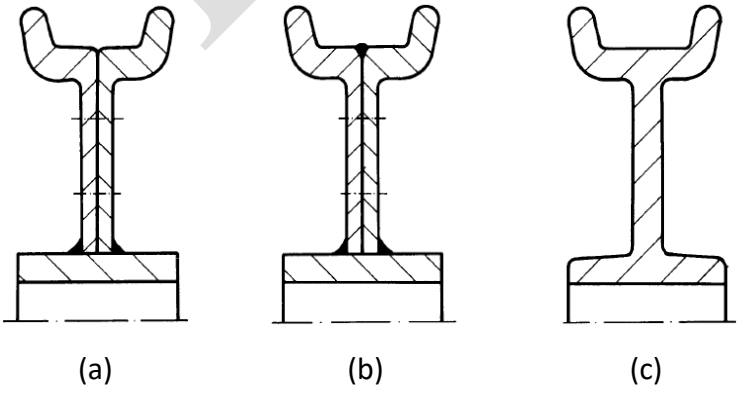
Şekil 11. Birikintilerin altında korozyon oluşmasını önlemek için drenaj sağlanmalıdır (b).

Birikinti sıçraması riski olan alanlarda koruyucu plakalar kullanılarak kir birikimi engellenmelidir (Şekil 12). Bağlantı elemanlarının sıçrama alanının dışında yerleştirilmesi hem korozyon hem de mekanik hasar riskini azaltır. Bu tür tasarımlar, özellikle dış mekân uygulamalarında faydalıdır.



Şekil 12. Sıçrama plakaları korozyonu önleyecek şekilde tasarlanmalıdır (b).

Kayış kasnakları tek parça olarak üretilmeli veya birleşim noktaları sızdırmazlıkla korunmalıdır (Şekil 13). Bu tasarım, sürtünme korozyonunun ve korozif ortamlarda çatlak korozyonunun önlenmesinde etkili bir çözüm sunar. Jant ve tekerlek bileşenleri de mümkünse tek parça olarak üretilmeli veya kaynakla birleştirilmelidir. Farklı malzemeler arasındaki doğrudan temasın önlenmesi, erozyon ve temas korozyonunu etkili bir şekilde azaltır. Bu yaklaşım, mekanik titreşimlerin zararlarını da minimize eder.



Şekil 13. Çatlak korozyonunu önlemek için kasnaklar tek parça halinde yapılmalıdır.

Korozyona maruz kalan döküm parçaları, son işlem gerektirmeyecek şekilde tasarlanmalıdır. Besleme çıkışlarının mekanik olarak az yüklü bölgelerde ve kalın duvarların yakınında konumlandırılması, döküm yüzeylerinin korunmasını sağlar ve yüzey korozyonu riskini azaltır.

4. SONUÇ

Korozif ortamlar için makine elemanlarının tasarımı, makinelerin ömrünü uzatmak ve bakım maliyetlerini azaltmak için kritik bir öneme sahiptir. Korozyon, sanayinin farklı alanlarında büyüyen bir sorun olup, erken tespiti ve doğru tasarım stratejilerinin uygulanması, sistemlerin ömrünü uzatarak maliyetleri düşürmektedir. Bu çalışmada, malzeme seçimi, yüzey işlemleri ve kaplamaların korozyon üzerindeki etkileri incelenmiştir. Doğru malzeme seçimi, fiziksel özellikler ve maliyet etkinliği göz önünde bulundurularak yapılmalıdır. Yüzey koruma teknikleri, korozyonla mücadelede etkili olup, tasarım sürecinde yapılan analizler ve testler, doğru sonuçlara ulaşmayı kolaylaştırmaktadır.

Korozyon direncine sahip malzemeler ve yüzey kaplama teknikleri, makine elemanlarının dayanıklılığını artırarak uzun ömürlü makineler üretmeye yardımcı olmaktadır. Tasarım sürecinde çevresel etmenler de dikkate alınmalı, mühendislik çözümleri geniş bir yelpazede uygulanmalıdır. Korozyonla mücadele, sadece dayanıklılığı artırmakla kalmaz, bakım sürelerini azaltarak makinelerin verimliliğini yükseltir.

Gelecekte, yeni malzeme araştırmaları ve daha dayanıklı kaplama teknikleri ile makineler daha verimli ve dayanıklı hale gelecektir. Sonuç olarak, korozif ortamlar için tasarım prensipleri, makinelerin ömrünü uzatırken, verimliliği artırarak ekonomik fayda sağlar.

5. KAYNAKÇA

Bender, B., & Gericke, K. (2021). Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. Berlin: Springer-Verlag.

Bender, B., & Göhlich, D. (2021). Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau (26. Aufl.).

Bode, E. (1996). Konstruktionsatlas (6. Aufl.). Braunschweig: Springer.

Decker. (2018). Decker Maschinenelemente - Formeln. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.

Haberhauer, H. (2018). Maschinenelemente. Gestaltung, Berechnung, Anwendung (18., überarbeitete Aufl.). Berlin: Springer Vieweg.

Künne, B., Köhler, G., & Rögnitz, H. (Hrsg.). (2007). Köhler/Rögnitz Maschinenteile 1. Mit Tabellen und Diagrammen sowie zahlreichen Beispielrechnungen (10., überarbeitete und aktualisierte Aufl.). Wiesbaden: B.G. Teubner Verlag/GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden.

Niemann, G., Höhn, B.-R., & Winter, H. (2005). Maschinenelemente. Band 1: Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen (4., bearbeitete Aufl.). Berlin: Springer-Verlag.

Rieg, F., & Steinhilper, R. (2012). Handbuch Konstruktion. Berlin: Springer.

Sauer, B. (Hrsg.). (2016). Konstruktionselemente des Maschinenbaus 1. Grundlagen der Berechnung und Gestaltung von Maschinenelementen (9. Aufl.). Berlin: Springer Vieweg.

Örnektir

Schlecht, B. (2015). Maschinenelemente 1. Festigkeit, Wellen, Verbindungen, Federn, Kupplungen (2., aktualisierte Aufl.). Hallbergmoos: Pearson.

Wittel, H., Jannasch, D., Voßiek, J., & Spura, C. (2017). Roloff/Matek Maschinenelemente (23., überarbeitete und erweiterte Aufl.). Wiesbaden: Springer Vieweg.

Örnektir

FONKSİYONEL DERECELİ EKLEMELİ İMALAT (FGAM) TEKNOLOJİLERİNİN GELİŞİMİ VE MÜHENDİSLİK UYGULAMALARI

Tuğçe TEZEL[1]

Volkan KOVAN[2]

1. GİRİŞ

Fonksiyonel dereceli malzemeler (FGM), doğada yaygın olarak bulunan ve biyolojik sistemlerde belirgin bir şekilde gözlemlenen bir kavramdır. Bu malzemeler, biyolojik yapıları taklit ederek mühendislik alanında önemli yenilikler sunmaktadır. Özellikle doğal dişlerde, biyolojik kompozit bir yapı olarak kabul edilen diş yapısı, kırılgan dış mine ile dayanıklı iç dentin ve canlı pulpa arasındaki kombinasyonu ile benzersiz bir hiyerarşik özellik gösterir. Bu yapı, sertlik, elastikiyet ve dayanıklılık gibi mekanik özellikleri optimum şekilde harmanlayarak doğada işlevsel bir tasarım örneği oluşturur. Bu biyolojik tasarımın mühendislik uygulamaları için model alınması, fonksiyonel dereceli malzemelerin geliştirilmesinin temel motivasyonlarından biridir.

Fonksiyonel dereceli malzemeler, mühendislikte malzeme özelliklerini optimize etmek ve belirli gereksinimlere uyum sağlamak amacıyla geliştirilmiş malzemelerdir. Bu

1 Doç. Dr., Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, tugcetezel@akdeniz.edu.tr, ORCID: 0000-0003-0139-442X.

2 Prof. Dr., Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, kovan@akdeniz.edu.tr, ORCID: 0000-0002-0599-525X.

Örnektir

malzemeler, malzeme arayüzlerinde kesintisiz bir gradyan oluşturarak geleneksel malzemelerde karşılaşılan sınır problemlerini ortadan kaldırır ve mekanik özelliklerin daha verimli bir şekilde dağılımını sağlar. Özellikle yüksek performans gerektiren mühendislik uygulamaları için, fonksiyonel dereceli malzemeler, malzeme türleri ve tasarımları açısından farklı kategorilere ayrılabilir ve çeşitli üretim yöntemleriyle elde edilebilir. Bu üretim süreçleri, fiziksel ve mekanik özelliklerin istenilen şekilde optimize edilmesine olanak tanır ve malzeme türlerinin kademeli olarak değişmesini sağlar.

FGM'nin mühendislikteki en büyük avantajlarından biri, malzemenin dayanıklılığını artırarak, geleneksel malzemelere kıyasla daha üstün mekanik özellikler sunmasıdır. Özellikle yüksek gerilim altında çalışan ve çevresel etkilere maruz kalan mühendislik yapıları için bu özellik büyük bir önem taşır. Fonksiyonel dereceli malzemeler, diş protezleri gibi biyomedikal uygulamalarda da önemli bir kullanım alanı bulmuştur. Diş seramiklerinde, FGM kullanılarak, yorulma direncini artırmak ve gerilim yoğunluklarını azaltmak amacıyla gradyan yapılar geliştirilmiştir. Bu sayede, diş seramiği ve altyapısındaki gerilimler azaltılarak, protezlerin dayanıklılığı ve ömrü artırılmıştır.

Fonksiyonel dereceli malzemelerin üretiminde, malzeme özellikleri konuma bağlı olarak kademeli bir şekilde değişir. Bu gradyanlar, malzemenin kimyasal bileşimi, mikro yapısı veya atomik düzeni gibi faktörlerden kaynaklanır. Gradyanın tanımlanmasında kullanılan geçiş fonksiyonu, bileşenlerin konsantrasyonunun konumla olan ilişkisini açıklar. FGM'lerin üretimi, mekansal olarak heterojen yapının (gradyan yapısının) oluşturulması ve bu yapının yoğun bir malzemeye dönüştürülmesi aşamalarından oluşur. Üretim süreçleri, temel, homojenleştirici ve ayrıştırıcı işlemler olarak sınıflandırılabilir.

Temel işlemleri, öncül malzemeler veya tozlardan adım adım dereceli yapının inşa edilmesine dayanırken, homojenleştirici işlemler iki malzeme arasındaki keskin arayüzü bir gradyana dönüştürür. Ayrıştırıcı işlemler ise makroskopik olarak homojen bir malzeme ile başlayıp dış bir alan etkisiyle malzeme taşınımı ile dereceli malzemeye dönüştürülür. FGM'lerin üretiminde dikkat edilmesi gereken bir diğer önemli husus, konsolidasyon süreçleridir. Bu aşamada, gradyanın bozulmaması için uygun işleme koşulları seçilmelidir. Ayrıca, sinterleme sırasında malzemenin düzensiz büzülmesi gibi faktörler de göz önünde bulundurulmalıdır. Sinterleme davranışı, malzemenin porozitesi, parçacık boyutu ve şekli gibi faktörlerden etkilenir.

Fonksiyonel dereceli malzemeler, biyomedikal alanlarda özellikle protezler ve implantlar gibi uygulamalarda geniş bir potansiyel sunmaktadır. FGM'ler, kemik dokusu ile uyumlu protezlerin tasarımında önemli rol oynamaktadır. Bu malzemeler, implantların çevresindeki gerilim faktörlerini yönetmek, biyouyumluluğu artırmak ve protezlerin mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanılabilir. Bu malzemeler, protezlerin yapısal performansını artırmak için farklı gradyan tiplerine sahip kompozit malzemeler olarak tasarlanabilir.

FGM'nin mühendislikteki en önemli avantajlarından biri, yapıların kademeli olarak özelleştirilebilmesidir. FGM yapıları, sürekli, kesikli veya sandviç yapı olarak tasarlanabilir ve her bir yapı türü, istenilen mekanik, termal ve tribolojik özellikleri optimize etmek için farklı avantajlar sunar. Bu yapılar, güç, sertlik ve termal iletkenlik gibi özellikleri hedefleyen uygulamalar için özelleştirilebilir. Ayrıca, bu yapıların davranışları üzerine yapılan teorik çalışmalar, FGM'lerin statik ve dinamik özelliklerini analiz etmek için çeşitli sayısal yaklaşımlar ve hesaplamalı modellerin kullanılmasına olanak tanımaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi, FGM'lerin mekanik davranışını modellemek için yaygın olarak kullanılan bir sayısal

tekniktir ve bu yöntem, karmaşık mühendislik problemlerini verimli bir şekilde çözebilir.

Sonuç olarak, fonksiyonel dereceli malzemeler, mühendislikteki potansiyel uygulamaları nedeniyle önemli bir araştırma konusu olmaya devam etmektedir. Bu malzemeler, biyolojik sistemlerin tasarım ilkelerini mühendislik alanına uyarlayarak, daha dayanıklı, verimli ve uzun ömürlü yapılar üretmeye olanak tanımaktadır. FGM'nin gelecekteki mühendislik uygulamalarında önemli bir rol oynaması beklenmektedir. Bu nedenle bu çalışmada FGM malzemelere ve özellikle gelişmekte olan üretim tekniklerinden eklemeli imalatla üretimine yer verilmiştir (Gali vd. 2024; Kieback vd. 2023; Najibi ve Mokhtari 2023).

2. FGM ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Fonksiyonel dereceli malzeme üretim teknikleri genel olarak üç ana kategoriye ayrılabilir: gaz, sıvı ve katı faz işlemleri. Gaz fazında gerçekleştirilen üretim yöntemleri arasında Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) ve Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) ön plandadır. Sıvı faz yöntemleri, santrifüj döküm ve seri döküm gibi süreçleri içerirken, katı fazda toz metalurjisi gibi teknikler kullanılmaktadır. Ayrıca, eklemeli imalat (AM) teknikleri de sıvı ve katı fazlarda uygulanabilir ve bu süreçler Fonksiyonel Dereceli Eklemeli İmalat (FGAM) olarak adlandırılmaktadır.

Fonksiyonel dereceli malzeme üretimi, ince film ve hacimsel ürün türlerine bağlı olarak farklı yöntemlerle gerçekleştirilebilmektedir. İnce-film FGM'ler, hacimsel malzemelere kıyasla daha spesifik yüzey özellikleri gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. FGM kaplamalarının üretimi için yaygın olarak kullanılan başlıca yöntemler arasında “Fiziksel Buhar Biriktirme” ve “Kimyasal Buhar Biriktirme”

süreçleri bulunmaktadır. Bu yöntemler, özellikle malzemenin aşırı zorlu çalışma koşullarına maruz kaldığı uygulamalarda hacimsel FGM'lere olan ihtiyacı karşılamak için uygundur (Godec vd. 2022).

PVD teknolojisi, fonksiyonel dereceli malzeme üretiminde önemli bir yöntem olarak kullanılmaktadır. PVD, vakum ortamında bir malzemenin buharlaştırılarak ince bir film şeklinde bir alt tabakaya depo edilmesi sürecini ifade eder. Bu teknoloji, özellikle FGM'lerin üretimi için tercih edilir çünkü PVD, malzeme yüzeyinin özelliklerini yüksek hassasiyetle kontrol edebilme yeteneği sunar. FGM üretiminde, PVD ile oluşturulan ince film, malzemenin bileşimi ve mikro yapısı üzerinde değişiklikler yaparak, fonksiyonel özelliklerin istenen şekilde gradyanlar oluşturulmasına olanak tanır. Bu süreç, genellikle yüksek erime noktasına sahip malzemeler için uygundur ve sputtering, buharlaşma veya plazma püskürtme gibi fiziksel yöntemlerle gerçekleştirilir. Yüzeyde biriken ince film kalınlığı, nanometrelerden mikrometre seviyelerine kadar değişebilir, bu da FGM'lerin çok çeşitli uygulama gereksinimlerini karşılamalarını sağlar. Ayrıca, FGM'lerin üretimi sırasında malzemenin fonksiyonel özelliklerinin zaman içinde gradyanlar şeklinde değişmesi gerektiğinden, PVD'nin bu tür materyalleri tasarlamak için ideal bir yöntem olduğu söylenebilir (Godec vd. 2022; Yadav vd. 2024; Saad vd. 2024).

CVD, gaz halindeki bir öncülün ısıtılmış bir substrat üzerinde reaksiyona girerek katı bir kaplama oluşturduğu kimyasal-termal bir süreçtir. Fonksiyonel dereceli malzemelerin üretimi için CVD, özellikle malzemenin bileşimini uzaysal olarak değiştirmeye olanak tanır. CVD sürecinde, gaz karışımlarının oranı, basınç ve taşınım yasaları gibi parametreler ile kimyasal bileşim gradyanları oluşturulur, bu da FGM'lerin temel özelliğidir. Ancak, CVD'nin enerji tüketimi ve zararlı gaz üretimi gibi çevresel olumsuzlukları, bu yöntemlerin daha

verimli ve çevre dostu alternatiflerle geliştirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. CVD, farklı enerji platformlarında (termal, plazma veya foton enerjisi) uygulanabilir ve bu süreçte çeşitli kimyasal reaksiyonlar meydana gelir. CVD yöntemi, özellikle yarı iletkenler, optik uygulamalar ve aşınma/korozyon direnci sağlayan kaplamalar için kullanılır. FGM üretiminde CVD'nin avantajı, malzeme yüzeylerinde istenen fonksiyonel gradyanları oluşturabilmesidir. Ancak, toz üretimi gibi yan ürünler, kaplama sürecinde istenmeyen sonuçlar doğurabilir. Bu nedenle, CVD yönteminin çevresel etkilerinin minimize edilmesi için daha verimli ve sürdürülebilir alternatiflerin araştırılması gerekmektedir (Godec vd. 2022; Derakhshandeh vd. 2023).

FGM imalatında santrifüj döküm, sıvı metalin dönen bir kalıba dökülmesiyle yapılan bir üretim yöntemidir. Bu süreçte, erimiş malzemeye takviye malzemesi eklenerek ikinci, homojen bir faz oluşturulur. Santrifüj kuvveti, erimiş malzemenin kalıba çekilmesine ve askıda bulunan katı toz malzeme içinde bir ayrılma sağlanmasına yardımcı olur. Bu yöntem, erimiş metal ile takviye malzemesi arasındaki yoğunluk farkı, parçacık boyutu ve dağılımı gibi parametrelerle, FGM'nin gradyan dağılımının kontrol edilmesini sağlar. Ancak, bu yaklaşım, yalnızca doğal bir ayrışma süreciyle gradyanların oluşturulabilmesi nedeniyle bazı sınırlamalara sahiptir. Yine de, santrifüj döküm, sınırlı seviyelerde olsa da, gradyan yapılarıyla sürekli FGM üretmeye olanak tanır.

FGM imalatında sürekli döküm ise, sıvı karışımın hareketli bir bant üzerine yayılması ve belirli kalınlıklarda şekillendirilmesi sürecini içerir. Bu yöntemde, seramikten ince levhalar, birkaç mikrometreden milimetreye kadar değişen kalınlıklarda dökülür. Karışım, askıya alınmış seramik parçacıkları ve bağlayıcılar içeren organik sıvılardan oluşur. Bu bantlar, farklı bileşimlerden yapılmış katmanlar olarak üst üste konduğunda, FGM'nin basamaksal gradyanları oluşturulur.

Sürekli döküm, genellikle daha ince ve homojen gradyanlar oluşturmak için kullanılır ve düşük maliyetli, sürekli üretim imkânı sunar.

Toz metalurjisi, katı fazda FGM üretimi için kullanılan geleneksel bir yöntemdir. Bu süreç, toz malzemenin belirli bir dağılım fonksiyonuna göre yığılması ve ardından sinterleme veya diğer sıcak konsolidasyon süreçleriyle şekillendirilmesini içerir. Bu yöntemle üretilen FGMlerde, tozların belirli bir düzenle yerleştirilmesi sayesinde homojen bir yapı elde edilir. Ancak, bu üretim sırasında, elde edilen numunelerdeki boşluklar, malzemenin ısı iletkenliği ve mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilir. Ayrıca, toz metalurjisi yönteminin, özellikle korozyon ve aşınma direnci gibi performans özelliklerini de olumsuz etkileyebilecek boşluklar oluşturma potansiyeli vardır.

Santrifüj döküm, sürekli döküm ve toz metalurjisi gibi farklı yöntemler, FGM üretimi için çeşitli avantajlar ve sınırlamalar sunmaktadır. Santrifüj döküm, özellikle büyük parça üretiminde avantaj sağlarken, sürekli döküm daha ince ve homojen gradyanlar üretmek için tercih edilir. Toz metalurjisi ise, katı fazda daha yüksek saflıkta ve kontrollü mikro yapılar elde etmek için kullanılır, ancak boşluklar gibi olumsuzluklar da üretim sırasında dikkate alınmalıdır. Bu yöntemler, farklı uygulama gereksinimlerine göre seçilerek FGM'lerin üretiminde etkin bir şekilde kullanılabilir (Godec vd. 2022; Derakhshandeh vd. 2023).

Son yıllarda özellikle malzeme tasarımında sunduğu avantajlarla eklemeli imalatla FGM üretimi ön plana çıkmaktadır.

3. FONKSİYONEL DERECELİ EKLEMELİ İMALAT (FGAM)

Fonksiyonel Dereceli Eklemeli İmalat (Functional Graded Additive Manufacturing, FGAM), bir bileşen içinde malzeme organizasyonunun kademeli olarak değiştirildiği ve bu sayede belirli bir işlevin elde edildiği yenilikçi bir üretim yöntemidir. Geleneksel üretim teknikleriyle mümkün olmayan karmaşık ve özelleştirilmiş serbest şekilli mühendislik yapılarının üretimine olanak tanıyan FGAM, malzemelerin yoğunluğu, yönü ve bileşimini hassas bir şekilde kontrol ederek belirli uygulamalara yönelik hedeflenen özellikleri sağlar. Bu yöntem, tasarım esnekliğinin artırılması, maliyet ve üretim hızında avantajlar sunması, tek adımlı üretim süreçlerinin erişilebilirliği, düşük risk ve sürdürülebilirlik gibi faydalarla dikkat çeker. Özellikle stratejik konumlar veya küçük alanlar için özelleştirilebilir parça üretiminde etkili bir çözüm sunar.

FGAM üretim süreci, bir dizi aşamadan oluşur. İlk aşamada, tasarım ve modelleme gerçekleştirilir. Ürün geometrisi ve malzeme bileşimi, Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) araçlarıyla optimize edilir ve parçanın mekanik işlevine uygun olarak gerekli modelleme şemaları oluşturulur. Malzeme seçimi ve mikro yapı analizi, dijital simülasyonlar aracılığıyla optimize edilerek en uygun üretim stratejileri belirlenir. Üretim aşamasında, CAD dosyalarının makineye aktarılması ve gerekli üretim parametrelerinin ayarlanmasıyla süreç başlatılır. Üretim sırasında, G-code gibi programlama yöntemleri kullanılarak yüksek hassasiyet sağlanır.

Baskı sonrası işlemler, ürünün yüzey kalitesi, geometrik doğruluğu ve mekanik dayanıklılığını artırmaya odaklanır. Bu aşamada, kimyasal işleme, el ile düzeltme ve lazer mikro makine gibi yöntemler kullanılarak son düzenlemeler yapılır. Nihai ürün ise kalite kontrol süreçlerinden geçirilir ve tahribatsız

testler, gerilme analizi veya mikroskobik görüntüleme ile doğrulanır.

FGAM'nin tasarım aşaması, doğru ve yüksek kaliteli parçaların üretilmesi için kritik öneme sahiptir. CAD yazılımlarının çok malzemeli yapıların özelliklerini modelleyip simüle edebilmesi gerekir. Geleneksel STL dosya formatı bu tür verileri taşımakta yetersiz kaldığından, AMF, FAV ve 3MF gibi gelişmiş dosya formatları kullanılarak malzeme özellikleri, gözenekli yapılar ve diğer detaylar saklanabilir.

FGAM için kullanılan eklemeli imalat teknolojileri arasında malzeme ekstrüzyonu, fotopolimerizasyon, toz yatak füzyonu, malzeme püskürtme, levha laminasyonu ve yönlendirilmiş enerji biriktirme yöntemleri yer alır. Bu teknolojilerin her biri, FGAM'nin karmaşık ve özelleştirilmiş parça üretimindeki gereksinimlerini karşılamak üzere tasarlanmıştır. FGAM, mühendislik alanında tasarım esnekliği ve işlevsellik açısından yeni standartlar oluşturarak sürdürülebilir ve verimli bir üretim yaklaşımı sunar (Godec vd. 2022).

Bu yaklaşım kapsamında literatürde yapılan çalışmalar, kullanılan üretim teknikleri dikkate alınarak aşağıda derlenmiştir. Alkunte ve arkadaşları (2023) çalışmalarında, PLA ve TPU karışımından üretilen FGAM parçalarının yorulma davranışını incelemiştir. Tabaka yüksekliği, ekstrüzyon oranı, yatak sıcaklığı ve ekstrüzyon sıcaklığı gibi parametrelerin etkileri varyans analiziyle değerlendirilmiş, en uygun parametre kombinasyonu olarak 1,5 mm tabaka yüksekliği, %1,2 ekstrüzyon oranı ve 70°C yatak sıcaklığı belirlenmiştir. Sonuçlar, FGAM yapılarının her ortamda yüksek performans gösterdiğini ve bu alandaki yeni bir yorulma analizi sunduğunu ortaya koymuştur. Guo ve arkadaşları (2021) tarafından fonksiyonel dereceli malzemelerin daha homojen üretimi için bir eklemeli imalat platformu geliştirilmiştir. Çalışma, FGM'lerin

biyouyumluluk ve mekanik özelliklerini iyileştirmeyi amaçlamıştır. Viskoz yapılı filamentlerle düzgün geçişler sağlanmış ve sıvıların reolojik özellikleri incelenmiştir. Sonuç olarak, doğru parametrelerle düzgün gradasyonlu nesneler başarıyla üretilmiştir.

Sargent ve arkadaşları (2024) tarafından düşük Mn içeren çeliklerde TRIP ve TWIP etkileri keşfedilmiştir. Mikrosegregasyon, dengesiz katılaşma ile faz stabilitesini ve kusur enerjisini etkilemiştir. Yeni FGAM çelik, yüksek çekme dayanımı ve uzama değerleriyle üstün mekanik özellikler sergilemiş, ısıl işlem gerektirmeden TRIP ve TWIP etkilerinin eklemeli imalatla sağlanabileceği gösterilmiştir. Mehrabi vd. (2024) tarafından SS316L, Inconel 625 ve SS316L-IN625 fonksiyonel dereceli malzemeler, doğrudan lazer metal biriktirme yöntemiyle üretilmiş ve malzeme analizleri yapılmıştır. Mikrosegregasyon sonucu, dendritik sınırda Nb ve Mo birikimi gözlemlenmiş, SS316L-IN625 numunelerinin mikrosertlik değerleri 218–278 HV arasında değişmiştir. Sonuçlar, homojen malzeme geçişlerinin sağlandığını ve başarılı FGM üretimi yapıldığını göstermektedir. Valizadeh ve Weeger (2024) tarafından gradyanlı maskeleme (MSLA) yöntemiyle tek malzemeden dereceli yapılar üretilmiştir. UV ışık yoğunluğu ve pozlama süresiyle oluşturulan gradyan pozlama parametresi, mekanik özellikleri iyileştirmek için parametrik visko-hiperelastik modelle analiz edilmiştir. Sonuçlar, tasarım ve baskı süresini kısaltmada etkili olduğunu göstermektedir.

Abdelmageed vd. (2024) çalışmada, fonksiyonel dereceli yüzey merkezli kübik yapılar (FCC) tasarlanmış ve eksenel kalınlık gradasyonu ile enerji emme kapasitesinde %39 artış sağlanmıştır. Yapılar, deneysel ve simülasyon verileriyle karşılaştırılmış, bulgular ileri koruma sistemleri tasarımında kullanılmıştır. Sadeghzade vd. (2023) tarafından enerji emme uygulamaları için eklemeli imalatla üretilen yenilikçi kafes

yapıları geliştirilmiştir. Polilaktik asit (PLA) ve poliamid gibi malzemelerle üretilen fonksiyonel dereceli katmanlar, köpük enjeksiyonu ile test edilmiştir. PLA bazlı yapıların enerji emme kapasitesinde %492 artış sağlanmış, yapının mekanik özellikleri birimler arası mimari düzen ile iyileştirilmiştir. Cortis vd. (2023) çalışmada, scalmalloy parçalarının yüzey özelliklerinin mekanik performans üzerindeki etkileri incelenmiştir. CNC işleme ile elde edilen yüzeylerin, yazıcı ile üretilen yüzeylere göre üç kat daha yüksek yorulma dayanımına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bilgisayar Destekli Mühendislik süreci, performans optimizasyonu ve son işlem maliyetlerini azaltma amacıyla kullanılmıştır. Bu yaklaşım, fonksiyonel dereceli malzemelerle tasarım ve üretim entegrasyonuna dair önemli bilgiler sunmaktadır.

Temiz vd. (2024) çalışmada, üçlü periyodik minimal yüzey (TPMS) yapılarının yoğunluk gradyanına bağlı sıkıştırma davranışları araştırılmıştır. Farklı TPMS geometrilerinin hacim fraksiyonları %20 ile %60 arasında değiştirilerek üretilmiştir. Analizler, TPMS tipinin ve hacim fraksiyonunun enerji emme kapasitesini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Çalışma, TPMS yapıların enerji emme tasarımlarında etkili bir seçenek sunduğunu ortaya koymaktadır. Mao vd. (2022) tarafından, 316L/CuCrZr FGM'nin ara yüzey özellikleri ve mekanik davranışları incelenmiştir. Lazer gücü ve tarama aralığının artırılması, tarama hızının ise azaltılmasıyla çatlak oluşumu engellenmiştir. 316L/CuCrZr FGM'nin çekme dayanımı, dikey entegrasyonda 318,2 MPa, yatay entegrasyonda ise 519,8 MPa olarak ölçülmüştür. Bu bulgular, çelik-bakır FGM üretimi için rehber bilgi sağlamaktadır. Zhang vd. (2022) tarafından MSS ile ASS arasında %25 bileşim geçişiyle MSS/ASS FGM üretilmiştir. Vickers sertliği 358 HV'den 170 HV'ye kadar değişirken, çekme testleri 669 MPa dayanım ve %19 uzama göstermiştir. Modelleme ve deneysel sonuçlar, austenit içinde α-

ferrit oluşumunun sünekliği azalttığını ortaya koymuştur. Zhang vd. (2022) tarafından BCC kafes yapılarından ilham alarak topolojik gradasyonlu bir kafes tasarımı önerilmiştir. Kafes hücrelerinin pozisyonları belirli bir doğrultuda gradasyonel olarak değiştirilmiştir. Prototipler, MJF teknolojisi ile üretilmiş ve sıkıştırma testleriyle mekanik özellikleri değerlendirilmiştir. Sonuçlar, bu tasarımın sertlik ve enerji emme kapasitesini artırdığını göstermektedir. Bu çalışma, hafif yapılar için yeni tasarım fırsatları sunmaktadır. Portela vd. (2024) çalışmada, eklemeli imalatla üretilen metal tabanlı fonksiyonel dereceli petek yapıları incelenmiştir. Alüminyumdan üretilen üç farklı birim hücre (düzenli altıgen, Plateau ve lotus) yapıları ısıl işleme tabi tutulmuş ve sıkıştırma testlerine sokulmuştur. Isıl işlem, akma dayanımını ve sertliği düşürürken sünekliği artırmıştır. Lotus yapı, stres konsantrasyonlarını azaltarak en iyi mekanik özellikleri göstermiştir.

Ochoa vd. (2024) çalışmada, segmentli gradyanlı kirişlerin eğilmesini özelleştiren yeni bir ters tasarım yöntemi sunulmuştur. Yöntem, hesaplama gereksinimlerini azaltarak, eklemeli imalatla üretilen kirişler üzerinde doğrulanmış ve hedeflenen eğilmelerle tasarlanmıştır. Fonksiyonel dereceli metamaddeler, yapısal tasarımda yeni uygulama alanları sunmaktadır. Azinpour vd. (2023) FGM'lerde çatlak gelişimi ve sünek kırılma için faz alanı yaklaşımı kullanılarak elastoplastik ve kırılma özelliklerinin uzaysal değişimi modellenmiştir. Yapılan karışık modlu çatlak analizleri, malzeme gradyanlarının çatlak başlatma ve yayılma üzerindeki etkilerini açıklamaktadır. Model doğruluğu, mini çekme testleriyle karşılaştırılmıştır. Li vd. (2022) tarafından Inconel 625 ve paslanmaz çelik 308L'le FGM üretimi için çift tel ark eklemeli imalat kullanılmıştır. Bileşim geçişi sırasında, IN625'in %20'lik oranına yakın bölgelerde sıcak çatlaklar gözlemlenmiştir. Çatlaklar, karbon birikimi nedeniyle oluşmuş ve işlem optimizasyonu ile çatlama

riski azaltılarak mekanik özellikler iyileştirilmiştir. Chen vd. (2024) tarafından çalışmada, lazer tabanlı yönlendirilmiş enerji birikimi (DED) ile fonksiyonel dereceli malzeme üretimi için yeni bir in-situ toz karıştırma yöntemi önerilmiştir. WC ve 316L tozları ile yapılan deneylerde, karıştırma homojenliği ve oranı incelenmiş, toz karıştırma simülasyonları yapılmıştır. Sonuçlar, bu yöntemle toz oranının çevrimiçi ayarlanabileceğini ve fonksiyonel malzeme üretiminde uygulanabilirliğini göstermektedir.

Sun vd. (2024) tarafından, rastgele dağıtılmış iki fazlı mikro yapının mekanik özelliklerinin faz oranına bağlı olduğunu ortaya koymuştur. Matematiksel bir ilişki ile yerel malzeme özellikleri hesaplanarak, küresel mekanik özellikler tahmin edilmiştir. Düşük alaşımlı çelik, bağlayıcı jet eklemeli imalatla üretilmiş ve deneysel ile simülasyon stres-gerinim yanıtları uyumlu bulunmuştur. Bu yaklaşım, yeni malzeme sistemlerinin tasarımına katkı sağlayabilir.

Choudhury vd. (2024) tarafından çalışmada, PBF sürecinde fonksiyonel dereceli toz yayılmasını geliştiren bir yöntem sunulmuştur. Her tabaka için belirlenen gradyan doğrultusunda malzeme kompozisyonunun dağılımını hedefleyen bu yöntem, toz yayılmasının parametrelerini incelemiştir. Sonuçlar, kullanılan açıların ve yayılma katman kalınlığının tozun fonksiyonel gradyanlı yayılmasını nasıl etkilediğini göstermektedir.

Garrido Silva vd. (2022) tarafından fonksiyonel dereceli hücresel yapıların eğilme özellikleri değerlendirilmiştir. Alüminyumdan yapılan üç farklı yapı, FFF yöntemiyle üretilmiş ve test edilmiştir. Sonuçlar, lotus yapısının en iyi sertlik ve enerji emme kapasitesine sahip olduğunu, gradyanlı yapının ise geleneksel yapılara göre üstün mekanik özellikler sunduğunu ortaya koymuştur.

Khan vd. (2024) tarafından IN625 ve SS316L alaşımlarından FGM üretimi için çift tel TIG ark eklemeli imalat (WAAM-TIG) yöntemi incelenmiştir. Sürekli gradyanlı ve sandviç yapılar arasındaki farklı tasarımlar çalışılmış, her iki malzeme karışım oranları ile kontrol edilmiştir. Mikro yapı ve sertlik testleri, WAAM-TIG yöntemiyle üretilen FGM'lerin geleneksel alaşımlara göre daha iyi mekanik özellikler sunduğunu göstermektedir. Shan vd. (2023) tarafından Yönlendirilmiş enerji birikimi (DED) kullanarak FGM'lerde kalıntı gerilme dağılımını tahmin etmek için çok ölçekli bir model geliştirilmiştir. Farklı kimyasal bileşimlere sahip çeliklerin mezoskalada modellenmesiyle gerilme dağılımı elde edilmiştir. Sonuçlar, tahminlerin deneysel verilerle uyumlu olduğunu ve bileşim gradyanının gerilme üzerindeki etkisini göstermektedir.

Veeman vd. (2022) tarafından gaz tungsten ark kaynağıyla üretilen FGM duvarlarının mekanik ve mikro yapısal özellikleri incelenmiştir. Sonuçlar, bu duvarların dövme alaşımlara kıyasla daha iyi özellikler gösterdiğini ortaya koymuştur. SEM analizi, sünek kopma modunu gözlerken, FGM'lerin yerel olarak gelişmiş özelliklere sahip olduğunu göstermektedir. Shojaee vd. (2024) tarafından eklemeli imalatla üretilen kabuk kafes yapıları için doğrulanan çok ölçekli bir modelleme çerçevesi sunulmuştur. Model, 3D yazdırma ile uygulanarak, hiperelastik malzeme modelinin karakterizasyonu ve simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Deneysel sıkıştırma testleriyle doğrulanan model, FGM'ler için sağlam bir temel oluşturmaktadır.

Gharehbaghi vd. (2022) tarafından çift sekizgen bipiramidin temsilci hacim elemanına dayalı yeni bir kafes yapısı geliştirilmiştir. Sertlik matrisi ve elastoplastik hasar davranışı sonlu elemanlarla doğrulanmış, yapının geleneksel kafes yapılara göre daha yüksek sertlik ve akma dayanımı gösterdiği

bulunmuştur. Ueta vd. (2023) tarafından SiC ve grafitten yapılan fonksiyonel dereceli seramikler, stereolitografiyle üretilmiştir. Kürleme derinliği ve ışık yoğunluğu arasındaki ilişki analiz edilmiş ve çatlaklı kesitlerdeki ara yüzey çöküşlerinin azaltılabileceği belirlenmiştir.

Ngwoke vd. (2024) tarafından Ti-6Al-4V için lazer metal birikimi (LMD) süreci optimizasyonu yapılmış ve aşındırma hacmi tahmin edilmiştir. PSO ve yapay sinir ağı (ANN) modelleri ile süreç parametreleri belirlenmiş, sonuçlar bu yöntemlerin maliyet etkin olduğunu göstermektedir. Tonyali vd. (2024) tarafından Ni-20Cr ve Ti elementlerinden oluşan FGM'lerin hesaplama tahminleri sunulmuştur. CALPHAD yaklaşımıyla yapılan modelleme, deneysel gözlemlerle uyumlu sonuçlar vermiş ve faz tahminlerini doğrulamıştır. Chandrasekaran ve Amirthalingam (2022) denizlerde kullanılan fonksiyonel dereceli malzemelerin korozyon direnci ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. FGM ile üretilen, X52 karbon çeliğine göre daha yüksek akma dayanımı ve nihai dayanım göstermektedir. Biyikli vd. (2023) tarafından Lazer metal birikimi (LMD) sürecinde tek iz geometrisinin tahmini için çok fiziksel bir model geliştirilmiştir. Deneysel verilerle uyumlu olan model, işlem parametrelerinin geometrik özellikler üzerindeki etkisini başarılı bir şekilde göstermektedir. Kappe vd. (2024) tarafından dinamik yükler altındaki fonksiyonel dereceli kafes yapıların tasarımı optimize edilmiştir. Kafes yapılarının enerji emme özellikleri ve hafiflik hedeflenmiş, simülasyon sonuçları yüksek doğrulukla enerji emme özelliklerini tahmin etmektedir. Wang vd. (2023) tarafından TiC/Ti6Al4V FGM'lerinin LMD sürecindeki termal-sıvı dinamik davranışları incelenmiştir. Simülasyon, ısı birikiminin sıvı havuzunun penetrasyonunu artırabileceğini ve TiC partiküllerinin heterojen nukleasyonu teşvik edebileceğini göstermektedir. Valizadeh vd. (2023) tarafından gMSLA ile yapılan fotopolimerizasyon tabanlı

eklemeli imalat yapılarının mekanik ve geometrik özellikleri incelenmiştir. Süreç parametrelerinin optimize edilmesi, deneysel ve sayısal modellerle doğrulanmıştır. Bu yöntem, yüksek doğruluk ve uygulanabilirlik sunmaktadır.

4. SONUÇ

Fonksiyonel dereceli malzemeler, biyolojik sistemlerden ilham alınarak mühendislik uygulamalarında önemli yenilikler sunmaktadır. FGM'ler, özellikle malzeme özelliklerinin optimize edilmesine ve belirli işlevlere uyum sağlanmasına olanak tanır. Bu malzemelerin avantajları, geleneksel malzemelere kıyasla üstün mekanik özellikler ve dayanıklılık sunmalarının yanı sıra, biyomedikal uygulamalarda da önemli rol oynamaktadır. FGM'lerin üretiminde kullanılan çeşitli teknikler, malzeme özelliklerinin konumla gradyan oluşturacak şekilde değişmesini sağlayarak, mühendislik yapılarının performansını artırır. Özellikle eklemeli imalat (FGAM) teknolojisi, fonksiyonel dereceli malzemelerin üretiminde esneklik, hız ve sürdürülebilirlik gibi önemli avantajlar sunmaktadır. Bu gelişmeler, mühendislik ve biyomedikal alanlarda FGM'lerin daha geniş bir uygulama alanına sahip olmasını sağlayacak, gelecekteki mühendislik tasarımlarında kritik bir rol oynayacaktır.

Önizleme

5. KAYNAKÇA

Abdelmageed, M., Cantwell, W., & Zaki, W. (2024). Energy absorption and mechanical response of graded face-centered cubic structures. *International Journal of Mechanical Sciences*, *273*, 109232.

Alkunte, S., Rajeshirke, M., Fidan, I., & Hasanov, S. (2023). Performance evaluation of fatigue behavior in extrusion-based functionally graded materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *128*(1–2), 863–875.

Azinpour, E., Rzepa, S., Melzer, D., Reis, A., Džugan, J., & Cesar de Sa, J. M. A. (2023). Phase-field ductile fracture analysis of multi-materials and functionally graded composites through numerical and experimental methods. *Theoretical and Applied Fracture Mechanic*s, *125*, 103906.

Biyikli, M., Karagoz, T., Calli, M., Muslim, T., Ozalp, A. A., & Bayram, A. (2023). Single track geometry prediction of laser metal deposited 316L-Si via multi-physics modelling and regression analysis with experimental validation. *Journal of Materials Processing Technology*, *29*(3), 807–820.

Chen, J.-P., Xie, S.-C., & Huang, H. (2024). In-situ powder mixing for laser-based directed energy deposition of functionally graded materials. *Materials Research*, *12*(1), 150–166.

Chandrasekaran, S., Hari, S., & Amirthalingam, M. (2022). Functionally graded materials for marine risers by additive manufacturing for high-temperature applications: Experimental investigations. *Structures*, *35*, 931–938.

Choudhury, S. S., Annabattula, R. K., & Amirthalingam, M. (2024). A methodology for the development of functionally graded powder spreading in laser powder bed fusion process using discrete element method. *Journal of Manufacturing Science and Technology*, *68* (9), 2259–2269.

Cortis, D., Campana, F., Orlandi, D., & Sansone, S. (2023). Strength and fatigue behavior assessment of the SCALMALLOY® material to functionally adapt the performance of L-PBF components within CAE simulations. *Progress in Additive Manufacturing*, *8(*5), 933–946.

Derakhshandeh, M. R., Eshraghi, M. J., & Razavi, M. (2023). Recent developments in the new generation of hard coatings applied on cemented carbide cutting tools. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, *111*(September 2022), 106077.

Gali, S., Gururaja, S., & Patel, Z. (2024). Methodological approaches in graded dental ceramics. *Dental Materials*, *40(*5), e1–e13.

Garrido Silva, B., Alves, F., Sardinha, M., Reis, L., Leite, M., Deus, A. M., & Vaz, M. F. (2022). Functionally graded cellular cores of sandwich panels fabricated by additive manufacturing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, *236*(9), 1814–1828.

Gharehbaghi, H., Sadeghzade, M., & Farrokhabadi, A. (2022). Introducing the new lattice structure based on the representative element double octagonal bipyramid. *Acta Structurae*, *121*, 107383.

Godec, D., Gonzalez-Gutierrez, J., Nordin, A., Pei, E., & Ureña Alcázar, J. (2022). *Springer tracts in additive manufacturing*. Springer Nature Switzerland AG.

Guo, W., Jiang, Z., Zhang, C., Zhao, L., Jiang, Z., Li, X., & Chen, G. (2021). Fabrication process of smooth functionally graded materials through a real-time inline control of the component ratio. *Journal of the European Ceramic Society, 41*(16), 256–265.

Kappe, K., Hoschke, K., Riedel, W., & Hiermaier, S. (2024). Multi-objective optimization of additive manufactured functionally graded lattice structures under impact. *International Journal of Impact Engineering, 183*, 104789.

Khan, A. U., Sadhya, S., Bharath Kumar, A., Chatterjee, S., & Madhukar, Y. K. (2024). Investigation on dual wire TIG Arc additive manufacturing of IN625 and SS316L FGM for continuous gradient and sandwich structures. *Welding Science and Technology, 200*, 111881.

Kieback, B., Neubrand, A., & Riedel, H. (2003). Processing techniques for functionally graded materials. *Materials Science and Engineering: A, 362* (1–2), 81–106.

Li, T., Wang, Z., Hu, S., Yang, Z., & Wang, Y. (2022). Hot cracking during the fabrication of Inconel 625/stainless steel 308 L functionally graded material by dual-wire arc additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes, 82*, 461–473.

Mao, S., Zhang, D. Z., Ren, Z., Fu, G., & Ma, X. (2022). Effects of process parameters on interfacial characterization and mechanical properties of 316L/CuCrZr functionally graded material by selective laser melting. *Journal of Alloys and Compounds, 899*, 163256.

Mehrabi, O., Seyedkashi, S. M. H., & Moradi, M. (2024). Experimental study of SS316L, Inconel 625, and SS316L-IN625 functionally graded material produced by direct laser metal deposition process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 238(*16), 8139–8150.

Najibi, A., & Mokhtari, T. (2023). Functionally graded materials for knee and hip arthroplasty; an update on design, optimization, and manufacturing. *Composite Structures, 322(*167), 117350.

Ngwoke, C. C., Mahamood, R. M., Aigbodion, V. S., Jen, T.-C., Adedeji, P. A., & Akinlabi, E. T. (2022). Soft computing-based process optimization in laser metal deposition of Ti-6Al-4 V. *Journal of Manufacturing Science and Technology, 120(*1-2), 1079–1093.

Ochoa, O., Cuan-Urquizo, E., Sandoval-Castro, X. Y., & González, A. (2024). Inverse design method for tailoring the deflection of beams with functionally graded metamaterials. *Journal of Micromechanics and Microengineering, 33* (9), 095032.

Portela, L. A., Copin, E., Fátima Vaz, M., & Deus, A. M. (2024). Modelling and characterization of novel honeycomb structures with mass gradient produced by additive manufacturing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 238*(10), 2018–2034.

Sadeghzade, M., Gharehbaghi, H., Toozandehjani, H., & Farrokhabadi, A. (2023). Experimental study of energy absorption capability in the lattice structures based on the octagonal bipyramid unit cell. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 45(*9), 460.

Safin Kaosar Saad, K., Saba, T., & Bin Rashid, A. (2024). Application of PVD coatings in medical implantology for enhanced performance, biocompatibility, and quality of life. *Heliyon, 10(*16), e35541.

Sargent, N., Firdosy, S., Wang, X., Ury, N., Poplawsky, J. D., Otis, R., & Xiong, W. (2024). Discovery of microsegregation-aided transformation and twinning-induced plasticity in low Mn steel through directed energy deposition of functionally graded materials. *Additive Manufacturing, 85*, 104154.

Shan, Z., Tran, M. T., Woo, W., Hwang, S.-K., Wang, H., Luzin, V., Kingston, E. J., Hill, M. R., DeWald, A., & Kim, D.-K. (2023). Multiscale framework for prediction of residual stress in additively manufactured functionally graded material. *Additive Manufacturing, 61,* 103378.

Shojaee, M., Valizadeh, I., Klein, D. K., Sharifi, P., & Weeger, O. (2024). Multiscale modeling of functionally graded shell lattice metamaterials for additive manufacturing. *Computers & Structures, 40*(3), 2019–2036.

Sun, L., Chiang, P.-J., Singham, J. J., Tan, W. X., Jangam, J. S. D., & Lai, C. Q. (2024). An efficient method for multiscale modelling of the mechanical properties of additively manufactured parts with site-specific microstructures. *Additive Manufacturing, 81,* 103995.

Temiz, A., Pehlivan, F., Öztürk, F. H., & Demir, S. (2024). Compression behavior of sheet-network triply periodic minimal surface metamaterials as a function of density grading. *Journal of Reinforced Plastics and Composites, 43*(23–24), 1430–1443.

Tonyali, B., Sun, H., Bocklund, B., Borgonia, J. P., Otis, R. A., Shang, S.-L., Liu, Z.-K., & Beese, A. M. (2024). Additively manufactured Ni-20Cr to V functionally graded material: Computational predictions and experimental verification of phase formations. *Journal of Alloys and Compounds, 985*, 174011.

Valizadeh, I., & Weeger, O. (2022). Parametric visco-hyperelastic constitutive modeling of functionally graded 3D printed polymers. *International Journal of Mechanical Sciences, 226*, 107335.

Valizadeh, I., Tayyarian, T., & Weeger, O. (2023). Influence of process parameters on geometric and elasto-visco-plastic material properties in vat photopolymerization. *Additive Manufacturing, 72*, 103641.

Wang, L., Guan, X., Yang, X., Zhan, X., Cai, X., & Shi, B. (2023). Thermal-fluid behavior and microstructure morphology during laser melting deposition of TiC/Ti6Al4V functionally graded materials. *Journal of Materials Research and Technology, 27*, 3214–3230.

Zhang, C., Liu, Y., Lu, J., Xu, L., Lin, Y., Chen, P., Sheng, Q., & Chen, F. (2022). Additive manufacturing and mechanical properties of martensite/austenite functionally graded materials by laser engineered net shaping. *Journal of Materials Research and Technology, 17*, 1570–1581.

Zhang, S., Yang, F., Li, P., Bian, Y., Zhao, J., & Fan, H. (2022). A topologically gradient body centered lattice design with enhanced stiffness and energy absorption properties. *Engineering Structures, 263*, 114384.

örnekir

TRİBOLOJİK UYGULAMALARDA BİYO-BOZUNABİLİR YAĞLAYICILARIN KULLANILMASI

M. Salih GÜL[1]

Sena KABAVE KILINÇARSLAN[2]

1. GİRİŞ

Enerji, dünyada ekonomik, sosyal ve çevresel etkileri olan ve derinlemesine incelenmesi gereken bir konudur. Enerji hizmetleri, yaşam koşullarını ve çevre kalitesini iyileştirirken ekonomik faaliyete önemli oranda girdi sağlamaktadır. Ancak enerjinin yoğun kullanımı karbon ayak izinin ve sera gazı emisyonlarının artışına neden olurken aynı zamanda enerji kaynaklarının yanlış yönetimi mevcut ekosistemlere zarar vermektedir. Bu nedenle enerji teknolojileri ile enerji tüketimi arasındaki ilişki son derece karmaşıktır.

Endüstrinin makine ve ekipman tasarımındaki gereksinimleri göz önünde bulundurulduğunda, enerji tüketimi ve fosil yakıtlara bağımlılık azaltılmaya çalışılmaktadır. Buradaki amaç, tasarlanan ve üretilen makine/ekipmanlarda performans kayıplarına neden olan sürtünme ve aşınmayı azaltmaktır. Bu nedenle sürtünme ve aşınmayı azaltmak için çeşitli soğutucu ve yağlayıcılar kullanılmaktadır (Etri et al., 2023; Özdemir & Korkmaz, 2024; Raghs, Kondul, & Cetin, 2020; Tzanakis et al., 2012).

1 Dr. Öğr. Üyesi, Karabük Üniversitesi, msalihgul@karabuk.edu.tr, ORCID: 0000-0002-0589-7510.

2 Dr. Öğr. Üyesi, Karabük Üniversitesi, senakilincarslan@karabuk.edu.tr, ORCID: 0000-0001-7302-4554.

Örnektir

Mekanik sistem bileşenlerindeki sürtünme ve aşınma kayıplarını en aza indirmek ve sürdürülebilirliği artırmak için tribolojinin kapsamlı bir şekilde anlaşılması şarttır. Triboloji terimi, sürtünme anlamına gelen yunanca "tribos" ve prensip anlamına gelen "logos" kelimelerinden türemiştir (Blau, 2008). Triboloji, sürtünme ve aşınmanın kontrolüne odaklanan bilimsel bir disiplin olarak tanımlanır.

Triboloji, otomobil fren sistemlerindeki asbest ve yataklardaki kurşun gibi mühendislik ürünlerindeki toksik maddeleri azaltmaya yönelik çevresel sorunlara da yanıt vermektedir (Dinçsoy et al., 2024). Tribolojik performansın arttırılması eski zamanlardan beri önemli bir araştırma konusudur. ABD'de yapılan bir araştırmaya göre tribolojideki gelişmeler, ulaşım, turbo makineler, enerji üretimi ve endüstriyel süreçler olmak üzere dört ana kategoride yıllık tüketilen enerjinin %11'inin geri kazanılabileceğini tahmin etmektedir (Jost, 1996). Si-Wei Zhang, Çin mühendislik akademisi için hazırladığı bir araştırmada, tribolojik uygulamaların Birleşik Krallık GSYİH'inde %1,1 ila %1,5 tasarruf sağlanacağını belirtmiştir (Woydt, 2021). Dünyanın toplam enerji tüketiminin ~%23'ü tribolojik temaslardan kaynaklanmaktadır. Bunun %20'si sürtünmeyi yenmek için kullanılır ve %3'ü aşınmış parça ve yedek ekipmanları yeniden üretmek için kullanılmaktadır. Dünya çapında araç, makine ve diğer ekipmanlarda yeni yüzey, malzeme ve yağlama teknolojilerinden yararlanılarak, sürtünme ve aşınmadan kaynaklanan enerji kayıpları uzun vadede %40 ve kısa vadede %18 oranında azaltılabilir. Küresel ölçekte, bu tasarruflar yıllık GSYİH'in %1,4'üne ve uzun vadede toplam enerji tüketiminin %8,7'sine denk gelmektedir (Holmberg & Erdemir, 2017). Bu nedenle sürtünme ve aşınmanın minimuma indirilmesi amacıyla farklı türde yağlayıcılar geliştirilmektedir.

Endüstriyel yağlayıcılar, triboloji uygulamalarına bağlı olarak farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olabilir (Mortier, Fox, & Orszulik, 2010). Motor yağı, sentetik hidrokarbonlar, poliglikol, ester, silikon ve fosfat ester gibi sıvı yağlayıcılar, genellikle istenen kimyasal özellikleri geliştirmek için çeşitli katkı maddeleri ile birleştirilmektedir (Szeri, 2003). Motor yağı, geniş bir viskozite aralığında bulunması ve iyi viskozite-basınç özellikleri nedeniyle ticari olarak önemli derecede başarı göstermektedir. Öte yandan, grafit ve molibden disülfür gibi katı yağlayıcılar, genellikle yüksek sıcaklık, ağır yük, çok düşük sıcaklık, çok yüksek vakum, güçlü oksidasyon ve aşırı radyasyon gibi zorlu koşullar altında kullanılmaktadır (Selvam, Dinaharan, & Rai, 2021). Grafen, yoğun şekilde paketlenmiş, yüksek kimyasal atalet, aşırı mukavemet ve kolay kesme kabiliyetine sahiptir ve bu da nano veya mikro ölçekli sistemlerin tribolojik uygulamasına olanak tanımaktadır (Berman, Erdemir, & Sumant, 2014). Fakat bu gibi sentetik yağlayıcıların çevresel etkileri biyo-yağlayıcılara olan ilgiyi canlandırmıştır.

Biyo-bozunabilir yağlayıcıların endüstriyel alanlarda uygulanabilirliği çeşitli sınırlamalara sahiptir. Sentetik yağlayıcılara kıyasla en büyük dezavantajlarına yüksek akma noktaları, zayıf oksidasyon ve düşük termal kararlılık örnek olarak verilmektedir (Darminesh et al., 2017; Kalin & Vižintin, 2005). Biyo-bozunabilir yağlayıcılar bitkisel kaynaklı yağlardır. Ancak kayganlık, korozyon direnci ve diğer malzemelerle uyumluluk gibi gereksinimlerin karşılanması gerektiğinden, tüm bitkisel yağlayıcılar yağlama için uygun değildir (Khadem, Kang, & Kim, 2024).

Bu çalışmada biyo-bozunabilir yağlayıcılarla ilgili temel bilgiler verilmiştir. Çalışma bağlamında, halihazırda endüstriyel sistemlerde kullanılan ve kullanılması tavsiye edilen biyo-bozunabilir yağlayıcıların yağlama performansları, kullanım

alanları, dezavantajları ve geliştirilmesi gereken durumlar hakkında literatür incelemesi gerçekleştirilmiştir.

2. BİYO-BOZUNABİLİR YAĞLAYICILARIN ÖZELLİKLERİ VE KULLANIM ALANLARI

Sınırlı küresel rezervlere sahip ham petrolün aksine, biyo-bozunabilir yağlayıcılar yenilenebilir kaynaklardan elde edilir. Genel olarak, saf, biyo-bozunabilir yağlayıcılar bitki veya hayvan bazlıdır. Bitki bazlı yağlayıcılar, farklı zincir uzunluklarına sahip gliserol ve yağ asitlerinden (doymuş veya doymamış) oluşan trigliseritlerden oluşmaktadır (Padgurskas, Rukuiža, Meškinis, Kreivaitis, & Spruogis, 2015). Sentetik modda, polialfaolefinler (PAO'lar), polialkalen glikoller (PAG'ler) ve esterler gibi farklı temel maddeler içerebilirler. PAO'lar yüksek biyo-bozunabilirlik ve iyi-düşük termal kararlılık, hidrolitik kararlılık ve düşük uçuculuk sergilemektedirler. Düşük viskozitenin gerekli olduğu uygulamalar için iyi bir seçimdir. PAG'lar kimyasal bileşimleri nedeniyle biyo-bozunabilir ve suda çözünür bileşenlerdir. Yangına dayanıklı sıvılar olarak kullanılırlar. Ancak PAG'lar diğer yağlarla uyumsuzdur ve PAG olmayan yağlarla karıştırılırlarsa sorunlara neden olabilirler (Khadem et al., 2024). Biyo-bozunabilir bazı yağlayıcıların uygulamalarının ve yıllık üretimlerinin bir özeti Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Biyo-bozunabilir bazı yağlayıcıların uygulamaları ve tahmini dünya çapındaki üretimi.

Yağlayıcı	Uygulama Alanları	Yaklaşık Üretim (milyon ton/yıl)
Palmiye yağı	Biyodizel, gres	73
Kanola	Hidrolik yağ, metal işleme sıvıları, gıda sınıfı yağlar	49,7
Kolza	Hidrolik sistemler, biyodizel, gres	27,4
Ayçiçeği	Gres	19,4
Zeytinyağı	Otomotiv yağlayıcıları	18,7
Mısır	Biyodizel, boya, metaller için pas önleyici	3,4
Hint yağı	Dişli yağlayıcı, gres	1,9
Jojoba	Gres, kozmetik endüstrisi	0,018

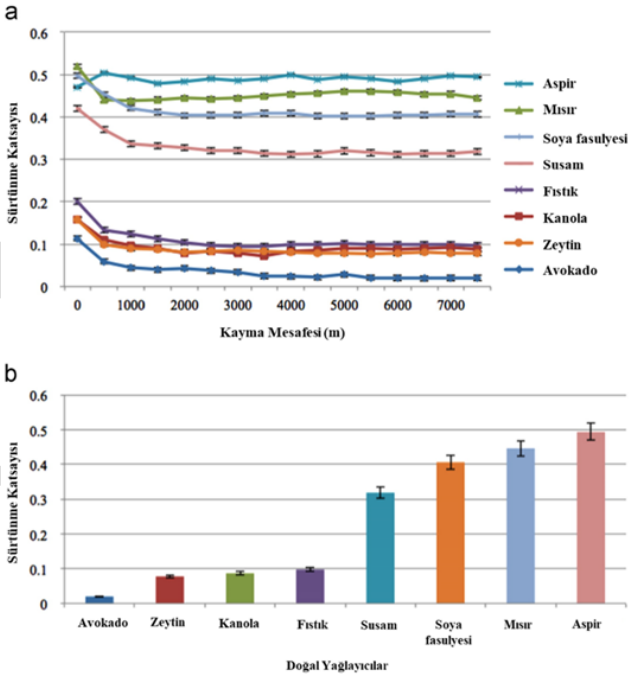
Kaynak: Liew Yun Hsien, 2015.

Yukardaki tabloda belirtildiği gibi bazı bitkisel yağlayıcıların diğerlerine göre daha yüksek oranda üretimi ve endüstride uygulama alanları bulunmaktadır. Bu oranlardaki farklılıkların nedeni optimum yağlama performansını göstermesi için gerekli olan kriterleri sağlama zorunluluğudur. Bazı bitkisel yağlayıcılar, istenen viskozite özelliğini sağlamadığı ve kullanım esnasında stabilitesini koruyamadığı için kullanıma uygun olmamaktadır (Maleque, Masjuki, & Sapuan, 2003).

3. BİYO-BOZUNABİLİR YAĞLAYICILARIN TRİBOLOJİDE KULLANIMI

Biyo-bozunabilir yağlayıcıların tribolojik özellikleri, yağ asitlerinin türü ve konsantrasyonundan önemli ölçüde etkilenir. Reeves ve arkadaşları, biyo-bozunabilir doğal yağlayıcılarla tribolojik testler gerçekleştirerek bu konuda kapsamlı bir çalışma yürütmüşlerdir. Şekil 1 (a), ortam koşulları altında

çeşitli doğal yağlar için sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimini göstermektedir. Her deneyin başında sürtünme katsayısının (COF) önemli ölçüde azaldığı genel bir eğilimin var olduğu görülmektedir. Doğal yağların COF'u yaklaşık 2000 m'lik bir kayma mesafesinde sabit duruma ulaşmaktadır. Deneysel sonuçlar, avokado, zeytin, kanola ve fıstık yağlarının hepsinin en düşük COF değerlerine (0,02 ile 0,10 arasında) sahip olduğu, susam, sebze, mısır ve aspir yağlarının ise en yüksek COF değerlerine (0,30 ile 0,50 arasında) sahip olduğunu göstermektedir. Şekil 1 (b), testin tamamlanmasından sonraki farklı doğal yağlar için COF değerini göstermektedir. Burada, avokado yağının test edilen doğal yağlar arasında en düşük COF değerine sahip olduğu açıkça görülmektedir (Reeves, Menezes, Jen, & Lovell, 2015).



Şekil 1. Doğal yağlar için sürtünme katsayısı değerleri.

Kaynak: Reeves et al., 2015.

3.1. Ayçiçek Yağının Tribolojide Kullanımı

Ayçiçek yağı, ayçiçeği tohumlarından elde edilmektedir ve gıda haricinde biyodizel üretiminde ve yağlayıcı olarak kullanılmaktadır. Bazı yüksek oleik özelliklere sahip ayçiçek yağları tekli doymamış yağ asitleri içermektedir. Bu tür ayçiçek yağları iyi oksidasyon kararlığı ve kayganlık gibi yağlayıcılar için önemli özellikler taşımaktadır (Minami, Hong, & Mathur, 1999). Lazzeri ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışma, yüksek oleik ayçiçek yağının yağlayıcı olarak endüstriyel yağların yerine kullanılabileceğini göstermiştir (Lazzeri et al., 2006). Siniawski ve arkadaşları, ayçiçek yağının tribolojik performansını etkileyen yağ asidi konsantrasyonlarını incelemişlerdir. Ayçiçek yağı kullanıldığında aşınma oranı azalmıştır. Bu sonuç, mineral yağlara kıyasla aşınma oranını ve sürtünmeyi azaltan ayçiçek yağındaki uzun zincirli hidrokarbon yağ asitlerine atfedilmektedir (Siniawski, Saniei, Adhikari, & Doezema, 2007). Jabal ve arkadaşları, dört bilyalı bir test cihazı ve dört zamanlı tek silindirli dizel motor kullanarak ayçiçek yağının tribolojik özelliklerini araştırmışlardır. Aşınma çapı ve yanma sıcaklığının mineral yağa kıyasla sırasıyla %9,51 ve %13,06 oranında azaldığı tespit edilmiştir (Jabal, Abdulmunem, & Abd, 2019).

3.2. Kanola Yağının Tribolojide Kullanımı

Kanola yağı, genetiği değiştirilmiş bir kolza bitkisidir. Piyasada bulunan çeşitli biyo-yağlayıcılar arasında kanola yağı en ucuz yağlayıcılardan biridir ve kolayca temin edilebilir. Metal şekillendirme ve damgalama uygulamalarında kullanılan birkaç petrol bazlı yağlayıcıya benzer yüzey gerilimi ve viskozite özelliklerine sahiptir (Reeves & Menezes, 2017). Diğer yaygın bitkisel yağlarla karşılaştırıldığında yaklaşık %12 alfa-linolenik asit (omega-3), yaklaşık %65 tekli doymamış yağ asitleri (oleik asit) ve az miktarda doymuş yağ asidi (< %7)

içermektedir (Liew Yun Hsien, 2015). Çok az değişiklik yapılarak veya hiç değişiklik yapılmadan normal dizel motorlarda kullanılmak üzere dizel yakıta dönüştürülebilir. Ayrıca şanzıman dişlisinde hidrolik yağ olarak kullanılmaktadır. Kanola yağının 40 °C'deki bildirilen viskozitesi 40,6 cSt'dir. Rafine edilmiş kanola yağının yoğunluğu 0,91 g/ cm3'tür (Shalwan, Yousif, Alajmi, & Alajmi, 2021). Shalwan ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen temel bir çalışmada, kanola yağı yağlaması altında bir çelik uca karşı kayan yumuşak bir çelik malzemenin sürtünme ve aşınma davranışları incelenmiştir. Yük ve kayma hızı sırasıyla 10 - 20N ve 0–2 m/s arasında değiştirilmiştir. Sonuçlar, sürtünme katsayısının (COF) ve aşınma oranının düştüğünü göstermiştir (Shalwan, Yousif, Alajmi, Alrashdan, & Alajmi, 2020). Azhari ve arkadaşları, kanola yağının yağlama özelliklerini SAE40 ticari endüstriyel yağlayıcı ile karşılaştırmışlardır. Sonuçları değerlendiren araştırmacılar, kanola yağının SAE40 endüstriyel yağlayıcılar yerine de kullanılabileceğini ifade etmişlerdir (Azhari, M. A., Saroji, M. F. H. M., & Latif, 2016).

3.3. Hint Yağının Tribolojide Kullanımı

Hint yağı, hint yağı tohumlarından elde edilen yenilebilir olmayan bir bitkisel yağdır. Her üç hidroksil grubunun uzun zincirli bir yağ asidi ile esterleştirildiği bir trigliserittir. Hint yağı, çeşitli özelliklere sahip malzemeler üretmek için petrol bazlı başlangıç kimyasallarına potansiyel bir alternatiftir. Biyodizel üretiminde, yarış arabalarında ve döner tip uçak motorlarında kullanılmaktadır (Maleque et al., 2003). Ucuzdur ve yüksek oranda (%85-90) yağ asidi içermektedir. Yüksek viskoziteye, yüksek moleküler ağırlığa ve orta ila düşük sıcaklıklarda (< 60 °C) düşük bir sürtünme katsayısına sahiptir (Mubofu, 2016). Hint yağı düşük termal kararlılığa ve zayıf oksidasyon özelliklerine sahiptir (Zeng, 2022). Alkolde çözünür, ancak petrolde çözünmez. Hint yağının 40 °C'deki yoğunluğu ve

viskozitesi sırasıyla 0,95 g/cm3 ve 37 cSt'dir (Kumar and Kumar 2018). Birçok araştırmacı, bu ilgi çekici özellikleri nedeniyle hint yağının tribolojik özelliklerini araştırmıştır. Transfer tabakasının oluşumunu artıran yüksek moleküler polaritesi nedeniyle hint yağı, diğer bitkisel yağlardan daha iyi yağlama ve oksidasyon direnci göstermektedir (Qian, Wang, Huang, & Zhao, 2018). Asadauskas ve arkadaşları, biyo-bozunabilir yağlayıcılar için potansiyel bir örnek olarak hint yağının yağlama özelliklerini araştırmışlardır. Hint yağının diğer bitkisel ve mineral yağlardan daha düşük uçuculuğa ve iyi yağlama özelliklerine sahip olduğu tespit edilmiştir (Asadauskas, S., Perez, J. H., & Duda, 1997). Bhaumik ve arkadaşları, saf hint yağının tribolojik özelliklerini ve yük taşıma kapasitelerini mineral yağlarla karşılaştırmıştır. Bu örnekte, saf hint yağı mineral yağdan daha yüksek bir COF ve daha düşük yük taşıma kapasitesi sergilemiştir (Bhaumik, S., & Pathak, 2016).

3.4. Palmiye Yağının Tribolojide Kullanımı

Palmiye yağı en yaygın üretilen yenilebilir yağdır. Palmiye ağaçlarının meyvelerinden elde edilir. Kanola, soya fasulyesi veya kolza tohumu yağlarından daha ucuzdur. Palmiye yağındaki doymuş yağ asidi içeriği yaklaşık %40-50 olup, bu oran zeytinyağı ve ayçiçek yağlarından daha yüksektir. Yüksek miktarda doymuş yağ asidi içermesi nedeniyle palmiye yağı, oksidasyona karşı çok dayanıklı olmakla beraber kolayca sınır yağlama koşulları oluşturmaktadır. Bu ise sürtünme ve aşınmanın azalmasına sebebiyet vermektedir (Durango-Giraldo, Zapata-Hernandez, Santa, & Buitrago-Sierra, 2022; Zamiri, Zakaria, Ahangar, Sadrolhosseini, & Mahdi, 2010). Palmiye yağındaki tekli doymamış ve çoklu doymamış (linoleik) yağ asitlerinin miktarları sırasıyla %38,7 ve %10,5'tir. Palmiye yağının (saf veya diğer yağlayıcılarla karıştırılmış) biyodizel ve endüstriyel yağlayıcı olarak uygulanması son birkaç yılda hızla artmıştır (Reddy et al. 2014). Palmiye yağının 40 °C'deki

yoğunluğu ve viskozitesi sırasıyla 0,88 g/cm3 ve 39,6 cSt'dir (Savariraj, Ganapathy, & Saravanan, 2012). Razak ve arkadaşları, palmiye yağını yağlayıcı olarak kullanıldığında bilyalı rulmanlar ve akrilonitril bütadien stiren (ABS) gibi sert-yumuşak malzemeler içeren kavisli yüzeylerin aşınma özelliklerini araştırmışlardır. Palmiye yağının ortalama sürtünme torkunun (0,71 Nm), mineral yağınkinden (0,74 Nm) daha düşük olduğu bulunmuştur. Palmiye yağındaki doymamış yağ asitlerinin konsantrasyonu, sürtünme ve aşınmayı azaltmada önemli derecede rol oynamaktadır (Razak et al., 2013).

4. SONUÇ

Sürekli artan enerji talebi, fosil yakıtların tükeniyor olması ve çevresel etkilerine ilişkin küresel farkındalığın artması, yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynakları arayışında daha fazla araştırma ve geliştirmeye yol açmıştır. Geleneksel petrol türevi yağlayıcıların aksine, biyo-bazlı yağlayıcılar, yağ asidinin kimyasal yapısına sahip temiz yağlayıcılardır. Bugüne kadar, yenilenebilir ve yenilenebilir olmayan kaynaklardan gelen birçok bitkisel yağ, biyo-bazlı yağlayıcılar üretmek için kullanılmıştır.

Bu çalışmada, çeşitli biyo-bozunabilir yağlayıcılar tanıtılmış, avantajları ve sınırlamaları hakkında yapılan çalışmalar incelenmiş ve tribolojik özelliklerine vurgu yapılmıştır. Literatürdeki çalışmalar, biyo-bozunabilir yağlayıcıların kimyasal bileşiminin tribolojik özelliklerini önemli ölçüde etkileyebileceğini göstermektedir. Literatürde, biyo-bozunabilir yağlayıcıların bazı durumlarda endüstriyel yağlayıcılardan daha iyi tribolojik özelliklere sahip olduğu ancak endüstride yaygın olarak kullanılabilmeleri için hala geliştirilmeye ihtiyaç duydukları belirtilmektedir.

Yakın gelecekte, çevre dostu yağlayıcıların tribolojik uygulamalardaki payı daha da artacaktır. Dünya yağlayıcı pazarı önümüzdeki yıllarda mevcut ürünlerde çok sayıda değişim görecek ve yağlayıcı üreticileri için ilgi çekici ARGE alanı olmaya devam edecektir. Bu çalışmada incelenen literatür, bitkisel bazlı yağlayıcıların, petrol bazlı yağlayıcılarla rekabet edebilecek performansa sahip yağlayıcılar oluşturmak için araştırılabileceğini göstermektedir.

Özetle, çevresel faktörlere dayalı artan endişeler ve teknolojik gelişmelerle birlikte, endişeleri gidermek ve çözüm üretmen adına biyo-bozunabilir yağlayıcıların tribolojik uygulamalarda daha fazla ilgi görmesi beklenmektedir.

Örnektir

5. KAYNAKÇA

Asadauskas, S., Perez, J. H., & Duda, J. L. (1997). Lubrication properties of castor oil–potential basestock for biodegradable lubricants. *Tribology & Lubrication Technology*, *53*(12), 35.

Azhari, M. A., Saroji, M. F. H. M., & Latif, M. A. (2016). Comparison of tribological properties between canola oil+ZDDP and SAE40 lubricants. *Journal of Engineering and Applied Science*, *11*(10), 2126–2129.

Berman, D., Erdemir, A., & Sumant, A. V. (2014). Graphene: a new emerging lubricant. *Materials Today*, *17*(1), 31–42. doi:10.1016/J.MATTOD.2013.12.003

Bhaumik, S., & Pathak, S. D. (2016). A comparative experimental analysis of tribological properties between commercial mineral oil and neat castor oil using Taguchi method in boundary lubrication regime. *Tribology in Industry*, *38*(1), 33.

Blau, P. J. (2008). *Friction Science and Technology*. CRC Press. doi:10.1201/9781420054101

Darminesh, S. P., Sidik, N. A. C., Najafi, G., Mamat, R., Ken, T. L., & Asako, Y. (2017). Recent development on biodegradable nanolubricant: A review. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, *86*, 159–165. doi:10.1016/j.icheatmasstransfer.2017.05.022

Dinçsoy, M., Korkmaz, M. E., Gupta, M. K., Özdemir, M. T., Günay, M., & Demirsöz, R. (2024). Studies on energy consumption and other important machining characteristics in sustainable turning of EA1N railway axle steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *133*(5–6), 2303–2317. doi:10.1007/s00170-024-13881-5

Durango-Giraldo, G., Zapata-Hernandez, C., Santa, J. F., & Buitrago-Sierra, R. (2022). Palm oil as a biolubricant: Literature review of processing parameters and tribological performance. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, *107*, 31–44. doi:10.1016/j.jiec.2021.12.018

Etri, H. E. L., Singla, A. K., Özdemir, M. T., Korkmaz, M. E., Demirsöz, R., Gupta, M. K., … Ross, N. S. (2023). Wear performance of Ti-6Al-4 V titanium alloy through nano-doped lubricants. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, *23*(3), 147. doi:10.1007/s43452-023-00685-9

Holmberg, K., & Erdemir, A. (2017). Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. *Friction*, *5*(3), 263–284. doi:10.1007/S40544-017-0183-5/METRICS

Jabal, M. H., Abdulmunem, A. R., & Abd, H. S. (2019). Experimental investigation of tribological characteristics and emissions with nonedible sunflower oil as a biolubricant. *Journal of the Air & Waste Management Association*, *69*(1), 109–118. doi:10.1080/10962247.2018.1523070

Jost, H. P. (1996). Lubrication: Tribology; Education and Research; Report on the Present Position and Industry's Needs (submitted to the Department of Education and Science by the Lubrication Engineering and Research) Working Group. *HM Stationery Office*.

Kalin, M., & Vižintin, J. (2005). The tribological performance of DLC-coated gears lubricated with biodegradable oil in various pinion/gear material combinations. *Wear*, *259*(7–12), 1270–1280. doi:10.1016/j.wear.2005.02.028

Örnekir

Khadem, M., Kang, W.-B., & Kim, D.-E. (2024). Green Tribology: A Review of Biodegradable Lubricants—Properties, Current Status, and Future Improvement Trends. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, *11*(2), 565–583. doi:10.1007/s40684-023-00556-x

Lazzeri, L., Mazzoncini, M., Rossi, A., Balducci, E., Bartolini, G., Giovannelli, L., … D'Avino, L. (2006). Biolubricants for the textile and tannery industries as an alternative to conventional mineral oils: An application experience in the Tuscany province. *Industrial Crops and Products*, *24*(3), 280–291. doi:10.1016/j.indcrop.2006.06.017

Liew Yun Hsien, W. (2015). Towards Green Lubrication in Machining. On *SpringerBriefs in Molecular Science*. Singapore: Springer Singapore. doi:10.1007/978-981-287-266-1

Maleque, M. A., Masjuki, H. H., & Sapuan, S. M. (2003). Vegetable-based biodegradable lubricating oil additives. *Industrial Lubrication and Tribology*, *55*(3), 137–143. doi:10.1108/00368790310470976

Minami, I., Hong, H., & Mathur, N. C. (1999). Lubrication performance of model organic compounds in high oleic sunflower oil. *Journal of Synthetic Lubrication*, *16*(1), 1–12. doi:10.1002/jsl.3000160102

Mortier, R. M., Fox, M. F., & Orszulik, S. T. (Eds.). (2010). *Chemistry and Technology of Lubricants*. Dordrecht: Springer Netherlands. doi:10.1007/978-1-4020-8662-5

Mubofu, E. B. (2016). Castor oil as a potential renewable resource for the production of functional materials. *Sustainable Chemical Processes*, *4*(1), 11. doi:10.1186/s40508-016-0055-8

Özdemir, M. T., & Korkmaz, M. E. (2024). A Short Review on Minimum Quantity Lubrication Method in Machining Applications. *Prabha Materials Science Letters*, *3*(2), 191–203. doi:10.33889/PMSL.2024.3.2.012

Padgurskas, J., Rukuiža, R., Meškinis, A., Kreivaitis, R., & Spruogis, B. (2015). INFLUENCE OF MANUFACTURING METHODS ON THE TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF RAPESEED OIL LUBRICANTS. *TRANSPORT*, *31*(1), 56–62. doi:10.3846/16484142.2015.1048525

Qian, S., Wang, H., Huang, C., & Zhao, Y. (2018). Experimental investigation on the tribological properties of modified carbon nanotubes as the additive in castor oil. *Industrial Lubrication and Tribology*, *70*(3), 499–505. doi:10.1108/ILT-05-2017-0138

Raghs, H. A., Kondul, B., & Cetin, M. H. (2020). Investigation of wear behavior of boronized H13 steel under environment of nano-silver-added lubricants coated with different ligands. *Surface Topography: Metrology and Properties*, *8*(1), 015007. doi:10.1088/2051-672X/ab6ece

Razak, D. M., Syahrullail, S., Yahya, A., Mahmud, N., Hashim, N. L. S., & Nugroho, K. (2013). Lubrication on the Curve Surface Structure Using Palm Oil and Mineral Oil. *Procedia Engineering*, *68*, 607–612. doi:10.1016/j.proeng.2013.12.228

Reeves, C. J., & Menezes, P. L. (2017). Evaluation of boron nitride particles on the tribological performance of avocado and canola oil for energy conservation and sustainability. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *89*(9–12), 3475–3486. doi:10.1007/s00170-016-9354-1

Reeves, C. J., Menezes, P. L., Jen, T.-C., & Lovell, M. R. (2015). The influence of fatty acids on tribological and thermal properties of natural oils as sustainable biolubricants. *Tribology International*, *90*, 123–134. doi:10.1016/j.triboint.2015.04.021

Savariraj, S., Ganapathy, T., & Saravanan, C. G. (2012). Performance and emission characteristics of diesel engine using high-viscous vegetable oil. *International Journal of Ambient Energy*, *33*(4), 193–203. doi:10.1080/01430750.2012.709356

Selvam, J. D. ., Dinaharan, I., & Rai, R. S. (2021). Matrix and Reinforcement Materials for Metal Matrix Composites. In *Encyclopedia of Materials: Composites* (pp. 615–639). Elsevier. doi:10.1016/B978-0-12-803581-8.11890-9

Shalwan, A., Yousif, B. F., Alajmi, F. H., & Alajmi, M. (2021). Tribological Behavior of Mild Steel under Canola Biolubricant Conditions. *Advances in Tribology*, *2021*, 1–13. doi:10.1155/2021/3795831

Shalwan, A., Yousif, B. F., Alajmi, F. H., Alrashdan, K. R., & Alajmi, M. (2020). Tribological Investigation of Frictional Behaviour of Mild Steel Under Canola Bio-Lubricant Conditions. *Tribology in Industry*, *42*(3), 481–493. doi:10.24874/ti.895.05.20.09

Siniawski, M. T., Saniei, N., Adhikari, B., & Doezema, L. A. (2007). Influence of fatty acid composition on the tribological performance of two vegetable-based lubricants. *Journal of Synthetic Lubrication*, *24*(2), 101–110. doi:10.1002/jsl.32

Szeri, A. Z. (2003). Tribology. Encyclopedia of Physical Science and Technology. (pp. 127–152).

Tzanakis, I., Hadfield, M., Thomas, B., Noya, S. M., Henshaw, I., & Austen, S. (2012). Future perspectives on sustainable tribology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*(6), 4126–4140. doi:10.1016/j.rser.2012.02.064

Woydt, M. (2021). The importance of tribology for reducing CO2 emissions and for sustainability. *Wear*, *474–475*, 203768. doi:10.1016/j.wear.2021.203768

Zamiri, R., Zakaria, A., Ahangar, H. A., Sadrolhosseini, A. R., & Mahdi, M. A. (2010). Fabrication of Silver Nanoparticles Dispersed in Palm Oil Using Laser Ablation. *International Journal of Molecular Sciences*, *11*(11), 4764–4770. doi:10.3390/ijms11114764

Zeng, Q. (2022). The lubrication performance and viscosity behavior of castor oil under high temperature. *Green Materials*, *10*(2), 51–58. doi:10.1680/jgrma.20.00068

Örnektir

POLİMER MALZEMELERİN YAŞAM DÖNGÜSÜ VE KARBON AYAK İZİ

Sena KABAVE KILINÇARSLAN[1]

M. Salih GÜL[2]

M. Hüseyin ÇETİN[3]

1. GİRİŞ

Malzemelerin yaşam döngüsü, o malzemenin üretimi, tüketimi, atık formuna geçmesi ve geri dönüşümünü kapsayan bir süreçtir. Her malzemenin yaşam süreci boyunca çevreye belirli bir etkisi bulunmaktadır. Bu etki karbon ayak izi ile ifade edilmektedir. Karbon ayak izi insan faaliyetlerinin doğada bıraktığı hasarın birim karbondioksit cinsinden hesaplanmasıdır (Danışman Koşar & Özalp, n.d.; Üreden & Özden, 2018) Polimer malzemelerin karbon ayak izinin tespiti için malzemenin üretiminden, geri dönüşümüne kadar her adımın detaylı olarak ele alınması gerekmektedir.

Polimer malzemeler 19. yüzyılın başında hayatımıza girmiş, günümüzde her alanda vazgeçilmez hale gelmişlerdir. Bu malzemeler sahip oldukları fiziksel özellikler, işlenebilirlik ve düşük maliyetleri sayesinde gündelik yaşamdan endüstrinin her alanına hitap etmektedir. Polimerlerin günümüzde bu kadar

1 Dr. Öğr. Üyesi, Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, senakilincarslan@karabuk.edu.tr, ORCID: 0000-0001-7302-4554.

2 Dr. Öğr. Üyesi, Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, msalihgul@karabuk.edu.tr, ORCID: 0000-0002-0589-7510.

3 Doç. Dr., Konya Teknik Üniversitesi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, mhcetin@ktun.edu.tr, ORCID: 0000-0003-0429-5507

yaygınlaşmasında gelişmiş mekanik özellikler, kimyasal kararlılık, elektriksel ve termal özellikler rol oynamaktadır (Ye, Qi, Hong, & Ma, 2017). Polimer malzemelerin özellikleri daha detaylı ele alındığında ilk olarak hafiflikleri dikkat çekmektedir. Dayanımı yüksek ancak düşük ağırlıklı malzemeler özellikle havacılık ve uzay, otomotiv, inşaat ve spor sektöründe oldukça önemlidir. Bununla birlikte polimer malzemeler kimyasallara karşı oldukça dirençlidir. Hafif, esnek, dayanıklı ve steril bir şekilde üretilebilmeleri bu malzemelerin kozmetik, ambalaj ve petrokimya sektörlerinde yaygın bir şekilde kullanımını sağlamaktadır. Polimer malzemelerin sahip oldukları elektriksel ve termal yalıtkanlık özellikleri de onları bilişim, elektrik elektronik, inşaat ve yapı sektörlerinde kullanımını sağlamaktadır. Polimer malzemelerin moda ve tekstil sektöründe tercih edilmesinin sebebi de bu malzemelerin sahip olduğu dayanıklılık, esneklik, suya ve kire karşı direnç, düşük maliyet ve kolay üretilebilirlik olarak gösterilebilir. Tüm bu alanların dışında polimer malzemelerin biyomedikal ve tıp alanında geniş yelpazeli bir kullanımı bulunmaktadır. Yapay organlardan protezlere, kontak lenslerden cerrahi dikiş ipliklerine kadar polimer malzemelerin sağlık sektöründe oldukça önemli bir rolü bulunmaktadır (Guo et al., 2024; Zhao et al., 2023).

2. POLİMER MALZEMELERİN ÜRETİMİ

Polimer malzemeler, çok sayıda monomer molekülünün kimyasal tepkime ile birleşerek makromoleküle dönüşmesi sonucu üretilir. Bu kimyasal tepkime polimerizasyon olarak isimlendirilir (Özlü, 2023). Molekül içindeki atomlar arasında kovalent bağ kurulur ancak moleküllerin birbiri ile kurduğu bağlar zayıf bağlardır. Bu zayıf bağlar, polimerlerin dayanım ve ergime noktalarının metal veya seramiklere göre düşük olmasının ana sebebidir (Sönmez, 2009). Polimer malzemeler

doğal veya sentetik yapıya sahip oluşuna, molekül yapılarına, ısıya karşı gösterdikleri tepkilerine ve kristalinlik derecelerine göre sınıflandırılabilir (Özlü, 2023; Sönmez, 2009) Doğal polimerler doğada bulunan nişasta, selüloz gibi kaynaklardan elde edilen polimerlerdir. Sentetik polimerler ise endüstriyel yöntemlerle üretilen polimerlerdir. Molekül yapılarına göre, lineer, dallanmış, çapraz bağlı veya ağ yapılı olarak sınıflandırılabilir. Bu molekül yapıları polimer zincirlerin oluşma biçimini ifade etmektedir. Polimer zincirler lineer bir şekilde düz bir yapıda olabilirken, zincirde dallanma durumu da meydana gelebilir (Sönmez, 2009). Çapraz bağların bulunduğu zincirlerin yanısıra üç boyutlu ağ yapısına sahip polimer zincirleri de bulunabilmektedir. Polimer malzemelerin kristalin dereceleri amorf ya da yarı-kristalin yapıda olabilir. Amorf yapıdaki polimerler rastgele bağlanmış uzun zincirler halindedir. Yarı kristalin polimerler ise kristal ve amorf bölgelere sahiptir (Sönmez, 2009). Polimer malzemelerin sıcaklığa bağlı davranışları ise termoplastik ve termoset olarak ayrılır. Termoplastik malzemeler ısı uygulanması sonucu yumuşar, erime noktasında erir, soğutulduğunda katılaşır. Bu süreç ısı etkisi altında tekrarlanabilir. Termoset malzemeler ise ısıtıldıklarında bir kez şekillendirilirler ve kalıcı bir form kazanırlar. Tekrar ısıtılarak şekillendirilemezler. Mühendislik polimerlerinin sınıflandırılması genellikle ısıya bağlı davranışlarına göre yapılır (Onat, 2016; Özlü, 2023; Sönmez, 2009).

2.1. Mühendislik Polimer Malzemeleri

2.1.1. Termoplastik Malzemeler

Termoplastik malzemeler ısı etkisi altında yumuşayan, ısı ve basınç etkisi altında şekillendirilebilen, soğutulduğunda katılaşan malzemelerdir. Bu malzemeler tekrar ısıtılıp şekillendirilmeye elverişli malzemelerdir ancak her ısıtma işlemi

sonucunda molekül yapıları değişikliğe uğrar. Bu da mekanik dayanımın düşmesine sebep olmaktadır (Sönmez, 2009). Termoplastik malzemeler genellikle yarı kristalin yapıya sahiptir. Yarı kristalin yapının içerisinde bulunan amorf bölgeler, malzemede elastikiyet sağlarken kristal bölgeler ise sertlik ve mukavemet sağlamaktadır (Özlü, 2023; Sönmez, 2009). Mühendislik alanında kullanılan termoplastik malzemeler polioksimetilen (POM), poliamid (PA), polikarbonat (PC), polietilen (PE), polipropilen (PP), Politetrafloroetilen (PTFE), polivinilklorür (PVC) ve polietilentereftalat (PET) şeklinde sıralanabilir (Onat, 2016).

POM malzemeler yüksek rijitlik ve sertlik özellikleri sayesinde dişlilerde, vanalarda ve emniyet kemerlerinde kullanılmaktadır. PA malzemeler dayanımı yüksek ve elastik yapısı sayesinde makine konstrüksiyon ve inşaat sektörlerinde kaymalı yataklar, yatak segmanları, boru dirsekleri, dişli çarklar ve vanalarda kullanılabilmektedir. PC malzemeler darbe direnci yüksek, şeffaf ve hafiflik özellikleri sayesinde gözlük camları, tıbbi medikal cihazlar, seralar ve dijital veri saklama disklerinde kullanılmaktadır. PE malzemeler, kolay işlenebilirlik ve düşük maliyet sayesinde polimerler arasında en çok kullanılan türdür. Yüksek yoğunluklu PE ve düşük yoğunluklu PE olmak üzere iki farklı çeşidi bulunmaktadır. Bu malzemeler kanalizasyon, doğalgaz boruları ve jeotermal ısı transferi borularında kullanılmaktadır. PP malzemelerin mukavemet/ağırlık oranı oldukça yüksektir. Bu malzemeler mutfak ve banyo gereçlerinde, mobilya bileşenlerinde, otomotiv bileşenlerinde kullanılmaktadır. PVC malzemeler PE ve PP'den sonra dünyada en çok üretilen üçüncü sentetik polimerlerdir. İnşaat alanı başta olmak üzere kaplama malzemeleri, borularda, kablolarda, kapı ve pencere profillerinde kullanılmaktadır. PET malzemeler hafiflik, şeffaflık ve kimyasal kararlılık özellikleri sayesinde

tıbbi malzemelerde, laboratuvar malzemelerinde ve şişelerde kullanılabilmektedir (Onat, 2016).

2.1.2. Termoset Malzemeler

Termoset malzemeler, genellikle çapraz bağların oluşturduğu 3 boyutlu ağ yapısına sahip malzemelerdir. Bu malzemeler ısı etkisi altında bir kez şekillendirilirler ve sertleştikten sonra tekrar yumuşama göstermezler (Sönmez, 2009). Bazı termoset malzemelerin polimerizasyonu oda sıcaklığında da gerçekleşebilir. Kırılgan ve rijit malzemelerdir. Termoplastik malzemelere göre dayanımları ve sürtünme özellikleri daha iyidir. Tersinir olmayan üretim yöntemleri sebebiyle tekrar kullanılmaya ve kaynaklanmaya elverişli malzemeler değillerdir. Mühendislikte kullanılan termoset polimer malzemeler, epoksi reçineler, vinil esterler, melamin ve üreformaldehitler, fenolikler ve polyesterler olarak sınıflandırılabilir (Özlü, 2023; Sönmez, 2009). Polyesterler çok yönlü bir şekilde üretilebilmeleri ve düşük maliyet özellikleri sayesinde otomotiv gövde panelleri, gemi iskeletleri, inşaat panelleri ve büyük tankların üretiminde kullanılmaktadır. Fenolikler kimyasal ve boyutsal kararlılığı sayesinde otomotiv ve havacılık sektörlerinde kullanılmaktadır. Melamin ve üreformaldehitler beyaz eşya gövdelerinde, mutfak ve banyo gereçlerinde, tezgahlarda ve dekoratif eşyalarda kullanılmaktadır (Sönmez, 2009).

2.1.3. Elastomer Malzemeler

Esneme özellikleri yüksek, esneme sonrası eski haline dönebilen kauçuktan oluşan polimerlerdir (Özlü, 2023; Sönmez, 2009). Elastomer malzemeler yüksek esneklik, mukavemet ve aşınma dayanımına sahiptir. Özellikle otomotiv sektöründe araç tekerlekleri, cam silecekleri, hortumlar, izolasyon bileşenleri ve aks körüklerinde kullanılmaktadır (Vahap Vahapoğlu, 2013).

2.1.4. Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler

Kompozitler, iki veya daha fazla bileşenin birleştirilmesi ile üretilmiş, üstün özelliklere sahip ileri mühendislik malzemeleridir. Bu malzemelerin üretilmelerindeki ana sebep mukavemet/ağırlık oranlarının yüksek olması ve belirlenen ihtiyaçlara özel niteliklerde tasarlanabilmesidir. Kompozit malzemeler matris ve takviye fazı olmak üzere iki ana bileşenden meydana gelir. Bu bileşenler birbirlerinden ayrı bir kimyasal faza sahiptirler (Şişmanoğlu, 2020).

Matris malzemesi takviye fazını içinde barındırarak malzemeye rijitlik, boyutsal kararlılık ve kimyasal kararlılık gibi nitelikler kazandırır. Malzeme üzerine etki eden yükü takviye bileşenleri üzerine dağıtır. Takviye malzemeleri ise malzemeye sertlik, çekme, eğilme, basma ve aşınma dayanımını artırarak malzemenin mekanik performansını iyileştirir (Kabave Kılınçarslan, 2023).

Matris bileşeninin polimer malzemelerden meydana gelmesi halinde üretilen malzemelere polimer matrisli kompozit malzemeler denir. Polimer matrisli kompozit malzemeler hafiflik, dayanım, korozyon direnci, kolay üretilebilirlik ve düşük maliyet özellikleri sebebiyle üretilir. Matris malzemesi olarak termoset veya termoplastik polimer malzemeler seçilebilmektedir. Takviye bileşenleri olarak partikül, fiber veya tabaka formunda malzemeler seçilebilmektedir (Kabave Kılınçarslan, 2023).

Polimer matrisli kompozit malzemeler enjeksiyon kalıplama, el yatırma, vakum infüzyon, basınçlı kalıplama, püskürtme, filament sarma gibi çok çeşitli yöntemlerle üretilebilmektedir. Üretim yöntemi matris malzemesinin termoset veya termoplastik oluşuna, takviye bileşenlerinin ise partikül, fiber veya tabakalı forma sahip oluşuna göre belirlenmektedir. Üretilen kompozit malzemeler özellikle

biyomedikal, otomotiv, savunma sanayi, havacılık ve uzay, inşaat ve bilişim sektörlerinde kullanılmaktadır.

3. POLİMER MALZEMELERİN ATIK FORMUNA DÖNÜŞMESİ

Atık malzemenin tanımını yapmak başta basit gibi görünse de aslında karmaşık bir süreci barındırır. Atık malzemeyi negatif ekonomik değere sahip bir malzeme olarak göstermek doğru değildir çünkü günümüzde birçok hurda malzeme üretime tekrar girerek pozitif ekonomik değere sahip olmaktadır (Geyer, Jambeck, & Law, 2017). Bunun yanısıra günümüzde birçok malzemenin yakma ve geri dönüşme özellikleri de bulunmaktadır. Atık malzeme, üretim veya tüketim süreci esnasında istenmeyen malzeme formuna geçmesi olarak tanımlanabilir. Polimer üretimi esnasında ortaya çıkan tüm atıklar üretim atığı olarak isimlendirilebilir. Tüketici tarafından kullanım ömrünü tamamlaması sonucu ise tüketici atığı ortaya çıkar (Geyer, 2020).

Polimer malzemeler mekanik, termal ve kimyasal etkiler gibi farklı koşullara maruz kaldığında bir süre sonunda kullanım ömrünü tamamlar. Malzemelerin yıpranmasında etkili olan birçok faktör bulunmaktadır. Örneğin UV ışını polimerlerde oksidatif etkilerle birlikte polimer malzemelerin kırılganlaşmasına, çatlamasına dolayısıyla kullanım ömrünün kısalmasına sebep olur (Bao, Wong, Liu, & Tao, 2022; Ma et al., 2015). Sıcaklık ve basınç altında çalışan polimer malzemeler de zamanla esneklik ve mukavemet kaybına uğrar ve kırılganlaşır. Bu da çatlamasına ve işlevini yerine getirememesine sebep olur. Aynı şekilde kimyasallara maruz kalmak da polimerlerin molekül yapısının bozarak malzemenin işlevini kaybetmesine sebep olabilir. Polimer matrisli kompozit malzemeler üretilirken takviye/matris arayüzünde meydana

gelen boşluk ve topaklanmalar da mekanik dayanımın düşmesine sebep olur. Dolayısıyla kompozit üretiminde homojen bir dağılım elde edilmesi ve matris/takviye etkileşiminin geliştirilmesi gerekmektedir.

3.1. Dünyada Plastik Atık Yönetimi ve Kontrolü

Polimer malzemelerin çevreye olumsuz etkisini azaltmak için dünya genelinde çeşitli önlemler alınmaktadır. Bu önlemler, biyobozunabilir polimer kullanımını teşvik etme, geri dönüşüm işlemleri ve atık polimerden enerji geri kazanımı şeklinde çeşitlendirilebilir (Geyer, 2020).

Plastik atıkların oluşumunu azaltmak için birçok ülke tek kullanımlık sentetik ürünlerin kullanımını kısıtlamaktadır. Bu ürünler yerine özellikle gıda ve ambalaj sanayisinde biyobozunabilir ve toksik madde içermeyen polimerlerin ya da doğal kaynaklı ürünlerin kullanımı teşvik edilmektedir. Ancak bu ürünlerin suya, kimyasala ve termal etkilere karşı dayanımının düşük oluşu yaygın bir şekilde kullanılmalarını sınırlandırmaktadır.

Dünyada atık yönetiminde uygulanan bir diğer önlem geri dönüşümdür. Polimer malzemelerin geri dönüşümü 4 aşamada gerçekleştirilebilir. Her yöntemin kendine ait avantajı bulunmakla birlikte geri dönüşüm süreçlerinin maliyeti, toksik madde salınımı, ayrıştırma problemleri, geri kazanılan malzemelerin pazar değeri ve geri dönüşüm altyapısının sınırlılığı plastik kirliliği sorununu karmaşık hale getirmektedir. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde atık yönetim sistemleri yeterli seviyede gelişmemiştir. Bu da plastik atık yönteminin küresel ölçekte kontrol edilmesini zorlaştırmaktadır (Geyer, 2020).

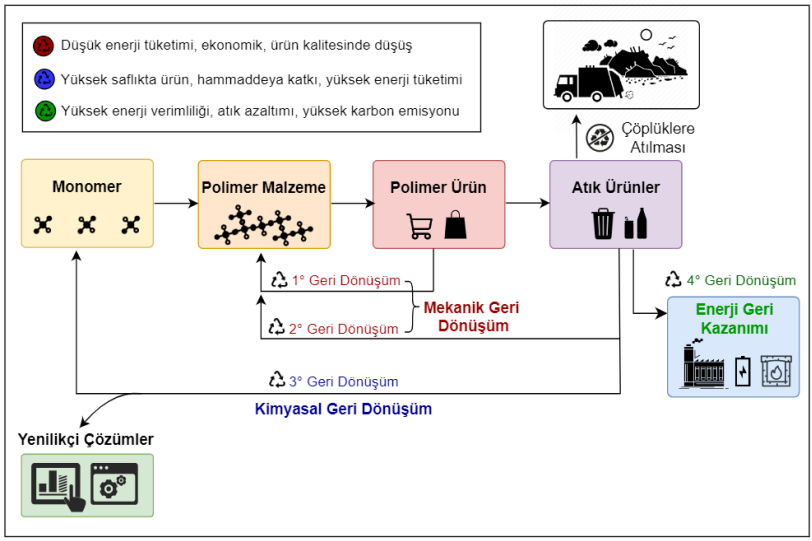
Örnektir

4. POLİMER MALZEMELERİN GERİ DÖNÜŞÜMÜ

Polimer atıkların teorik olarak geri dönüştürülmesi, yeniden işlenmesi ve tekrar kullanılması mümkündür. Bu doğrultuda her geçen gün farklı bir strateji geliştirilmektedir. Temelde tüm bu stratejilerin ortak amacı yalnızca malzeme geri kazanımı değil, aynı zamanda katma değer elde etmektir (Geyer, 2020).

Geri dönüşüm, işlevselliğini ve kullanım ömrünü tamamlamış atık ürünlerden malzeme geri kazanımı olarak tanımlanabilir. Polimerlerde malzeme geri kazanımı, nihai bertarafı tamamen önlemez ancak geciktirir. Nihai bertaraf sürecinde ise polimer atıklardan yakıt elde ederek enerji kazanımı sağlanabilir. Enerji geri kazanımı piroliz ve gazlaştırma gibi plastikten yakıt elde edilmesi sonucu gerçekleştirilir (Geyer, 2020; Okan, Aydin, & Barsbay, 2019).

Polimer atıkların geri dönüşümü ayrıştırılması, sınıflandırılması, temizleme işlemleri, mali destek eksikliği ve toksik madde endişesi sebebiyle oldukça sınırlı kalmaktadır. Yine de doğal kaynakları gelecek nesillere aktarabilmek için hammadde tüketimini, enerji ihtiyacını, atık üretimini ve sera gazı emisyonlarını azaltma konusunda herkes hemfikirdir. Bu doğrultuda polimer atıkların geri dönüşümünde mekanik geri dönüşüm, kimyasal geri dönüşüm ve enerji geri kazanımı gibi yaklaşımlar benimsenmektedir (Şekil 1). Ayrıca günümüzde plastik atıklardan nano partikül üretimi ve karbon yakalama gibi yenilikçi çözümler de gelişme aşamasındadır (Okan et al., 2019).



Şekil 1. Polimer malzemelerin geri dönüşüm stratejileri

4.1. Mekanik Geri Dönüşüm

Mekanik geri dönüşüm işlemleri atık polimerlerin fiziksel olarak işlenmesi ve yeniden kullanılması anlamına gelir. Mekanik geri dönüşüm birincil ve ikincil tip geri dönüşüm olarak incelenebilir. Birincil geri dönüşüm, malzemelerin herhangi bir değişikliğe uğramadan tekrar aynı amaçla kullanımı için tekrar üretilmesidir. Bu yöntem yalnızca kirlenmemiş tek tip atıkların geri dönüşümünü kapsar. Dolayısıyla yalnızca bazı polimerler bu tip geri dönüşüme uygundur ve döngü sayısı sonsuz değildir. Su şişelerinin geri dönüştürülerek tekrar su şişesi üretilmesi bu yönteme bir örnektir (Okan et al., 2019).

İkincil geri dönüşümde ise atık polimerler kirlerinden arındırılarak ayrıştırılır ve sınıflandırılır. Ardından parçalama ve boyutlandırma işlemleri gerçekleştirilir ve granül malzemeler elde edilir. Son olarak da renklendirme, peletleme ve istenen formda malzeme üretme işlemleri yürütülür (Okan et al., 2019; Turner, Williams, & Kemp, 2015). Bu yöntemin dezavantajı her geri dönüşüm döngüsünde polimerlerin molekül yapısının

bozulmasıdır. Polimerin molekül yapısının bozulması dayanımının ve kalitesinin düşmesine sebep olur. Ayrıca renk ve kokuda değişimler meydana gelir. Mekanik geri dönüşüm işlemleri yalnızca termoplastik polimer malzemeler için uygundur.

4.2. Kimyasal Geri Dönüşüm

Kimyasal geri dönüşüm bir diğer adıyla üçüncül geri dönüşüm ise kimyasal işlemler sonucunda polimerlerin monomerlere ayrıştırılması olarak tanımlanmaktadır (Okan et al., 2019; Turner et al., 2015). Elde edilen monomerler, polimer üretiminde tekrar kullanılarak polimerize edilebilir. Kısmi depolimerizasyon sonucu elde edilen hidro karbonlar da polimer ve petrokimyasalların üretiminde hammadde olarak kullanılabilmektedir. Kimyasal geri dönüşüm, enerji ve hammadde talebini azalttığı için sürdürülebilirlik açısından faydalı bir işlemdir. İşlemden geçen polimerlerin türüne bağlı olarak düşü molekül ağırlıklı bileşikler elde edilebilir. Kimyasal geri dönüşüm işlemleri gazlaştırma, piroliz, sıvı-gaz hidrojenasyonu ve buhar veya katalitik kraking şeklinde sıralanabilir (Abdou, Botelho Junior, Espinosa, & Tenório, 2021). Bu yöntemin dezavantajı maliyetinin oldukça yüksek olması ve teknolojik altyapı gerektirmesidir.

4.3. Enerji Geri Kazanımı

Plastik atıklar mekanik geri dönüşüm işlemlerine tabi tutulduğunda mekanik özelliklerinde düşüş meydana gelir. Her döngüde daha düşük kaliteli ve standart altı malzeme ortaya çıkar. Bu işlemler her polimere uygulanamadığı gibi, dönüşüm döngüsünün de bir sınırı vardır. Kimyasal geri dönüşüm işlemleri de aynı şekilde her polimere uygulanamaz, maliyeti yüksektir ve her zaman yeterli seviyede verim elde edilemez. Geri dönüşüm işlemleri bir aşamadan sonra ekonomik açıdan karsız hale gelir. Bu noktada polimer malzemelerin kalorifik

değerinden faydalanabilir. Plastik atıklardan enerji geri kazanımı enerji arzına katkı sağlayabilir. Enerji geri kazanımı polimer atıkların termal olarak yakılması ve enerji elde edilmesini ifade etmektedir. Ancak bu yöntem toksik madde salınımı yüzünden ekolojik ve sürdürülebilir bir yöntem değildir (Okan et al., 2019; Turner et al., 2015).

4.4. Yenilikçi Çözümler

Polimer atıkların yönetiminde ürün kalitesini artıracak, enerji tüketimini azaltacak ve toksik madde salınımını engelleyecek, ekonomik açıdan uygulanabilir yeni geri dönüşüm stratejilerinin geliştirilmesi oldukça önemlidir. Bu doğrultuda atık polimerlerden karbon yakalama, nano partikül üretme gibi yenilikçi çözümler geliştirilmektedir. Fosil yakıtların yakılması sonucu atmosfere salınan CO_2'nin yakalanması ve depolanması sera gazı emisyonunu azaltacak potansiyel bir çözümdür. (Abdou et al., 2021; Okan et al., 2019)

Öte yandan atık bir malzemeyi nano partikül gibi değerli bir ürüne dönüştürme yaklaşımı sürdürülebilirlik açısından oldukça faydalıdır. Bu tip bir yaklaşım "upcycling" olarak isimlendirilir. Polimer malzemelerden yüksek saflıkta karbon mikroküre veya nanotüp üretiminin mümkün olabileceği literatürde yapılmış çalışmalarda ifade edilmiştir (Borsodi, Szentes, Miskolczi, Wu, & Liu, 2016; El Essawy, Konsowa, Elnouby, & Farag, 2017; Okan et al., 2019).

5. POLİMER MALZEMELERİN KARBON AYAK İZİ

İnsanların doğayı kullanırken gerçekleştirdiği her faaliyet çağımızın en büyük problemi olan küresel ısınmayı tetiklemektedir (Üreden & Özden, 2018). Küresel ısınma, fosil kaynakların yakıt olarak kullanılması ile atmosfere salınan sera

gazlarının artması sebebiyle oluşmaktadır. 2009 yılında imzalanan Kyoto protokolüne göre karbon dioksit, metan, nitröz oksit, hidroflorür karbonlar, perfloro karbonlar, sülfürhekza florid gazları, sera gazı olarak tanımlanmış ve atmosferdeki sera etkisini artırdığı bildirilmiştir (Üreden & Özden, 2018). İnsan faaliyetlerinin sebep olduğu bu sera gazlarının salınımı karbon ayak izi ile tespit edilmektedir (Danışman Koşar & Özalp, n.d.).

"Yakıt tüketimi*emisyon faktörü" şeklinde hesaplanan karbon ayak izi, insanların doğada bıraktığı hasarın izi olarak tanımlanabilir. Karbon ayak izi birincil ve ikincil ayak izi olmak üzere iki başlıkta incelenebilir. Birincil karbon ayak izinde kişi bazlı meydana gelen hasarın izidir. Burada kişilerin günlük alışkanlıkları doğrultusunda kullandığı ev eşyaları, ulaşım araçları ve tüketim miktarı ön plana çıkar. İkincil ayak izinde ise ürünlerin üretim aşamasından nihai bertarafına kadarki süreçte meydana gelen hasarın izidir (Matthews, Hendrickson, & Weber, 2008; Nirmala, Harikumar, George, & Reddy, 2023).

Polimer malzemelerin hayatımızda bu denli etkin bir rol oynamasının hem birincil hem de ikincil karbon ayak izine katkısı vardır. Bu malzemelerin üretimi, tüketimi, bertaraf edilmesi ve geri dönüşümü esnasında atmosfere sera gazı salınımı devam etmektedir. Polimer malzemelerin karbon ayak izi, üretim kaynağı ve kullanılan enerji türüne bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Sentetik polimer malzemeler fosil yakıt türevleri kullanılarak üretilir. Fosil yakıtlardan hammadde üretim sürecinde yakıtların çıkarılması, işlenmesi ve taşınması esnasında önemli miktarda karbon salınımı meydana gelir.

Hammaddeden polimer üretimi için gerçekleştirilen polimerizasyon sürecinde kullanılan elektrik, su, kimyasallar ve katkı maddeleri sayesinde atmosfere yüksek oranda CO_2 salınımı gerçekleşir. Üretilen polimer malzemelerin tüketiciye

ulaşmasında kullanılan taşıma ve dağıtım araçları da karbon ayak izinin büyümesine katkı sağlar.

Kullanım ömrü tamamlanan polimer malzemeler geri dönüşüme uğramadan doğrudan çöplüklere veya yakma tesislerine götürülür. Yakma tesislerinde polimer malzemelerin yakılması, sera gazlarının atmosfere salınmasına sebep olur. Çöplüklerde parçalanan sentetik polimer malzemeler de metan gazı salınımına sebep olur (Shrestha, van-Eerten Jansen, & Acharya, 2020). Ayrıca toprak ve su kaynaklarında atık formunda bulunan plastikler, doğayı kimyasal olarak kirletmenin yanısıra canlıların yaşam alanlarını da işgal etmektedir. Polimerlerin geri dönüşümü her ne kadar karbon ayak izini azaltmaya yönelik bir girişim de olsa bu işlemlerin gerçekleştirilmesi esnasında tüketilen enerji ve atmosfere salınan toksik gazlar karbon ayak izine katkı sağlamaktadır.

Polimer malzemelerde karbon ayak izini azaltmaya yönelik çabalar, geri dönüşüm stratejileri, biyobazlı polimerlerin kullanımının teşvik edilmesi, tek kullanımlık plastiklerin sınırlandırılması, karbon yakalama ve depolama şeklinde sıralanabilir.

6. CLEANER PRODUCTION (TEMİZ ÜRETİM)

Polimer malzemeler hayatımızın vazgeçilmez bir parçasıdır ve öyle olmaya devam edecektir. Bu sebeple polimer malzemelerin tasarım, üretim ve geri dönüşümünün temiz üretim anlayışına göre gerçekleştirilmesi oldukça önemlidir. Temiz üretim (Cleaner production), doğaya hasar bırakmadan, doğal kaynakları verimli kullanarak ve atık üretimini azaltarak üretim süreçlerini optimize etmeyi hedefleyen bir yaklaşımdır (Gale, 2006; Zadeh, Aleagha, & Nia, 2018). İlk defa Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) tarafından tanımlanmış olan bu yaklaşım, karbon ayak izini minimize ederek endüstriyel

sürdürülebilirliğin artırılmasına odaklanmaktadır. Temiz üretim yaklaşımının önceliği üretim sürecinin başında atık ve emisyonların kaynağını tespit etmek ve önlemektir. Temiz uygulama stratejileri aşağıda sıralanmıştır. (Filho, Nunhes, & Oliveira, 2019; Li, Bai, & McKechnie, 2016; Prigozhin, Zheng, & Lee, 2023):

Kaynak Verimliliğinin Artırılması: Enerji, su, toprak gibi doğal kaynakların ve hammaddelerin verimli bir şekilde kullanılması ve yenilenebilir kaynaklardan sağlanması.

Ürünlerin Yaşam Döngüsünün Analizi (LCA): Ürünlerin üretimden nihai olarak bertaraf edilmesine kadar çevresel etkilerinin tespit edilmesi, emisyonların azalması ve döngüsel ekonomiye katkı sağlanması.

Ekolojik Tasarım: Ürünlerin çevresel etkilerini minimize edecek şekilde tasarlanması ve daha az enerji ve hammadde kullanılarak üretilmesi.

Üretim Sürecinin İyileştirilmesi: Üretim sürecinde kullanılan kimyasal reaksiyonların ve enerji tüketiminin optimize edilmesi sonucu karbon emisyonunu minimize ederek üretim verimliliğinin artırılması.

Atık Yönetimi ve Geri Dönüşümün Teşviki: Üretim ve tüketim süreci boyunca ortaya çıkan atıkların geri kazanımı ile üretim sürecine katkı sağlanması ve çevre kirliliğinin önlenmesi.

Önizleme

7. KAYNAKÇA

Abdou, T. R., Botelho Junior, A. B., Espinosa, D. C. R., & Tenório, J. A. S. (2021). Recycling of polymeric composites from industrial waste by pyrolysis: Deep evaluation for carbon fibers reuse. Waste Management, 120(2021), 1–9. doi:10.1016/j.wasman.2020.11.010

Bao, Q., Wong, W., Liu, S., & Tao, X. (2022). Accelerated Degradation of Poly(lactide acid)/Poly(hydroxybutyrate) (PLA/PHB) Yarns/Fabrics by UV and O2 Exposure in South China Seawater. Polymers, 14(6), 1216. doi:10.3390/polym14061216

Borsodi, N., Szentes, A., Miskolczi, N., Wu, C., & Liu, X. (2016). Carbon nanotubes synthetized from gaseous products of waste polymer pyrolysis and their application. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 120, 304–313. doi:10.1016/j.jaap.2016.05.018

Danışman Koşar, İ., & Özalp, A. G. (n.d.). the Role of Green Port Implementation in Reducing Carbon Footprint: a Case of Marport.

El Essawy, N. A., Konsowa, A. H., Elnouby, M., & Farag, H. A. (2017). A novel one-step synthesis for carbon-based nanomaterials from polyethylene terephthalate (PET) bottles waste. Journal of the Air & Waste Management Association, 67(3), 358–370. doi:10.1080/10962247.2016.1242517

Filho, J. C., Nunhes, T. V., & Oliveira, O. J. (2019). Guidelines for cleaner production implementation and management in the plastic footwear industry. Journal of Cleaner Production, 232, 822–838. doi:10.1016/j.jclepro.2019.05.343

örnekir

Gale, R. (2006). Environmental management accounting as a reflexive modernization strategy in cleaner production. Journal of Cleaner Production, 14(14), 1228–1236. doi:10.1016/j.jclepro.2005.08.008

Geyer, R. (2020). Production, use, and fate of synthetic polymers. Plastic Waste and Recycling. Elsevier Inc. doi:10.1016/b978-0-12-817880-5.00002-5

Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. Science Advances, 3(7). doi:10.1126/sciadv.1700782

Guo, X., Sun, Y., Sun, X., Li, J., Wu, J., Shi, Y., & Pan, L. (2024). Doping Engineering of Conductive Polymers and Their Application in Physical Sensors for Healthcare Monitoring. Macromolecular Rapid Communications, 45(1). doi:10.1002/marc.202300246

Kabave Kılınçarslan, S. (2023). Polimer Matrisli Kemik Tozu Takviyeli Kompozit Malzemelerin Üretimi, Karakterizasyonu ve Tribolojik Performansının İncelenmesi, 87.

Li, X., Bai, R., & McKechnie, J. (2016). Environmental and financial performance of mechanical recycling of carbon fibre reinforced polymers and comparison with conventional disposal routes. Journal of Cleaner Production, 127(2016), 451–460. doi:10.1016/j.jclepro.2016.03.139

Ma, L., Baumgartner, R., Zhang, Y., Song, Z., Cai, K., & Cheng, J. (2015). UV-responsive degradable polymers derived from 1-(4-aminophenyl) ethane-1,2-diol. Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry, 53(9), 1161–1168. doi:10.1002/pola.27550

Örnekir

Matthews, H. S., Hendrickson, C. T., & Weber, C. L. (2008). The Importance of Carbon Footprint Estimation Boundaries. Environmental Science & Technology, 42(16), 5839–5842. doi:10.1021/es703112w

Nirmala, T. V., Harikumar, S., George, A., & Reddy, A. D. (2023). Green House Gas Emissions and Mitigation Strategies for Sustainable Dairy Farming. Journal of Experimental Agriculture International, 45(11), 92–103. doi:10.9734/jeai/2023/v45i112239

Okan, M., Aydin, H. M., & Barsbay, M. (2019). Current approaches to waste polymer utilization and minimization: a review. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 94(1), 8–21. doi:10.1002/jctb.5778

Onat, E. (2016). Polimer Matrisli Kompozitlerde Matris Türünün Sürtünme ve Aşınma Özelliklerine Etkisi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.

Özlü, T. R. (2023). Polimer esasli kaymali yataklarin tribolojik özelliklerinin farkli yük ve hizlarda deneysel incelenmesi. Tokat Gazi Osmanpaşa Üniveristesi.

Prigozhin, V., Zheng, W., & Lee, F. (2023). Implementing Cleaner Production Technologies: General Aspects. E3S Web of Conferences, 392, 01006. doi:10.1051/e3sconf/202339201006

Shrestha, A., van-Eerten Jansen, M. C. A. A., & Acharya, B. (2020). Biodegradation of Bioplastic Using Anaerobic Digestion at Retention Time as per Industrial Biogas Plant and International Norms. Sustainability, 12(10), 4231. doi:10.3390/su12104231

Şişmanoğlu, S. (2020). Termoplastik Poliüretan Matrisli Ekokompozitlerin Hazırlanması Ve Karakterizasyonu. Karabük Üniversitesi.

Sönmez, M. (2009). Polimer Matrisli Kompozitlerin Endüstri Ürünleri Tasarımında Önemi ve Geleceği: Türkiye'den Dört Örnek Firma Üzerine Bir İnceleme. İstanbul Teknik Üniversitesi.

Turner, D. A., Williams, I. D., & Kemp, S. (2015). Greenhouse gas emission factors for recycling of source-segregated waste materials. Resources, Conservation and Recycling, 105, 186–197. doi:10.1016/j.resconrec.2015.10.026

Üreden, A., & Özden, S. (2018). Anadolu Orman Araştırmaları Dergisi Kurumsal Karbon Ayak İzi Nasıl Hesaplanır : Teorik Bir Çalışma How to Calculate Institutional Carbon Footprint : A Theoretical Study, 4(2), 98–108.

Vahap Vahapoğlu. (2013). Kauçuk Türü Malzemeler ve Polimer bilgisi. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi; Cilt: 4 Sayı: 1; 25-34, 4(1), 25-34–34.

Ye, L., Qi, C., Hong, J., & Ma, X. (2017). Life cycle assessment of polyvinyl chloride production and its recyclability in China. Journal of Cleaner Production, 142, 2965–2972. doi:10.1016/j.jclepro.2016.10.171

Zadeh, M. A., Aleagha, M. M., & Nia, A. B. (2018). The Development of a Cleaner Production Model and Applied Management Solutions for the Pharmaceutical Industry. Eurasian Journal of Analytical Chemistry, 13(3). doi:10.29333/ejac/85007

Zhao, Z., Mi, Y., Lu, Y., Zhu, Q., Cao, X., & Wang, N. (2023). From Biochemical Sensor to Wearable Device: The Key Role of the Conductive Polymer in the Triboelectric Nanogenerator. Biosensors, 13(6), 604. doi:10.3390/bios13060604

örnek

SIZE EFFECTS ON VIBRATIONS OF CRACKED MICROBEAMS

Duygu ATCI[1]

1. INTRODUCTION

In recent years, advancements in manufacturing techniques have enabled development of small-sized structures with diverse applications across engineering disciplines such as biomedical engineering, nanotechnology and material science. Specifically, micro sized structures, known as Microelectromechanical Systems (MEMS), have been utilized in sensor systems, actuators, resonators, micro-fluidic channels and micro-switches. Beams, due to their geometry, are among the most frequently employed structures in MEMS. The mechanical properties of microstructures differ significantly from those of large-scale structures, as observed in experimental studies (Al-Rub & Voyiadjis, 2004).

Yang et al. (2002) presented the modified couple stress theory (MCTS), including only one material length scale parameter, in addition to the two conventional Lame constants. Park & Gao (2006) applied the theory to Euler-Bernoulli beams and calculated size-dependent deflections and bending rigidity. They predicted decreased deflections and increased bending rigidity as the beam size decreases. Ma et al. (2008) used the MCTS in a Timoshenko beam model, demonstrating similar effects of size property on beam deflections. Vibrational characteristics have also been investigated using this theory.

1 Dr. Izmir Katip Çelebi University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Mechatronics Engineering, duygu.atci@ikcu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-1998-5394.

Kong et al. (2008) obtained size-dependent natural frequencies of a Bernoulli-Euler beam and indicated a notable decrease in natural frequencies as the micro size of the beam increases. Asghari et al. (2010) studied the nonlinear behavior of a Timoshenko beam model, investigating size-dependent nonlinear frequencies. Bagdatli et al. (2023) investigated the nonlinear vibrations of microbeams under magnetic fields and resting on an elastic foundation. Karimipour et al. (2020) used the modified couple stress theory on a three dimensional curvilinear coordinate system to investigate micro torus panels, while Karimipour et al. (2021) employed the theory on analyzing of wave propagation in micro-torus structures.

Other elasticity theories have also been considered for studying the size-dependency of structures. Van Vinh and Tounsi (2022) examined the dependence of nonlocal parameters on functionally graded sandwich nanoplates. Liu et al. (2022) analyzed the dynamic deflections of exponentially functionally graded nanoplates with porosities using Eringen' s nonlocal elasticity theory. Kumar et al. (2021) studied the vibration response of porous graded nanostructure based on the nonlocal continuum model. Tadi Beni et al. (2014a) employed modified strain gradient theory on electrostatic nanobridges and nanobeams. Karimipour and Tadi Beni et al. (2021) analyzed nonlinear vibrations of composite laminated toroidal shell segments using nonlocal theory. Numerous studies have implemented the effects of small size properties; for instance, functionally graded beams (Reddy, 2011; Asghari et al., 2010; Polat & Bağdatlı, 2023; Uzun & Yaylı, 2023), plates (Şimşek et al., 2015; Reddy & Kim, 2011; Karimipour et al., 2019), carbon nanotubes (Al-Shewailiah et al., 2021; Huang et al. 2021; Heidari, 2021), fluid conveying microbeams (Kural & Özkaya, 2015; Atcı & Bağdatlı, 2017a; Atcı & Bağdatlı, 2017b) and

nanobeams under non-ideal supports (Atcı, 2021) and multi supports (Yapanmış & Bağdatlı, 2021).

Cracks are common structural problems in micro/nano-sized structures, often arising during manufacturing processes or operational use. Cracks can be significant due to altering the stiffness, strength, fatigue life, potentially leading to performance derogation and structural failure in the mechanical structures. Additionally, cracks influence the dynamic behavior of microbeams, affecting their natural frequencies, mode shapes and vibrational response, which is vital for sensing and actuation applications. Understanding how cracks influence the micro structures is essential for optimizing their design and functionality in real-world applications such as resonant sensors, atomic force microscopy and microgyroscopes.

The fundamental effects of cracks on micro/nano structures have been explored in previous studies. Tadi Beni et al. (2014b) studied cracked nanobeams, indicating decreased natural frequencies with increased crack severity. Loya et al. (2009) investigated the free transverse vibrations influenced by cracks using nonlocal elasticity theory, predicting a consistent decrease in frequency parameters with increased crack severity. Akbaş (2018) has analyzed forced vibrations of cracked nanobeams. Roostai et al. (2013), using nonlocal elasticity theory, investigated nanobeams with multiple cracks. Recently, Atcı (2024) studied nonlinear vibrations of cracked microbeams, predicting that cracks causes significant decrease in natural frequencies ad affects nonlinear behavior.

In this study, the effects of cracks on transverse vibrations of microbeams considering size-dependency for different materials are presented. The presented model incorporates the size-dependency of the microstructure using MCTS. The crack is modeled by introducing a torsional spring

at the crack position, with the crack severity represented by the torsional spring coefficient. The beam model is divided into two parts connected by compatibility equations. Microbeams are made from two different materials are investigated, examining the effects of size properties, crack severity on natural frequencies and mode shapes.

2. GOVERNING EQUATIONS OF THE CRACKED MICROBEAMS

To analyze the size dependent effects on transverse vibrations of cracked microbeams, the MCTS (Yang et al., 2002) is employed. According to the theory, only one length scale parameter (l) is required in addition to conventional Lame constants. Total strain energy of a deformed isotropic linear elastic material is:

$$U = \frac{1}{2}\int_V (\sigma : \varepsilon + m : \chi) dv \quad (1)$$

where σ is stress tensor, ε is strain tensor, m is couple stress tensor and χ is the curvature tensor, which are expressed as (Yang et al., 2002):

$$\varepsilon = \frac{1}{2}[\nabla u + (\nabla u)^T] \quad (2)$$

$$\chi = \frac{1}{2}[\nabla \theta + (\nabla \theta)^T] \text{ , where } \theta = \frac{1}{2} curl\, u. \quad (3)$$

$$\sigma = \lambda tr(\varepsilon) I + 2\mu\varepsilon \quad (4)$$

$$m = 2l^2 \mu \chi \quad (5)$$

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \qquad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (6)$$

In the above equations, u is the displacement vector and θ is the rotation vector of the deformed material. λ and μ are the conventional Lame constants. An additional material length scale parameter (l) appears in Equation (5). The displacement components of a Bernoulli-Euler beam under small deformations are represented as (Park & Gao, 2006):

$$u_1 = -z\,\frac{dw}{dx}, \qquad u_2 = 0, \qquad u_3 = w(x) \tag{7}$$

where u_1, u_2, u_3 are x, y and z components of the displacement, respectively. Substituting these into stain and curvature tensors, one can obtain nonzero terms:

$$\varepsilon_{xx} = -z\frac{d^2w(x)}{dx^2} \tag{8}$$

$$\chi_{xy} = -\frac{1}{2}\frac{d^2w(x)}{dx^2} \tag{9}$$

Inserting the Equations (8) and (9) into stress and couple stress, nonzero normal stress and couple stress components are obtained:

$$\sigma_{xx} = -Ez\frac{d^2w(x)}{dx^2} \tag{10}$$

$$m_{xy} = -\mu l^2\,\frac{d^2w(x)}{dx^2} \tag{11}$$

Substituting Equations (8-11) into Equation (1), the strain energy expression is obtained. For a cracked microbeam, which is illustrated in Fig. 1, the total kinetic (T) and strain (U) energies are written as follows.

$$T = \frac{1}{2}\int_0^{\bar{l}_c} \rho A\,\dot{\bar{w}}_1{}^2 d\bar{x} + \frac{1}{2}\int_{\bar{l}_c}^{L} \rho A\,\dot{\bar{w}}_2{}^2 d\bar{x} \tag{12}$$

Örnektir

$$U = \frac{1}{2}\int_0^{\bar{l}_c}(EI + \mu Al^2)\bar{w}_1{''}^2 d\bar{x} + \frac{1}{2}\int_{\bar{l}_c}^{L}(EI + \mu Al^2)\bar{w}_2{''}^2 d\bar{x} \quad (13)$$

Transverse deflection of the microbeam is given by $\bar{w}$. ρ is the mass density, A is the cross-sectional area and I is the second moment of the are. $\bar{l}_c$ represents the crack location. The energy expressions are considered for the two segments of the beam, which are divided by the presence of the crack.

The first term of Equation (13) is the conventional term associated with the normal stress. The second term is the additional term associated with the couple stress component. Modified couple stress theory gives only one additional parameter, unlike the non-local beam models. The micro-size effect is determined by the material length scale parameter (*l*) only.

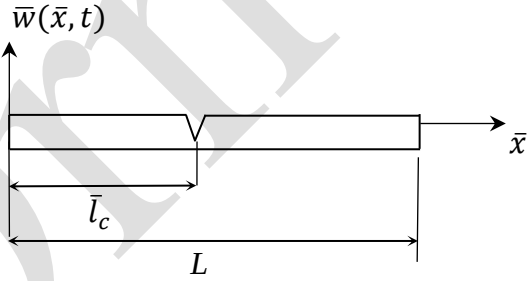


Figure 1. Schematic figure of the cracked microbeam

According to the Hamilton's principle, kinetic and potential energy of the microbeam are substituted into $\int_{t_1}^{t_2}(\delta T - \delta U)\, dt = 0$. The equations of motion becomes:

$$(EI + \mu Al^2)\bar{w}_1{}^{iv} + \rho A\ddot{\bar{w}}_1 = 0 \qquad 0 < \bar{x} < \bar{l}_c \quad (14)$$

$$(EI + \mu Al^2)\bar{w}_2{}^{iv} + \rho A\ddot{\bar{w}}_2 = 0 \qquad \bar{l}_c < \bar{x} < L \quad (15)$$

The above equations are rewritten in non-dimensional form, by introducing the non-dimensional parameters.

$$(1+\gamma){w_1}^{iv} + \ddot{w}_1 = 0 \qquad 0 < \bar{x} < l_c \qquad (16)$$

$$(1+\gamma){w_2}^{iv} + \ddot{w}_2 = 0 \qquad l_c < \bar{x} < 1 \qquad (17)$$

Table 1. Non-dimensional system parameters

$w = \frac{\bar{w}}{d}$	Transverse displacement
$x = \frac{\bar{x}}{L}$	Longitudinal axis parameter
$t = \frac{\bar{t}}{L^2}\sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$	Non-dimensional time parameter
$\gamma = \frac{\mu A l^2}{EI}$	Micro size parameter
$\omega_n = \bar{\omega}_n L^2 \sqrt{\frac{\rho A}{EI}}$	Non-dimensional natural frequency

3. SOLUTION OF EQUATION OF MOTION

The solution is assumed as $w_i(x,t) = Ae^{i\omega t}Y_i(x)$ for i=1, 2. The mode shape function is given by $Y_i(x)$ and the vibration frequency is ω. The assumed solution is inserted into Equations (16) and (17):

$$(1+\gamma)Y_i(x)^{iv} - \omega^2 Y_i(x) = 0 \qquad i = 1,2. \qquad (18)$$

The shape functions of the microbeam are written as follows:

$$Y_1(x) = c_1 e^{ir_1 x} + c_2 e^{ir_2 x} + c_3 e^{ir_3 x} + c_4 e^{ir_4 x} \quad 0 < x < l_c \quad (19)$$

$$Y_2(x) = c_5 e^{ir_1 x} + c_6 e^{ir_2 x} + c_7 e^{ir_3 x} + c_8 e^{ir_4 x} \quad l_c < x < 1 \quad (20)$$

The above equations and their derivatives; ${Y_1}^{iv}(x)$ and ${Y_2}^{iv}(x)$ are substituted into Eq. (18):

$$r_n{}^4(1+\gamma) - \omega^2 = 0 \qquad n = 1 \ldots 4 \qquad (21)$$

The roots of the above polynomial expression are solved and substituted into Equations (19) and (20). The crack in the microbeam is modeled by introducing a torsional spring, having the change of angle $\Delta\theta = K_t \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$ [39], where *Kt* is the rotational flexibility coefficient of the spring. Hence, *Kt* corresponds to the severity of the crack in the model. The microbeam is considered to consist of two segments attached to each other through the torsional spring. By introducing, the compatibility equations, the displacement, slope, bending and shear conditions at the crack position are considered:

$$\begin{gathered} Y_1(l_c) = Y_2(l_c) \\ Y_2'(l_c) - Y_1'(l_c) - K_t Y_1''(l_c) = 0 \\ Y_1''(l_c) = Y_2''(l_c) \\ Y_1'''(l_c) = Y_2'''(l_c) \end{gathered} \qquad (22)$$

The compatibility conditions and the clamped-free boundary conditions are employed by using the shape functions given in Equations (19) and (20). A set of linear equations are obtained and the non-dimensional natural frequencies are calculated by setting the determinant of the coefficient matrix to zero.

4. RESULTS AND DISCUSSION

The effects of the crack severity, size parameters and the beam material are discussed. As a numerical example, cracked microcantilevers with the physical parameters listed in Table 2 are considered. The beam has a rectangular cross-section with width b and height h, where $A=bh$ and $I=bh3/12$.

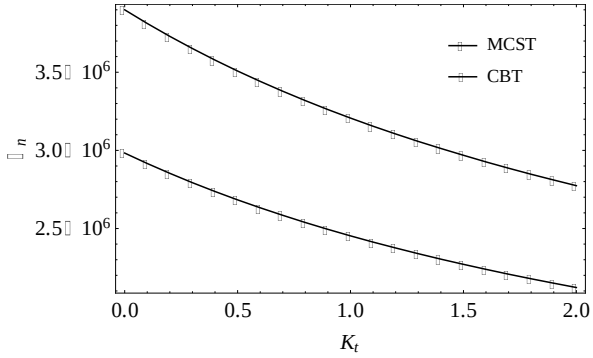
Steel and epoxy microcantilevers are considered as two numerical examples to demonstrate the small size effects of different materials. The material length scale parameter is taken as $l=6.9\ \mu m$ for a steel microbeam and $l=17.6\ \mu m$ for epoxy microbeam (Lam et al., 2003).

Table 2. Physical properties of the cracked microbeam

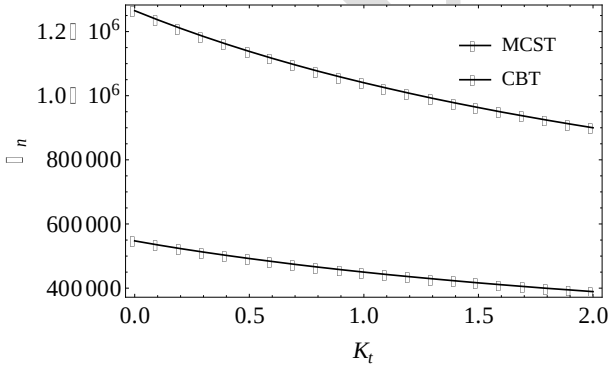
Material of the beam	Poisson's ratio (ν)	Mass density (kg/m^3)	Modulus of Elasticity (GPa)	Material Length Scale Parameter (μm)
Steel	0.3	7850	210	6.9
Epoxy	0.38	1600	1.44	17.6

In Fig. 2, the natural frequencies of steel and epoxy microbeams with crack are presented. The crack location is lc=0.5. Size properties of both steel and epoxy beams are taken as $b=h$=20 μm and L=200 μm. The results are obtained by using the MCST and the classical beam theory. The frequencies calculated by MCTS are higher than the results of the classical beam theory for both steel and epoxy microbeams. Specifically, natural frequencies of epoxy microbeam has a significant difference for two approaches. It is related with the lower stiffness property of the epoxy microbeam, causing more sensitivity to the size effects.

örnektir



(A) Steel



(B) Epoxy

Fig 2. Natural frequencies (Hz) of cracked microbeams with respect to the crack severity.

Mode shapes of the first mode vibrations of a cracked microcantilever with varying crack severities are illustrated at Fig. 3. The influence of the crack, which is located at the midpoint of the beam is seen clearly. The non-dimensional transverse deflections increases as the crack severity increases. The tip point displacements of microcantilevers significantly increases with the presence of the crack. The mode shapes are consistent for two different types of materials; hence, they are illustrated by using non-dimensional parameters.

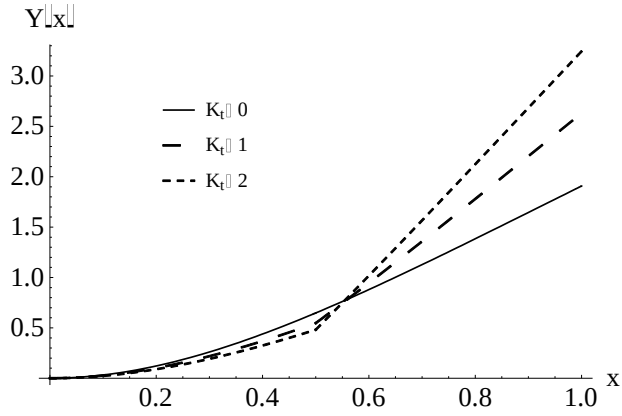


Fig 3. Mode shapes of cracked microcantilevers with varying crack severities for the first mode of vibration.

In Figs. 4 and 5, the first mode natural frequencies with respect to the crack severity are considered for steel and epoxy microbeams, respectively. Varying cross sectional sizes have been applied to demonstrate the size-dependency of the microbeams. For both steel and epoxy materials, the natural frequencies decrease significantly when the cross sectional area increases. It is related with the micro size effect, which leads higher natural frequencies for smaller sized microstructures. Increase in natural frequencies becomes more remarkable when the beam size decreases. Moreover, it is seen from the Fig. 4 and 5 that, epoxy microbeams have higher sensitivity to the size property, as they have more pronounced increase in the natural frequency when the size property h is decreased. Additionally, the frequencies decrease significantly with the increasing crack severity, which is more remarkable for the smaller sized beams. Specifically, the decrease in natural frequency of the microbeam with h=20μm is more noticeable than the decrease observed in the microbeams with h=100 μm. Microbeams having smaller size parameters are seen to be more sensitive to the presence of the crack. This result is consistent for both steel and epoxy materials.

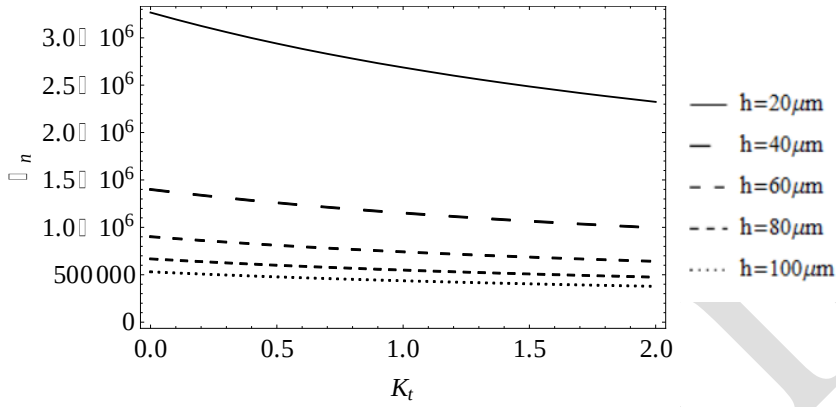


Figure 4. Size-dependent natural frequencies (Hz) of steel microcantilevers with respect to the crack severity.

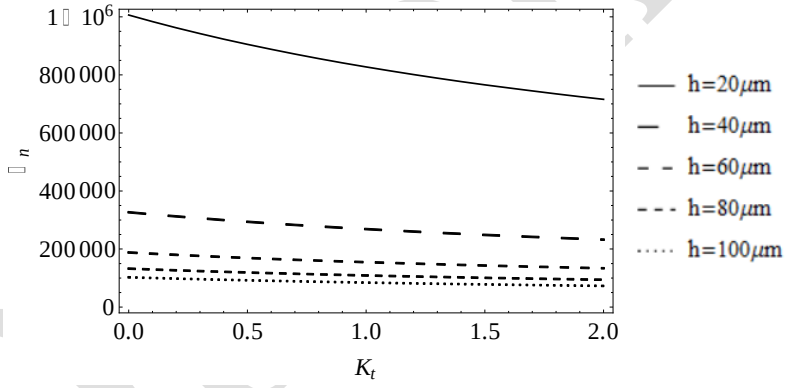


Figure 5. Size-dependent natural frequencies (Hz) of epoxy microcantilevers with respect to the crack severity.

Effects of micro size and the presence of the crack have been investigated by considering both epoxy and steel microcantilevers, to clearly demonstrate the size-dependency of different types of materials. The following results have been concluded from the present study:

Epoxy microbeams have been observed to be more sensitive to the micro size properties than steel microbeams. The size-dependency of the steel microbeams is less than that of

epoxy microbeams due to their higher stiffness and rigidity properties.

Due to their higher stiffness, the dimensional natural frequencies of the steel microbeams are higher than those of epoxy microbeams.

The mode shapes of the first mode vibrations of steel and epoxy microbeams have been plotted. Both materials are similarly influenced by the presence of the crack. The tip point deflections of both microbeams increase significantly as the crack severity increases, highlighting the critical role of cracks in physical applications of microbeamss in sensing, actuation and manipulation tasks, especially for atomic force microscopy and micro-manipulators, where the precise control of microbeams becomes crucial.

For steel and epoxy microbeams, natural frequencies decrease as the cross-sectional parameters increase. This decrease is more pronounced for epoxy microbeams than for steel microcantilevers.

5. REFERENCES

Abu Al-Rub, R. K, & Voyiadjis, G. Z. (2004). Analytical and experimental determination of the material intrinsic length scale of strain gradient plasticity theory from micro- and nano-indentation experiments. *International Journal of Plasticity*, 20(6), 1139-1182.

Akbaş, Ş. D. (2018). Forced vibration analysis of cracked nanobeams. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, *40*(8).

Al-Shewailiah, D. M. R., & Al-Shujairi, M. A. (2021). Static bending of functionally graded single-walled carbon nanotube conjunction with modified couple stress theory. *Materials Today Proceedings*, *61*, 1023–1037.

Asghari, M., Ahmadian, M., Kahrobaiyan, M., & Rahaeifard, M. (2009). On the size-dependent behavior of functionally graded micro-beams. *Materials & Design (1980-2015)*, *31*(5), 2324–2329.

Asghari, M., Kahrobaiyan, M., & Ahmadian, M. (2010). A nonlinear Timoshenko beam formulation based on the modified couple stress theory. *International Journal of Engineering Science*, *48*(12), 1749–1761.

Atcı, D. (2024). Nonlinear vibrations of cracked microbeams based on modified couple stress theory. *European Journal of Mechanics - a/Solids*, *106*, 105321.

Atcı, D., & Bağdatlı, S. M. (2017a). Free vibrations of fluid conveying microbeams under non-ideal boundary conditions. *Steel and Composite Structures*, *24*(2), 141.

Atcı, D., & Bağdatlı, S. M. (2017b). Vibrations of fluid conveying microbeams under non-ideal boundary conditions. *Microsystem Technologies*, *23*(10), 4741–4752.

Atcı, D. (2021). Free vibrations of nanobeams under non-ideal supports based on modified couple stress theory. *Zeitschrift Für Naturforschung A*, *76*(5), 427–434.

Bağdatlı, S. M., Togun, N., Yapanmış, B. E., & Akkoca, Ş. (2023). Nonlinear vibration of microbeams subjected to a uniform magnetic field and rested on nonlinear elastic foundation. *Zeitschrift Für Naturforschung A*, *79*(1), 17-30.

Beni, Y. T., Karimipour, I., & Abadyan, M. (2014a). Modeling the instability of electrostatic nano-bridges and nano-cantilevers using modified strain gradient theory. *Applied Mathematical Modelling*, *39*(9), 2633–2648.

Beni, Y. T., Jafaria, A., & Razavi, H. (2014b). Size Effect on Free Transverse Vibration of Cracked Nano-beams using Couple Stress Theory. *International Journal of Engineering*, *28*(2 (B)).

Heidari, F., Taheri, K., Sheybani, M., Janghorban, M., & Tounsi, A. (2021). On the mechanics of nanocomposites reinforced by wavy/defected/aggregated nanotubes. *Steel and Composite Structures*, *38*(5), 533–545.

Huang, Y., Karami, B., Shahsavari, D., & Tounsi, A. (2021). Static stability analysis of carbon nanotube reinforced polymeric composite doubly curved micro-shell panels. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, *21*(4).

Karimipour, I., Beni, Y. T., & Akbarzadeh, A. (2019). Size-dependent nonlinear forced vibration and dynamic stability of electrically actuated micro-plates. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, *78*, 104856.

Örnekti

Karimipour, I., Beni, Y. T., & Akbarzadeh, A. H. (2020). Modified couple stress theory for three-dimensional elasticity in curvilinear coordinate system: application to micro torus panels. *Meccanica*, *55*(10), 2033–2073.

Karimipour, I., Beni, Y. T., Arvin, H., & Akbarzadeh, A. (2021). Dynamic wave propagation in micro-torus structures: Implementing a 3D physically realistic theory. *Thin-Walled Structures*, *165*, 107995.

Karimipour, I., & Beni, Y. T. (2021). Nonlinear dynamic analysis of nonlocal composite laminated toroidal shell segments subjected to mechanical shock. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, *106*, 106105.

Kong, S., Zhou, S., Nie, Z., & Wang, K. (2008). The size-dependent natural frequency of Bernoulli–Euler micro-beams. *International Journal of Engineering Science*, *46*(5), 427–437.

Kumar, Y., Gupta, A., & Tounsi, A. (2021). Size-dependent vibration response of porous graded nanostructure with FEM and nonlocal continuum model. *Advances in Nano Research*, *11*(1), 001.

Kural, S., & Özkaya, E. (2015). Size-dependent vibrations of a micro beam conveying fluid and resting on an elastic foundation. *Journal of Vibration and Control*, *23*(7), 1106–1114.

Lam, D., Yang, F., Chong, A., Wang, J., & Tong, P. (2003). Experiments and theory in strain gradient elasticity. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, *51*(8), 1477–1508.

Liu, G., Wu, S., Shahsavari, D., Karami, B., & Tounsi, A. (2022). Dynamics of imperfect inhomogeneous nanoplate with exponentially-varying properties resting on viscoelastic foundation. *European Journal of Mechanics - a/Solids*, *95*, 104649.

Loya, J., López-Puente, J., Zaera, R., & Fernández-Sáez, J. (2009). Free transverse vibrations of cracked nanobeams using a nonlocal elasticity model. *Journal of Applied Physics*, *105*(4).

Ma, H., Gao, X., & Reddy, J. (2008). A microstructure-dependent Timoshenko beam model based on a modified couple stress theory. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, *56*(12), 3379–3391.

Park, S. K., & Gao, X. (2006). Bernoulli–Euler beam model based on a modified couple stress theory. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, *16*(11), 2355–2359.

Polat, S. C., & Bağdatlı, S. M. (2023). Investigation of stepped microbeam vibration motions according to modified couple stress theory. *Zeitschrift Für Naturforschung A*, 78(5), 379–393.

Reddy, J. (2011). Microstructure-dependent couple stress theories of functionally graded beams. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, *59*(11), 2382–2399.

Reddy, J., & Kim, J. (2011). A nonlinear modified couple stress-based third-order theory of functionally graded plates. *Composite Structures*, *94*(3), 1128–1143.

Roostai, H., & Haghpanahi, M. (2013). Vibration of nanobeams of different boundary conditions with multiple cracks based on nonlocal elasticity theory. *Applied Mathematical Modelling*, *38*(3), 1159–1169.

Şimşek, M., Aydın, M., Yurtcu, H. H., & Reddy, J. N. (2015). Size-dependent vibration of a microplate under the action of a moving load based on the modified couple stress theory. *Acta Mechanica*, *226*(11), 3807–3822.

Uzun, B., & Yaylı, M. Ö. (2023). Porosity effects on the dynamic response of arbitrary restrained FG nanobeam based on the MCST. *Zeitschrift Für Naturforschung A*, *79*(2), 183–197.

Van Vinh, P., & Tounsi, A. (2021). The role of spatial variation of the nonlocal parameter on the free vibration of functionally graded sandwich nanoplates. *Engineering with Computers*, *38*(S5), 4301–4319.

Yang, F., Chong, A., Lam, D., & Tong, P. (2002). Couple stress based strain gradient theory for elasticity. *International Journal of Solids and Structures*, *39*(10), 2731–2743.

Yapanmış, B. E., & Bağdatlı, S. M. (2021). Investigation of the non-linear vibration behaviour and 3:1 internal resonance of the multi supported nanobeam. *Zeitschrift Für Naturforschung A*, *77*(4), 305–321.

Örnektir

WIND TUNNELS AND DESIGN DETAILS

Mustafa Arif ÖZGÜR[1]
Samet Giray TUNCA[2]
Kadir OLCAY[3]
Onur KOŞAR[4]

1. INTRODUCTION

Wind tunnel applications hold significant importance in aerodynamic studies. These applications are used to determine the characteristics of the flow. Wind tunnels provide an environment that simulates real conditions by controlling the flow at a specific speed. Simulation, on the other hand, allows for the comparison of data obtained from experimental methods with results derived from numerical techniques.

2. THE HISTORY OF WIND TUNNELS

The concept of wind tunnels dates back to the 15th century. According to Leonardo Da Vinci's theory of relativity, objects moving in still air and objects facing the airflow experience the same effects. Leonardo Da Vinci also designed an anemometer to measure wind speed. In his design, a plate

1 Prof.Dr.,Kütahya Dumlupınar University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, arif.ozgur@dpu.edu.tr ORCID: 0000-0001-5877-4293

2 Dr., Kütahya Dumlupınar University Dumlupınar Vocational School Department of Electricity and Energy sgiray.tunca@dpu.edu.tr ORCID: 0000-0002-7632-8745

3 Dr., Kütahya Dumlupınar University Dumlupınar Vocational School Department of Electricity and Energy kadir.olcay@dpu.edu.tr ORCID: 0000-0001-7918-6482

4 Asst. Prof.,Kütahya Dumlupınar University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, onur.kosar@dpu.edu.tr ORCID: 0000-0001-7335-7076

suspended in the anemometer could move according to the wind speed. The wind speed/force could be measured based on the highest point the plate reached. While the foundations of wind tunnels were being laid, rotating arm mechanisms were designed in Europe and the UK to move objects in still air, and these mechanisms were used in research. Essentially, these setups involved attaching objects to a rotating shaft system, which was driven by weights connected to pulleys, enabling the objects to move in stationary air. The first known wind tunnel in Great Britain operated using a compressed air propeller (Wenham Francis, 1871, later followed by Horatio Phillips, 1884), but later wind tunnels were powered by fans placed in front of the test section. Examples include Charles Renard (France, 1896), Hiram Maxim (Great Britain, 1896), Konstantin Tsiolkovsky (Russia, 1897), Orville and Wilbur Wright (USA, 1901), and Auguste Rateau (France, 1909). The first development in wind tunnel setup was the use of a collector. The Wright brothers designed a wind tunnel with a 40x40 cm test section and used it in their research. As a result of their work, the Wright brothers achieved the first flight in history (Aslan, Z. 2016).

Gustave Eiffel (1832-1923) is an important figure in engineering and technology history. Among his most significant works are the Porto Viaduct in Portugal, the supporting structure of the Statue of Liberty in New York Harbor, and the Eiffel Tower in Paris, which he is also credited with designing. This long and successful career earned him significant wealth, and towards the end of his life, he decided to invest in the emerging research field of "aviation." In 1909, he built one of the first wind tunnels dedicated to the study of "aerodynamics" at the base of his famous tower (Chanetz, B. 2017). Eiffel completed this wind tunnel and began experiments in 1909. One of the test programs was to systematically test data obtained from falling tests to validate the tunnel's performance. The forces measured

in the wind tunnel matched those obtained during the falling tests, marking the first true test of relative motion theory, and the data confirmed its validity. Due to Eiffel's fame, many pioneering aircraft manufacturers sought him out to test their wing and propeller designs. Between 1909 and 1912, Eiffel conducted over 4,000 tests in this tunnel, setting a new standard for systematic experiments in aviation research (Damljanović, D. 2012).

In later designs, the fan test section was placed downstream to prevent interaction between the model and the fan, ensuring the quality of the flow. Based on this principle, the following wind tunnels were designed: Nikolai Zhukovsky (Russia, 1902), Thomas Stanton (UK, 1903), Dimitri Riabouchinsky (Russia, 1905), and Gustave Eiffel (France, 1909). A notable innovation by Eiffel was the diffuser, which was the subject of a patent dated November 28, 1911: "The addition of a diffuser to improve the performance of a machine designed to generate artificial air flow."

Punkhurst and Holder (1952) discussed the methods of conducting wind tunnel experiments, the types of balances used, and force-moment calculations (Punkhurst, R. C., & Holder, D. W. 1952). P. Bradshaw (1965) examined the formation of boundary layer flows in wind tunnels and described methods to eliminate boundary layer effects without causing flow irregularities (Bradshaw, P. 1965). Gorlin and Slezinger (1966) provided explanatory information on wind tunnel types, components, experimental types, and the manufacturing and assembly of wind tunnel components (Gorlin, S. M., & Slezinger, I. I. 1966).

K. R. Cooper and W. F. Campbell (1981) utilized data obtained from wind tunnel experiments and full-scale aerodynamic friction measurements on trucks to demonstrate the

effects of wind turbulence. To better represent road conditions, they attempted to predict these effects using the partial-sum average of smooth flow wind tunnel data, which allowed for the adjustment of the data. Although the theory did not fully explain the behavior observed under turbulent conditions, it was still able to predict some general trends observed in turbulent flow wind tunnel tests (Cooper, K. R., & Campbell, W. F. 1981).

C. Kramer and H. J. Gerhardt (1985) briefly outlined different types of wind tunnels for industrial aerodynamics. They extensively addressed the parameters affecting the reliability of test results in wind tunnels. In smooth flow, for wind tunnels used in building aerodynamics research, they discussed the effects of obstruction on the friction coefficient and the pressure distribution around simple bodies. Comparison test results for full-scale car aerodynamic wind tunnels were reported, and the physical causes of the differences were discussed. Most of the differences were found to be due to inappropriate flow conditions in open test sections. An example of air inlet calculation for an open jet was presented based on the new jet calculation method developed by Regenscheit (Kramer, C., & Gerhardt, H. J. 1984).

Today, wind tunnels have a wide range of applications, from performance analysis in industries such as aerospace and automotive to renewable energy and urban planning. In the aerospace industry, they still play an indispensable role in verifying and optimizing the aerodynamic properties of aircraft designs. Specifically, low-speed wind tunnels are used for laminar flow control systems, turbulence studies, and aeroelastic testing, improving the accuracy of simulation results (Aerospace Testing International, 2018). These facilities are crucial tools for testing, optimizing, and analyzing aerodynamic forces and flow dynamics. In the renewable energy sector, wind tunnels used in the design of wind turbine blades play a critical role in

enhancing turbine performance and reducing energy production costs. The aerodynamic properties of turbine rotors and components are studied under various turbulence conditions, leading to the development of more efficient designs (Mishra, R. 2023). In current projects, both open and closed-circuit wind tunnels are preferred to improve the aerodynamic efficiency of turbine blades and enhance their acoustic performance. Furthermore, in the automotive sector, wind tunnels continue to be a critical tool for optimizing vehicle aerodynamics, reducing the drag coefficient, and improving fuel efficiency (MIT, 2023). These innovations enable more reliable and efficient engineering solutions in the aerospace and energy industries (Modern developments in hypersonic wind tunnels, 2023).

3. WIND TUNNEL DESIGN

Wind tunnels are engineering systems used to control and analyze airflow. These tunnels are designed for various purposes such as aerodynamic testing, force and moment measurements, flow visualization, and performance analysis. A well-designed wind tunnel ensures low turbulence levels, uniform flow, and minimal energy losses to reliably replicate the behavior of the tested model (Barlow et al., 1999).

3.1. Main Components of a Wind Tunnel

3.1.1. Inlet Section

The inlet section directs airflow into the tunnel in a controlled manner. It typically includes air filters or honeycomb structures to reduce turbulence and create a uniform velocity profile (Mehta & Bradshaw, 1979).

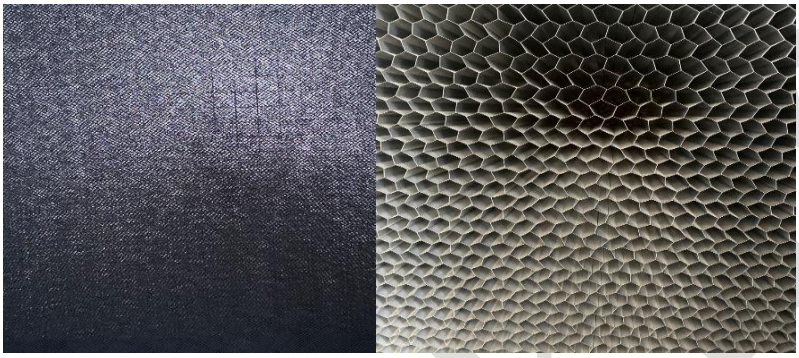


Figure 1. Mesh and Bellows Type Honeycomb Separator Appearances



Figure 2. Inlet Section

3.1.2. Contraction Cone

This component increases the flow velocity and reduces turbulence. The contraction ratio plays a critical role in achieving a smooth velocity profile and minimizing turbulence levels. Research indicates that a sufficiently high contraction ratio significantly reduces turbulence intensity (Hunt & Bradshaw, 1976).



Figure 3. Contraction Cone

3.1.3. Test Section

This is the primary region where the model is placed, and tests are conducted. Force and moment measurements, flow visualization studies, and surface pressure analyses are performed in this section (Barlow et al., 1999).



Figure 4. Test Chamber Wing Layout

3.1.4. Diffuser

The diffuser decelerates the flow exiting the test section, increasing the pressure and reducing energy losses. Proper diffuser design prevents sudden expansion losses and enhances overall efficiency (Bell & Mehta, 1988).

3.1.5. Drive System

The drive system consists of fans or propellers that generate airflow through the tunnel. The aerodynamic efficiency of the fan directly impacts the overall performance of the wind tunnel (Schetz, 2001).

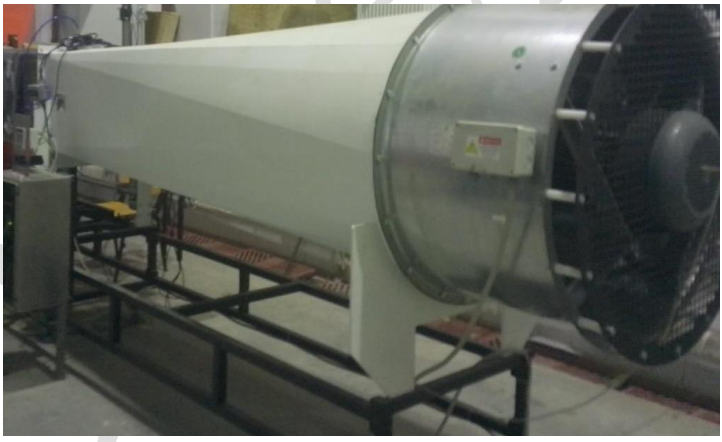


Figure 5. Wind tunnel diffuser and fan section

3.1.6. Return Passages

In closed-circuit wind tunnels, return passages recycle airflow back to the test section, ensuring energy efficiency and maintaining uniform flow conditions (Barlow et al., 1999).

4. KEY CONSIDERATIONS IN WIND TUNNEL DESIGN

Turbulence intensity is one of the most critical parameters in wind tunnel design.(Hunt & Bradshaw, 1976). The Reynolds number range must align with the size of the model and the flow velocity. It is essential to accurately replicate the real-world behavior of the model (Barlow et al., 1999). The velocity range of the wind tunnel should be determined based on the testing requirements. Subsonic, transonic, and supersonic tunnels are optimized for different speed regimes (Pope & Goin, 1978). At the same time the contraction ratio and flow straightening elements used in the inlet section are critical for ensuring a uniform velocity profile (Smits & Lim, 2019). In addition to experimental studies, CFD simulations can be utilized for the comparison of the obtained data. Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations are employed during the design phase to validate and optimize the wind tunnel's performance (Schetz, 2001). Furthermore incorporating features such as diffuser optimization and closed-circuit systems significantly reduces energy losses (Bell & Mehta, 1988).

5. CLASSIFICATION OF WIND TUNNELS

Wind tunnels can be classified into two main categories based on their design features and airflow speeds. From a design perspective, wind tunnels are divided into two types based on their circulation: closed-circuit and open-circuit wind tunnels. In closed-circuit wind tunnels, air continuously circulates in a loop within the system. In open-circuit wind tunnels, air is expelled outside after passing through the test section.

Based on airflow speeds, wind tunnels are categorized into five different types. Subsonic wind tunnels have airflow speeds below the speed of sound. Wind tunnels that approach or exceed the speed of sound are referred to as transonic wind

tunnels. Supersonic wind tunnels have airflow that exceeds the speed of sound. Hypersonic wind tunnels are used to study spacecraft and operate at Mach numbers between 5 and 15. Hyper-hypersonic wind tunnels are designed for complex flight conditions that study the thermal changes of atmospheric entry and exit flights, with Mach numbers exceeding 15. These classifications demonstrate how wind tunnels can be adapted to various design requirements and testing needs.

5.1. Classification According to Circulation Type

5.1.1. Closed-Circuit Wind Tunnel

Closed-circuit wind tunnels are systems in which the airflow circulates within a closed loop (Gökçe, 2020). As shown in Figure 6, the loop system allows the air within the tunnel to be reused repeatedly. This continuous airflow in a loop enables the creation of test conditions that can be consistently repeated. Closed-circuit wind tunnels are typically preferred for small-scale tests (Mehta & Bradshaw, 1979). These tunnels are used to evaluate the aerodynamic performance of building designs, vehicle models, and small-scale projects. In these systems, where airflow can be controlled in a managed way, specific flow conditions can be simulated to provide various testing opportunities.

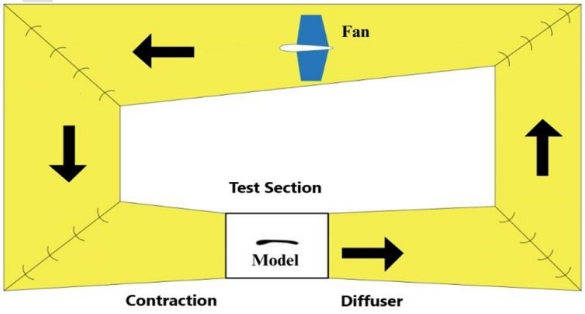


Figure 6. Closed-Circuit Wind Tunnel
Reference: Tunca, 2024.

5.1.2. Open-Circuit Wind Tunnels

Open-circuit wind tunnels are tunnels in which the airflow is expelled from the system after passing through the test section (Uçar, 2022). In the system shown in Figure 7, since there is no closed loop, the same air mass is not reused. These types of wind tunnels allow for the aerodynamic analysis of many structures. Because they interact directly with the atmosphere, it is possible to create more realistic natural conditions (Pope & Goin, 1978). Furthermore, open-circuit wind tunnels typically allow for higher airflow speeds, which enables experiments that require high speeds, such as supersonic tests.

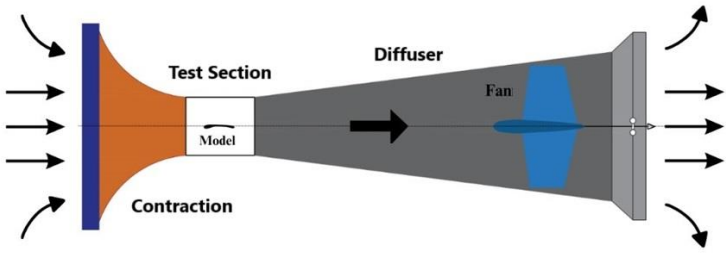


Figure 7. Open-Circuit Wind Tunnel

Reference: Tunca, 2024..

Open-circuit wind tunnels are commonly used for aerodynamic testing in industries such as automotive, construction, energy, and other large-scale projects. In these tunnels, the air used during testing is expelled and interacts with the environment, providing a suitable setting for large-scale tests. There are two primary designs for airflow in open-circuit wind tunnels. The first design is the blower-type system, where the fan and motor are located before the test section. The second design is the suction-type system, where the fan creates airflow after the test section.

In both designs, the air, which is open to the atmosphere, is accelerated through a collector shaped like a narrowing cone and reaches its highest speed when it reaches the test section. Proper design of the collector geometry is crucial to improving the flow quality in the test section. In suction-type wind tunnels, the flow disturbances caused by the fan have minimal impact on the airflow in the test section and are usually negligible. Therefore, suction-type designs are more commonly preferred in wind tunnels, as they offer advantages in providing more stable and easily controllable airflow.

5.2. Classification According to Flow Speed

5.2.1. Subsonic Wind Tunnels

Subsonic wind tunnels have airflow speeds ranging from Mach 0 to Mach 0.3 (0–100 m/s). These tunnels are ideal for aerodynamic testing of small-scale models and are frequently used in architectural and engineering projects. Aerodynamic analyses of building designs, vehicles, and sports equipment are often conducted in subsonic tunnels. Low-speed wind tunnels are widely used due to their ability to perform precise and detailed measurements at low speeds.

5.2.2. Transonic Wind Tunnels

Transonic wind tunnels operate with airflow speeds between Mach 0.3 and Mach 1.0 (100–340 m/s). These tunnels are used to study the aerodynamic behavior of aircraft wing profiles and other aviation components at speeds near the speed of sound. The transonic speed range is particularly important for aircraft, as significant changes in flow characteristics occur at these speeds. Transonic wind tunnels provide suitable test conditions for performing these critical analyses.

5.2.3. Supersonic Wind Tunnels

Supersonic wind tunnels have airflow speeds ranging from Mach 1.0 to Mach 5.0 (340–1700 m/s). These tunnels are suitable for aerodynamic testing of high-speed vehicles such as supersonic aircraft, rockets, and missiles. By simulating high-speed flow conditions, supersonic wind tunnels allow for the detailed examination of aerodynamic performance and structural integrity during supersonic flight and maneuvers.

5.2.4. Hypersonic Wind Tunnels

Hypersonic wind tunnels operate with airflow speeds between Mach 5.0 and Mach 15.0 (1700–5100 m/s). These tunnels are used for studying the aerodynamic properties of spacecraft, ballistic missiles, and hypersonic aircraft. At hypersonic speeds, high-speed aerodynamics and thermal effects become crucial. These tunnels provide ideal test conditions for advanced aerodynamic and thermodynamic analyses (Houghton & Carpenter, 2016).

5.2.5. Hyper-Hypersonic Wind Tunnels

Hyper-hypersonic wind tunnels simulate airflow speeds above Mach 15.0 (5100 m/s and beyond). These tunnels are used for testing atmospheric entry and exit vehicles and advanced hypersonic flight systems. At these extreme speeds, the flow dynamics and thermal effects become highly complex. These tunnels are of significant importance due to their ability to simulate these challenging conditions (Houghton & Carpenter, 2016).

Each type of wind tunnel is designed to examine flow conditions within specific speed ranges and is optimized for different applications and testing needs.

6. BASIC MATHEMATICAL PRINCIPLES OF WIND TUNNEL DESIGN

The mathematical modeling of wind tunnels is crucial for enhancing the accuracy of aerodynamic tests and simulating various physical effects (Pusch, M., & Kier, T. 2020). Such modeling leverages fluid mechanics and aerodynamic theories to improve the accuracy of experimental studies and reduce costs (Dong, J., et al. 2024).

6.1. Air Flow Rate (Velocity Based Calculations)

The Bernoulli equation is used to calculate the air flow velocity (V) in the wind tunnel.

$$Pt = Ps + \frac{1}{2}\rho V^2$$

Pt: Total pressure (Pa)

Ps: Static pressure (Pa)

ρ: Density of air (kg/m³)

V: Air flow rate (m/s)

Flow rate can be found from the difference between static and total pressure:

$$V = \sqrt{\frac{2(Pt - Ps)}{\rho}}$$

6.2. Dimensional Similarity and Reynolds Number

Reynolds number is used to ensure dimensional uniformity in wind tunnel design:

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu}$$

Örnektir

L: Characteristic length (m)

μ: Dynamic viscosity (Pa s)

During design, the Reynolds number needs to be simulated realistically for the target model.

6.3. Energy Consumption

The fan's energy requirement calculation is done as follows:

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3$$

P: Power requirement (W)

A: Wind tunnel cross-sectional area (m^2)

V: Flow rate (m/s)

The energy requirement depends on the air flow rate and the dimensions of the wind tunnel.

6.4. Effect of Tunnel Walls

The effect of tunnel walls on the flow is used to analyze velocity profiles. The wall effect coefficient (K_w) can be calculated as:

$$K_w = \frac{h}{D}$$

h: Tunnel height (m)

D: Tunnel diameter or width (m)

7. CONCLUSION

The design of wind tunnels is a critical element that directly affects the accuracy and reliability of aerodynamic tests. A well-designed wind tunnel ensures that the airflow is directed properly and turbulence levels are kept under control. In this

örnektir

way, force and moment measurements on the tested model can be obtained with high accuracy. In particular, modeling the flow conditions is of great importance in terms of reflecting the real-life performance of the tested model.

The design of these tunnels, which are used to pre-evaluate the performance of prototypes in the aviation, automotive and energy sectors, plays a critical role not only in terms of accuracy, but also in terms of cost-effectiveness and experimental repeatability. Minimizing the factors that disrupt the flow characteristics and ensuring a homogeneous velocity distribution in the test area are essential for obtaining reliable results.

In addition, wind tunnels are used not only to examine basic parameters such as speed and pressure, but also to perform detailed flow analyses with flow visualization techniques. This reveals the details that need to be considered in the design phase, especially to understand complex flow phenomena such as laminar-separation bubbles.

Örnektir

8. REFERENCE

Aerospace Testing International. (2018). The future role of wind tunnels in test and development. Retrieved from https://www.aerospacetestinginternational.com

Aslan, Z. (2016). Sesaltı rüzgar tüneli tasarımı (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Ulusal Tez Merkezi.

Barlow, J. B., Rae, W. H., & Pope, A. (1999). *Low-Speed Wind Tunnel Testing* (3rd ed.). Wiley-Interscience.

Bell, J. H., & Mehta, R. D. (1988). Contraction design for small low-speed wind tunnels. *NASA Technical Paper 3424*.

Bradshaw, P. (1965). The effect of wind tunnel screens on nominally two-dimensional boundary layers. Journal of Fluid Mechanics, 22, 679-687. https://doi.org/10.1017/S0022112065000923

Chanetz, B. (2017). A century of wind tunnels since Eiffel. Comptes Rendus Mécanique, 345(8), 581-594. https://doi.org/10.1016/j.crme.2017.05.012

Cooper, K. R., & Campbell, W. F. (1981). An examination of the effects of wind turbulence on the aerodynamic drag of vehicles. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 9(1-2), 167-180. https://doi.org/10.1016/0167-6105(81)90014-7

Damljanović, D. (2012). Gustave Eiffel and the Wind: A Pioneer in Experimental Aerodynamics. Scientific Technical Review, 62(3-4), 3-13.

Dong, J., et al. (2024). Full-Scale/Model Test Comparisons to Validate the Traditional Atmospheric Boundary Layer Wind Tunnel Tests. DOI: 10.3390/app14020782.

örnektir

Gorlin, S. M., & Slezinger, I. I. (1966). Wind tunnels and their instrumentations. Moscow, Russia: John Wiley & Sons.

Gökçe, H. (2020). Kapalı devre ses altı rüzgar tüneli için türbülans perdesi tasarımı, üretimi ve bütünleme sürecinin incelenmesi. Selcuk University Journal of Engineering Sciences, 19(3), 84-93.

Hunt, J. C. R., & Bradshaw, P. (1976). The effect of wind tunnel contraction on turbulence. *Journal of Fluid Mechanics, 76*(3), 531–563. https://doi.org/10.1017/S0022112076000745

Kramer, C., & Gerhardt, H. J. (1984). Wind tunnels for industrial aerodynamics. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 16, 225. https://doi.org/10.1016/0167-6105(84)90035-0

Massachusetts Institute of Technology (MIT). (2023). MIT unveils new Wright Brothers Wind Tunnel. Retrieved from https://news.mit.edu

Mehta, R. D., & Bradshaw, P. (1979). Design rules for small low-speed wind tunnels. *Aeronautical Journal, 83*(827), 443–449. https://doi.org/10.1017/S000192400003045X

Mishra, R. (2023). Developing a digital twin framework for wind tunnel testing. Wind Energy Science. https://doi.org/10.5194/wes-2023-70

Modern developments in hypersonic wind tunnels. (2023). The Aeronautical Journal. Cambridge Core. https://doi.org/10.1017/aeronautical-2023

Pope, A., & Goin, K. L. (1978). *High-Speed Wind Tunnel Testing*. Wiley.

Punkhurst, R. C., & Holder, D. W. (1952). Wind tunnel technique. London, UK: Sir Isaac Pitman & Sons.

Pusch, M., & Kier, T. (2020). Design and Optimization of an Aeroservoelastic Wind Tunnel Model. Fluids, 5(1), 35. https://doi.org/10.3390/fluids5010035【65†source】.

Schetz, J. A. (2001). *Aerodynamics of Wind Tunnel Design*. Wiley.

Smits, A. J., & Lim, T. T. (2019). *Flow Visualization: Techniques and Examples*. Cambridge University Press.

Tunca, S. G. (2024). Biyo-esinlenmeli Kanat Modelinin Ses Altı Rüzgar Tünelinde Aerodinamik Karakteristiğinin İncelenmesi. Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.

Uçar, R. (2022). Ses altı açık çevrimli bir rüzgar tüneli tasarımı, kurulumu ve sayısal analizi (Yüksek Lisans Tezi). Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik.

Örnektir

ENDÜSTRİYEL ISIL PROSESLER İÇİN ATIK ISI GERİ KAZANIMLI YÜKSEK SICAKLIKLI ISI POMPALARI

Ahmet ÇAĞLAR*

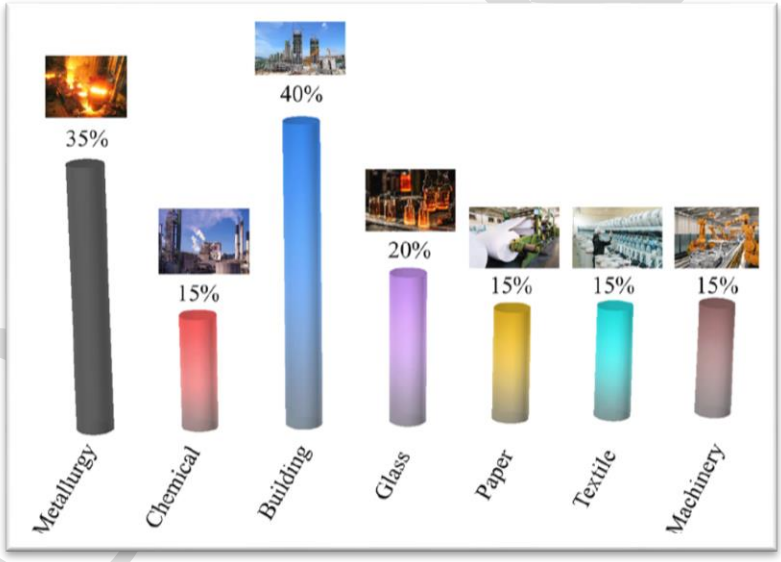
1. GİRİŞ

Küresel enerji tüketiminin hızla artması enerji kıtlığını tetiklemekte ve fosil yakıt tüketimini artırarak küresel çevre krizlerine neden olmaktadır. Dünya genelinde hükümetler, iklim değişikliği ve çevre kirliliğiyle mücadele etmek ve ülkelerinin enerji güvenliğini sağlamak amacıyla, 2050 yılına kadar net sıfır karbon emisyonu hedeflerini içeren iddialı taahhütlerde bulunmuşlardır. Bu hedefler doğrultusunda sunulan teknik çözümler arasında enerji üretimini çeşitlendirme, büyük ölçekli enerji depolama teknolojileri ve enerji tasarrufu yer almakta olup, enerji verimliliğini artırmaya yönelik yenilikler bir zorunluluk olarak öne çıkmaktadır. Sanayi, küresel olarak tüm nihai kullanım sektörleri arasında toplam enerjinin %54'ünü tüketmekle en yüksek tüketici konumundadır. Bu oran Çin'de %66 civarındadır. Sanayideki enerji kullanımı içinde ısı, %50'den fazla bir paya sahiptir. Günümüzde, endüstriyel süreçlerde büyük miktarda atık ısı üretilmekte ve bunlar doğrudan çevreye salınmaktadır. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'ne (IPCC'ye) göre, sanayi sektörü küresel sera gazı emisyonlarının %32'sinden sorumludur. Sanayide ısıtmanın karbondan arındırılması, karbon nötrlüğü için büyük bir fırsat sunmakla birlikte gerçekleştirilmesi zorluklar içeren bir durumdur. Gerçekte, sanayi büyük bir enerji tüketicisidir ve endüstriyel süreçler sırasında çeşitli şekillerde çevreye muazzam miktarda atık ısı yayılmakta, bu da büyük bir enerji israfına,

ekstra karbon salınımına ve kirliliğe yol açmaktadır. Enerji verimliliğini artırmak için, enerji tüketimi azaltma, endüstriyel atık ısının geri dönüşümü (kazanımı) veya yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı çözüm yöntemleri olarak önümüzde durmaktadır.

100 °C'nin altındaki sıcaklıklarda transfer edilen ısı, düşük sıcaklıklı (düşük kaliteli) ısı olarak nitelendirilmekte ve en yüksek atık ısı yüzdesini oluşturmaktadır. Sanayideki atık ısının büyük kısmı düşük kaliteli ısı olarak kabul edilmekte olup uygulama alanı sınırlıdır. Şekil 1, sanayide sektörel bazda gerçekleşen atık ısı oranlarını göstermektedir. Genel olarak, termal enerjinin kalitesi arttıkça, kullanım alanları da genişlemektedir. Örneğin, düşük kaliteli termal enerji öncelikle sıcak su üretimi ve mekân ısıtma gibi binalarda ısıtma ihtiyaçlarını karşılamak için kullanılmaktadır. Ancak, daha yüksek sıcaklıklı termal enerji, kurutma, sterilizasyon, buharlaştırma, damıtma veya haşlama gibi çeşitli endüstriyel süreçlerin ısıtma taleplerini karşılayabilir. Sanayideki atık ısı kaynaklarını etkin bir şekilde geri kazanmak ve sıcaklıklarını artırmak için elektrik enerjisi veya ısı yardımı kullanan teknolojilere ihtiyaç vardır. Atık termal enerjinin dönüşümü veya yükseltilmesi yoluyla endüstriyel süreçlerin enerji verimliliğini artırmak için atık ısı geri kazanım stratejileri (teknikleri) kullanılmaktadır. Isı pompası tam da bu tür bir teknoloji olup, endüstriyel atık ısı geri kazanımı için ideal bir çözüm sunmaktadır. Isı pompaları gerçekten en yaygın kullanılan atık ısı geri kazanım yöntemlerinden biridir. Buna karşılık atık ısı, ısı pompaları için yalnızca düşük dereceli ek enerji olarak kullanılmakta, bu da ısı pompalarını düşük sıcaklıklı atık ısının geri kazanımında daha avantajlı kılmaktadır. 100 °C'nin altındaki sıcaklıklarda ve özellikle atık ısı ve yenilenebilir enerji kaynaklarıyla desteklenen endüstriyel süreçlerde, endüstriyel ısı pompaları olgun bir temiz teknoloji

olarak öne çıkmaktadır. Isı pompaları ayrıca, atık termal enerjiyi yükseltip çeşitli uygulamalarda elektrikli ısıtma için kullanılabilir hale getirerek enerji verimliliğini artıran ve sera gazı emisyonlarını azaltan çevre dostu çözümler olarak görülmektedir. 2030 yılına kadar, ısı pompaları küresel CO_2 emisyonlarını 500 milyon ton azaltabilir ve bu, binaların ısıtma ve su ısıtma kaynaklı doğrudan ve dolaylı emisyon azaltımlarının yaklaşık %40'ını temsil etmektedir. Önümüzdeki yıllarda, ısı pompalarının yakıtla çalışan kazanların yerini giderek daha fazla alması ve sıfır karbon toplumunun inşasına yardımcı olması beklenmektedir.



Şekil 1. Sanayide sektörel atık ısı oranları

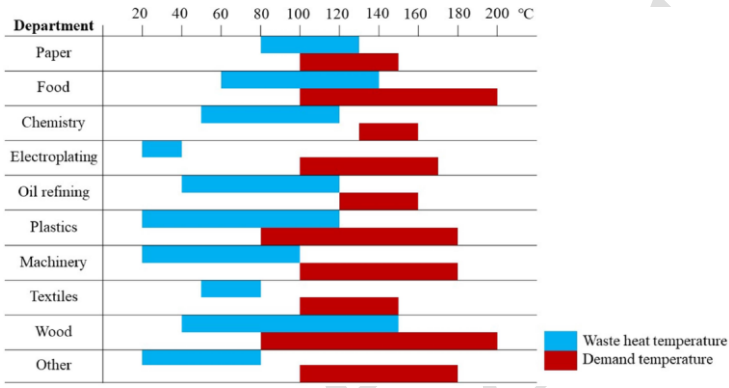
Kaynak: Ma vd., 2024.

100 °C'nin altındaki uygulamalara yönelik olarak hem akademi hem de endüstride çok yoğun çalışmalar yapılmıştır. 100 °C'nin üzerinde sıcaklıklara gereksinim duyan özellikle kâğıt üretimi, kimyasallar ve ahşap işleme gibi sektörler, ısı pompalarının kullanımından önemli ölçüde faydalanabilir.

Enerji yoğun endüstriler için, kurutma, buharlaştırma, damıtma ve benzeri endüstriyel süreçlerde de daha yüksek sıcaklıkta buhar veya basınçlı su gerekmektedir. Bu gereksinimleri karşılamak için yüksek sıcaklıklı ısı pompası (HTHP: High Temperature Heat Pump), endüstriyel atık ısının geri kazanılması ve kullanılması amacıyla kullanılabilir. Piyasada birçok ticari ısı pompası bulunmasına rağmen, 100 °C'nin üzerinde ısı sağlayabilen yüksek sıcaklıklı ısı pompaları, 100 °C'nin altında çalışanlara kıyasla hem çeşitlilik hem de miktar bakımından çok sınırlıdır. Isı pompaları için bir üst adım, ekonomik çalışma sıcaklık aralığını endüstriyel ısı talebinin yaklaşık üçte birini oluşturan 100-200 °C sıcaklık uygulamalarına genişletmektir. Şekil 2, farklı sanayi sektörlerinde üretilen atık ısının sıcaklık aralığını ve ihtiyaç duyulan proses sıcaklık aralığını göstermektedir. Yüksek sıcaklık ve büyük sıcaklık kaldırma (buharlaşma-yoğuşma sıcaklık farkı) uygulamalarına yönelik çalışmalar azınlıktadır ve önemlerine kıyasla yetersiz düzeyde ele alınmıştır. HTHP'ler, genellikle 50 °C–100 °C arasındaki sıcaklıklara sahip ısı kaynaklarını alıp, yoğuşturucu sıcaklıklarını 100 °C'nin üzerine çıkarırlar. Bu konu, endüstriyel karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltmak ve endüstriyel süreçlerde ihtiyaç duyulan proses ısısını sağlamak ve buhar üretmek için kullanılan HTHP sisteminin fosil yakıtlı geleneksel kazanların yerini alma potansiyeli nedeniyle araştırmaların öncelikli konusu olmayı hak etmektedir.

Bu tür teknolojilerle ilgili temel zorlukları araştırmak ve sistem ve bileşen tasarımı için yenilikçi yaklaşımları incelemek amacıyla yoğun araştırma çabaları gereklidir. HTHP'lerin yaygınlaşmasını engelleyen temel unsur olan yüksek ekonomik maliyetler, yüksek verimli, güvenilir ve uygun maliyetli bileşenlerin geliştirilmesini ve özel sistem tasarımlarını gerektirmektedir. Bu nedenle araştırmalar, farklı çevrim

konfigürasyonları, soğutucu akışkan seçimi ve kompresör tipleri üzerine yoğunlaşmıştır. Ayrıca tüm bu araştırmaların sonunda çıkılabilecek maksimum yoğunlaştırıcı sıcaklığı ile maksimum ısıtma performans katsayısı (COP: Coefficient of Performance) değerleri hedef çıktılar olarak özellikle ele alınmaktadır.



Şekil 2. Farklı sanayi sektörlerinde talep ve atık ısı sıcaklıkları

Kaynak: Ma vd., 2024.

Herhangi bir atık ısı kaynağı olmayıp çevre havası ısı kaynağı olarak kullanıldığında, basit tek kademeli bir ısı pompası genellikle 60 °C'nin altında ısı sağlar. Ancak, endüstriyel ısı talebi genellikle 80–150 °C arasındadır. Bu talebi karşılamak için çok kademeli sıkıştırma, kaskad ısı pompaları ve transkritik döngü gibi farklı çevrim konfigürasyonları kullanılabilir. Ticari ısı pompalarında, 165 °C'ye kadar daha yüksek sıcaklık sağlayan HTHP'lerin mevcut olduğu belirtilmekle birlikte, araştırmacılar 180 °C'ye kadar sıcaklıklara ulaşabilen su bazlı bir HTHP geliştirmiştir.

Teknik açıdan HTHP'lerin geliştirilmesindeki ana zorluklar, uygun soğutucu akışkanların (çalışma akışkanlarının) bulunması, karmaşık sistem döngüsü tasarımları ve özellikle kompresör gibi farklı sistem bileşenlerinin eşleştirilmesiyle ilgili problemlerdir.

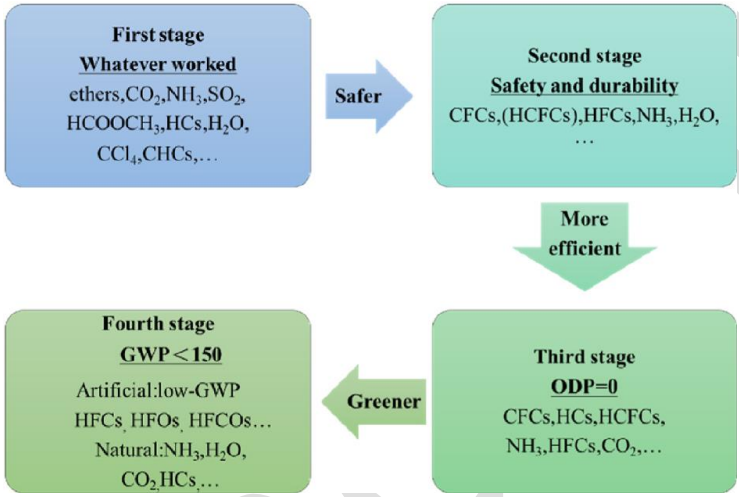
2. SOĞUTUCU AKIŞKANLAR

Fosil yakıtların yakılmasından kaynaklanan karbon dioksit emisyonları, küresel ısınmanın birincil nedenidir. Bunun yanında, soğutma, iklimlendirme ve ısı pompası sistemlerinde kullanılan yüksek küresel ısınma potansiyeline (GWP: Global Warming Potential) sahip soğutucu akışkanlar da ikincil bir endişe oluşturmaktadır. Kyoto Protokolü ve Kigali Değişiklikleri ile HFC'lerin (Hidroflorokarbonlar) aşamalı olarak kaldırılması gündeme gelmiştir. Çin hükümeti, yüksek GWP'ye sahip HFC'lerin üretim ve tüketimlerinin 2045 yılına kadar %80 oranında kademeli olarak azaltılmasını öngören Montreal Protokolü'ne ek Kigali Değişikliği'ni kabul etmiştir.

Soğutucu akışkan (çalışma akışkanı) seçimi, HTHP sisteminin performansını artırmak için etkili bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Kompresör tasarımını da doğrudan etkileyen soğutucu seçiminde, maksimum sistem performansı ile minimum hacimsel debi arasında bir denge kurulmalıdır. Soğutma çevrimlerinde onlarca yıl boyunca kullanılan 50'den fazla bileşikle geniş bir soğutucu yelpazesi bulunmaktadır. Uygun bir soğutucu seçimi, çevrim koşullarının yanı sıra çevrim termal verimliliği, termal kararlılık, kimyasal uyumluluk, çevresel uygunluk, güvenlik, bulunabilirlik ve fiyat gibi beklentiler tarafından belirlenir. Hem çevreci, hem ucuz hem de yüksek performans sergileyen mükemmel bir soğutucu bulmak imkânsız olduğundan bunlar arasında dengeyi gözeten akışkanlar seçilmelidir.

Soğutucu geliştirme, Şekil 3'te gösterildiği gibi dördüncü nesle adım atmıştır. Isı pompalarında kullanılabilecek tüm akışkanların özellikleri aşağıda anlatılmaktadır. Soğutucuların değerlendirilmesinde ve sınırlandıırlmasında çevresel yönden ele alınan en önemli iki parametre Küresel Isınma Potansiyeli (GWP: Global Warming Potential) ve Ozon Delme Potansiyeli

(ODP: Ozone Depletion Potential) değerleridir. Her ikisi için de ideal değer 0'dır, GWP değeri 150'nin üzerinde kullanımına izin verilmez.



Şekil 3. Isı pompası soğutucu akışkanlarının gelişimi

Kaynak: Wang vd., 2024.

HFC'ler: CFC'ler (Chlorofluorocarbons) 1996 yılından itibaren gelişmiş ülkelerde aşamalı olarak kullanımdan kaldırılmış ve 2010 yılında gelişmekte olan ülkelerde tamamen yasaklanmıştır. Daha düşük ODP'ye sahip olan HCFC'ler (Hydrochlorofluorocarbons), CFC'lerin yerine kullanmak amacıyla sentezlenmiştir, ancak sıfır olmayan ODP'leri ve nispeten yüksek GWP'leri nedeniyle 2020 yılında gelişmiş ülkelerde ve 2030'da gelişmekte olan ülkelerde kullanımdan kaldırılmaktadır. HFC'ler (Hydrofluorocarbons), sıfır ODP sağlamak amacıyla CFC'ler ve HCFC'lerin yerini alan maddelerdir. Ancak, HFC'ler yüksek GWP'ye ve atmosferde uzun ömürlülüğe sahiptir, bu nedenle emniyet açısından risk barındırmaktadırlar. Kyoto Protokolü tarafından getirilen

kısıtlamalarla birlikte, HFC'ler de yakın gelecekte ortadan kaldırılacaktır.

HFO'ler ve HCFO'ler: HFO'lar (Hydrofluoroolefins), ısı pompalarında HFC'lerin yerine önerilmektedir. Çünkü GWP'leri ihmal edilebilir düzeyde olup, termodinamik özellikleri benzerdir. Bazı HFO'lar, soğutma sistemlerinde mevcut HFC'lerin yerine herhangi bir modifikasyon yapılmadan doğrudan kullanılabilir. R1336mzz dışındaki HFO'ların yanıcılığı A2 ve A2L seviyelerindedir, bu da büyük kapasiteli yüksek sıcaklıklı ısı pompalarındaki uygulamalarını sınırlandırmaktadır. R1336mzz ve HCFO'lar (Hydrochlorofluorolefins), yüksek sıcaklıkta nispeten düşük basınç gibi güvenlik ve performans açısından mükemmel özellikler gösterirler. Böylece aynı sistem basıncı altında daha yüksek çıkış sıcaklığı sağlayabilirler. Ancak, HCFO'ların ODP'si sıfır değildir.

Doğal Soğutucular: Doğal soğutucular, ilk soğutucu neslinden beri kullanılmaktadır. Doğada bulundukları ve çevreye neredeyse hiç zarar vermedikleri için en ideal çalışma akışkanları olmaları beklenir. Ancak yüksek basınç, toksisite ve yanıcılık gibi doğalarından gelen bazı özellikler nedeniyle, doğal soğutucuların HTHP uygulamalarında kullanımı hâlâ geliştirme sürecindedir. R718 (Su), R717 (Amonyak), R744 (Karbondioksit) en bilinen doğal soğutuculardır.

Su (R718), toksik olmaması, yanmazlığı, sıfır ODP ve GWP değerleri ve iyi stabilitesi ile öne çıkar. Ayrıca su, geniş bir tedarik kaynağına sahiptir ve düşük maliyetlidir. Termodinamik özellikler açısından su, yüksek kritik sıcaklığa (374,15 °C), nispeten düşük kritik basınca (22,13 MPa) ve büyük buharlaşma gizli ısısına sahiptir. Bu özellikler, 150 °C'nin üzerindeki yüksek sıcaklıklar söz konusu olduğunda suyu oldukça rekabetçi bir seçenek hâline getirir. Ancak, genellikle çok yüksek basınçlarda çalışan CO_2 ve NH_3 sistemleriyle

karşılaştırıldığında, su yüksek sıcaklık aralığında nispeten düşük bir basınçta çalışır. Ayrıca, suyun HTHP soğutucusu olarak kullanılması, yüksek sıkıştırma oranı, yüksek adyabatik katsayı ve düşük buhar yoğunluğu gibi zorlukların üstesinden gelmeyi gerektirir.

Amonyak (R717), mükemmel termodinamik ve taşınım özelliklerine sahip olması nedeniyle ısıtma ve soğutma sistemlerinde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Amonyak ABD'de endüstriyel soğutmanın %95'inden fazlasında kullanılır ve Avrupa'da da yüksek bir pazar payına sahiptir. Amonyak belirli konsantrasyonlarda toksik olmasına rağmen, sızıntı durumunda kolayca tespit edilebilen keskin bir kokuya sahiptir. Amonyak, yüksek hacimsel ısıtma kapasitesi nedeniyle büyük ölçekli gereksinimlerde rekabetçi avantajlara sahiptir. Bu nedenle, aynı ısıtma kapasitesini sağlamak için küçük hacimli bir kompresör yeterlidir. Aynı zamanda, NH_3'ün maliyeti diğer soğutuculara kıyasla daha düşüktür. NH_3 kullanan ısı pompalarının çoğu 90 °C'lik bir sıcaklıkla sınırlıdır.

Karbondioksit (R744 veya kimyasal formülü CO_2) ilk nesil soğutucular arasında yer alır. NH_3'e göre daha güvenli olup hem soğutma hem de ısıtma uygulamalarında kullanılmaktadır. CO_2'nin yüksek akışkan yoğunluğu ve çalışma basıncı sayesinde hafif ısı pompaları üretilebilir. Hacimsel soğutma kapasitesi CFC, HCFC, HFC ve HC soğutucularına kıyasla 3 ila 10 kat daha büyüktür ve bu durum, soğutma çevriminde büyük bir avantaj sağlar. Isıtma açısından transkritik çevrim en yaygın kullanılan CO_2 ısı pompası konfigürasyonudur. Kritik sıcaklık yakınında çalışırken sıcaklık azaldıkça entalpi ve entropi hızla düşer ve bu durum, gaz soğutucusunda ısıtma performansını artırır. Ancak, CO_2 basıncı, geleneksel soğutuculara göre neredeyse 5–10 kat daha yüksektir.

HC'ler: HC'ler (Hydrocarbons) toksik olmayan çevre dostu özelliklere sahip olup HTHP uygulamaları için önemli bir rol oynamaktadırlar. Ucuzdur ve mevcut ısı pompası uygulamalarının neredeyse tamamında kullanılabilirler. HC'ler özellikle kaskad HTHP'lerde yaygın olarak kullanılan soğutucu akışkanlardır. HC karışımları, çalışma aralıklarını daha da genişletebilir ve sistem performansını iyileştirebilir. Örneğin, R290 + R600 ve R600 + R601 karışımlarının COP'si, saf sıvı durumlarındakine göre %13,5 oranında artar. Bunlarla ilgili dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta, yanıcılık endişesidir. Güvenlik endişeleri nedeniyle, HC'lerin sisteme yüklenmesi ciddi şekilde sınırlıdır, bu da büyük ölçekli uygulamalarını imkânsız kılmaktadır.

Termodinamik performansın yanı sıra, soğutucu seçim kriterleri güvenlik ve ekonomiyi de içermektedir. Çevresel endişeleri dengelemek ve HTHP kullanımının çevrim performansı ile ekonomik durumunu dengelemek için, soğutucu karışımlarının kullanılması daha iyi bir seçenek olabilir.

3. HTHP KONFİGÜRASYONLARI

Temel bir ısı pompası döngüsünün bileşenleri ve işletimi diğer ısıtma sistemlerinden farklıdır. Isı pompası bir kaynaktan düşük sıcaklıktaki ısıyı alır bir soğutucu yardımıyla alır, buharlaşan soğutucu kompresörde sıkıştırılarak sıcaklık ve basıncı artırılır. Yüksek sıcaklıktaki buhar ısısını yoğuşturucada dışarı atar. Döngüyü tamamlamak için yoğuşan yüksek basınçlı akışkan bir genleşme işlemi yardımıyla başlangıçtaki düşük basınca geri döndürürür. Bu şekilde, endüstriyel süreçteki bir akıştan gelen 'atık' ısı veya ortamdan alınan ısı, iş girişi karşılığında yükseltilebilir ve diğer süreçlerde kullanılabilir.

Tek kademeli ısı pompaları proses ısısı için gerekli sıcaklıklara çıkamadığından modifiye konfigürasyonlara ihtiyaç

vardır. Ayrıca büyük sıcaklık farklarında performansı oldukça azalmaktadır. Diğer yandan deneysel sonuçlar genellikle aynı sıcaklık artışı için ısı kaynağı sıcaklığı arttıkça COP'nin arttığını göstermektedir. Uygulama ve sıcaklık gereksinimlerine bağlı olarak performansı artırmak için çeşitli konfigürasyonlar ve ek bileşenler kullanılabilir. En yaygın modifikasyonlar, çok kademeli sıkıştırma, kaskad sistem, iki kademeli yoğuşma sistemi ve bunların kombinasyonlarıdır. Bunların dışında iç ısı değiştirici (IHX: Internal Heat Exchanger), ekonomizer, ejektör, buhar enjeksiyonu ile donatılmış çevrimler de vardır. Çok kademeli sistem, daha yüksek çıkış sıcaklığı elde etmek için birden fazla sıkıştırma kademesi kullanır, ancak bunun karşılığında mekanik enerji tüketimi artar. Kaskad ısı pompası sistemi, daha büyük bir sıcaklık farkı elde etmek için iki veya daha fazla çalışma akışkanının dolaşımını birleştirir. Hibrit ısı pompası sistemi ise buhar sıkıştırmalı ısı pompasını absorpsiyon, adsorpsiyon, güneş enerjisi veya kimyasal ısı pompası sistemleri gibi diğer termal sistemlerle entegre eder. Bunların detayları aşağıda verilmektedir.

Kaskad çevrim: Kaskad çevrim, iki veya daha fazla bağımsız kapalı ısı pompası çevrimini birleştirmek için bir ısı eşanjörü kullanır. Bu eşanjör düşük kademeli sistemdeki yoğuşturucudan salınan ısı ile yüksek kademeli sistemdeki buharlaştırıcıdan alınan ısının geçişine izin verir. Kaskad ısı eşanjörü, üst ve alt çevrimler için sırasıyla evaporatör ve kondenser olarak işlev görür. Kaskad çevrimi, termodinamik olarak iki aşamalı genleşme ve sıkıştırma çevrimine benzer, ancak kaskad ısı eşanjöründeki sıcaklık farkı nedeniyle bir kayıp içerir. 100 °C'nin altındaki sıcaklıklarda çalışan alt kritik kaskad çevrimlerinde COP değerleri 2 ile 4,4 arasında rapor edilmiştir. 100 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda IHX'lere sahip alt kritik çevrimlere sahip bir kaskadda ise COP değerleri 2,5 ile 4,9 arasında değişmiştir.

IHX: Tek aşamalı veya çok aşamalı/kaskad çevrimlerde, buharlaşmadan önce soğutucudan (subkritik çevrimde kondensasyondan veya transkritik çevrimde gaz soğutmasından) ısı transferi yapmak için kullanılan yardımcı bileşenlerdir. IHX'in en yaygın yerleştirme konumu, kondenser/gaz soğutucu çıkışı ile evaporatör çıkışı arasındadır. Kondenser/gaz soğutucu çıkışından çıkan soğutucu akışkanın bir miktar ısısını evaporatör çıkışından çıkan soğutucu akışkana aktardığında, kompresör emişindeki soğutucu akışkan sıcaklığı artar ve böylece daha yüksek bir kompresör çıkış sıcaklığı elde edilebilir. Bu, artan sıkıştırma işi pahasına soğutucunun daha yüksek bir sıcaklığa ve entalpiye ulaşmasını sağlar. 60 °C sıcaklık farkı ile 140 °C soğutucu sıcaklığının 3,2 COP ile elde edildiği ve 45 °C sıcaklık farkı ile 155 °C soğutucu sıcaklığı 2,7 COP ile elde edildiği çalışmalar mevcuttur.

Çok sıcaklıklı çevrim: Çok sıcaklıklı ısı pompası çevrimleri, ısının atılacağı ısı kuyusuna ısı sağlamak için birden fazla kondenser (veya gaz soğutucu) ve/veya ısının alınacağı ısı kaynağından ısı çekmek için birden fazla evaporatör içerir. Sonuç olarak, çok sıcaklıklı bir çevrimin belirli bir uygulamaya uyacak şekilde özelleştirilmesi yaygındır. COP'u maksimize etmek için kaskadlar, dahili ekonomizörler, ara soğutma, paralel ve çok kademeli sıkıştırma ve IHX gibi unsurlar çevrime dahil edilebilir. Bununla birlikte, çevrimdeki birim sayısı arttıkça, azalan COP artışı nedeniyle doğal bir fiyat/performans dengesi oluşur.

Dahili ekonomizer, ara soğutma, paralel sıkıştırma ve çok kademeli sıkıştırma: Dahili ekonomizörler (etkili bir şekilde çok aşamalı genleşme ile alt soğutma) ve ara soğutma, bir çevrimin COP'unu artırabilecek farklı özelliklerdir ancak ek bileşenler gerektirir. Ayrıca unsurlar genellikle birden fazla kompresör kullanılmasını gerektirir ve bu da ek sermaye yatırımı gerektirir. Paralel sıkıştırma çok aşamalı genleşmeyi

mümkün kılar ve ara flaş gazının daha düşük bir basınç oranında daha verimli sıkıştırılmasını sağlar. Ara soğutma, sıkıştırma verimliliğini artırmak için kullanılan başka bir yaklaşımdır. Ara soğutmanın avantajı, ortalama gaz sıkıştırma sıcaklığını düşürmektir. Çok kademeli buhar sıkıştırmalı sistem, birden fazla kompresör kullanır ve bu, sıcaklık farkını artırmak ve kompresör verimliliğini iyileştirmek için faydalıdır. Çok kademeli sıkıştırma sistemi, kademelerin artmasıyla birlikte daha yüksek enerji ve exergi verimliliğine sahiptir. Çok kademeli sıkıştırma sisteminin karmaşıklığı nedeniyle, çoğu çalışma teorik araştırmalara odaklanmış olup, yalnızca bazı deneysel prototipler bulunmaktadır.

Absorpsiyonlu ve Hibrit Sistemler: Absorpsiyonlu çevrimlerin çoğunluğu soğutma amacıyla kullanılmaktadır, ancak bazen mekân ısıtması, sıcak kullanım suyu ve hatta buhar üretimi için de kullanılabilmektedir. Son zamanlarda önerilen bir çevrimde, 80 °C'lik besleme suyundan 180 °C'de kızgın buhar üretebilmiştir. Bazı durumlarda hem absorpsiyon hem de buhar sıkıştırma süreçlerini içeren hibrit çevrimler tasarlanmıştır, bunlar her iki sistemin de avantajlarından yaralanmaktadır. Absorpsiyonlu hibrit bir ısı pompası, 80 °C'nin üzerindeki bir besleme sıcaklığı ile 100–150 °C arasında ısı sağlayabilme yeteneğine sahiptir.

Genişletici: Transkritik çevrimler, genleşmenin iki fazlı bir akışkan oluşumuna neden olmadığı durumlarda genleşme vanaları yerine genellikle geleneksel genleştiriciler kullanarak iş geri kazanımı yapabilir. Bunlar yardımıyla standart bir çevrime kıyasla COP'de %37,5 artış elde edilebilir.

Soğutucu Enjeksiyon Sistemi: Enjeksiyon tekniği, sıkıştırma sürecinin verimliliğini artırarak ısı pompası sistemlerinin performansını iyileştirmek için etkili bir çözüm olarak kanıtlanmıştır. Bu modifikasyon, sıvı fazda soğutucu

akışkan enjeksiyonu veya buhar fazında soğutucu akışkan enjeksiyonu yoluyla uygulanabilir. İlki genellikle sistemin güvenilir çalışmasını sağlamak için kompresörleri soğutmak amacıyla kullanılır. Buhar fazında soğutucu akışkan enjeksiyonu ise kompresör çıkış sıcaklığını düşürmenin yanı sıra, büyük sıcaklık farkları için kapasiteyi artırmayı hedefler.

Ejektör: Ejektörün ısı pompasında genleşme valfinin yerine kullanılması, genleşme kayıplarını ve tersinmezlikleri azaltmanın basit ve maliyet-etkin bir çözümü olarak kabul edilmektedir. Ejektör emiş basıncını ve sıcaklığını artırarak kompresörün işini düşürür, bu da daha yüksek sistem COP'sine imkân verir. 100 °C'nin üzerinde çalışan ejektörlü alt kritik çevrim 5,45 COP değerine ulaşmıştır.

4. SONUÇ

Isı pompaları, uygulama yelpazesini her geçen gün daha yüksek sıcaklıklara ve sıcaklık farklarına genişletmek için araştırma, geliştirme ve yenilik gerektirmeye devam etmektedir. HTTHP çevrimlerinin yeteneklerini keşfetmek için daha fazla araştırma gerekmektedir. Yüksek sıcaklıklar (>100 °C) için modifiye edilmiş çevrim konfigürasyonları ve kritik basıncın üstünde çalışabilen transkritik çevrimler kulalnılmalıdır. Önceki araştırmalar ve incelemelere dayanarak, ısıtma sıcaklığı 100 °C'nin üzerinde olduğunda hibrit veya kaskad döngülerinin sıklıkla kullanıldığı görülmektedir. Yapılan HTHP araştırmalarının çoğunda düşük GWP'li soğutucular kullanılmaktadır. Bunlar arasında HFO'lar, doğal soğutucular ve yeni karışım soğutucuları bulunmaktadır. Endüstride uygulanan HTHP'lerin vaka analizleri, HTHP'lerin endüstriyel kazanların yerine geçme potansiyelini ve uygulama seviyesini ortaya koymaktadır.

Büyük sıcaklık farkına sahip ısı pompalarının olgunlaşması, sanayi kazanlarının yerini alacak ısı pompalarının kullanımını büyük ölçüde hızlandıracaktır. Buhar üretme kapasitesine sahip ısı pompaları, sanayi için sürdürülebilir ısınma sistemleri olarak kanıtlanmış olup, sıcaklık farkını daha da artırmakta ve sanayi kazanlarının yerini alma olasılığını artırmaktadır. Araştırma ve uygulamaların sonuçları dikakte alındığında gelecek nesil HTHP'lerden beklentiler şu şekilde özetlenebilir:

1- Düşük-GWP'li soğutkanların (GWP<150) geliştirilmesi ve uygulanması.

2- HTHP'lerden elde edilebilecek sıcaklığının 150°C'yi aşacak şekilde artırılması.

3- 40°C sıcaklık farkı altında sistem COP'sinin 4.0'ı aşacak şekilde iyileştirilmesi.

4- 1 MW'den büyük ısıtma kapasitesine sahip büyük ölçekli ünitelerin geliştirilmesi.

Örnektir

5. KAYNAKLAR

Lau, L. C., Lee, K. T., Mohamed, A. R. (2012). 'Global warming mitigation and renewable energy policy development from the Kyoto Protocol to the Copenhagen Accord—a comment', *Renew Sustain Energy Rev*, 16, 5280–5284. Doi:10.1016/ j.rser.2012.04.006

Heath, E. A. (2017). 'Amendment to the Montreal Protocol on substances that deplete the ozone layer (Kigali amendment)', *Int Leg Mater*, 56, 193–205. Doi:10.1017/ilm.2016.2

Du, T. X. M, Y., Zha, T. Zhu, B. Lei, Y. Wu (2024). 'A comprehensive review of compression high-temperature heat pump steam system: Status and trend', *International Journal of Refrigeration*, 164, 218–242. Doi: 10.1016/j.ijrefrig.2024.04.024

J. Jiang, B. Hu, R. Z. Wang, N. Deng, F. Cao, C.-C. Wang, (2022). 'A review and perspective on industry high-temperature heat pumps', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161, 112106. Doi: 10.1016/j.rser.2022.112106

T. E. Samad, A. Zabnienska-Gora, H. Jouhara, A. I. Sayma (2024). 'A review of compressors for high temperature heat pumps', *Thermal Science and Engineering Progress*, 51, 102603. Doi: 10.1016/j.tsep.2024.102603

R. Wang, H. Yan, D. Wu, Ji. Jiang, Y. Dong (2024). 'High temperature heat pumps for industrial heating processes using water as refrigerant', *Energy*, 313, 133847. Doi: 10.1016/j.energy.2024.133847

Örnektir

B. Dai, Y. Feng, S. Liu, X. Yao, J. Zhang, B. Wang, D. Wang, (2023). 'Dual pressure condensation heating high temperature heat pump using eco-friendly working fluid mixtures for industrial heating processes: 4E analysis', *Energy*, 283, 128639. Doi: 10.1016/j.energy.2023.128639

K. M. Adamson, T. G. Walmsley, J. K. Carson, Q. Chen, F. Schlosser, L. Kong, D. J. Cleland, (2022). 'High-temperature and transcritical heat pump cycles and advancements: A review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167, 112798. Doi: 10.1016/j.rser.2022.112798

Örnektir

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİNDE İLERİ ARAŞTIRMALAR

yaz
yayınları

YAZ Yayınları
M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar / AFYONKARAHİSAR
Tel : (0 531) 880 92 99
yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com