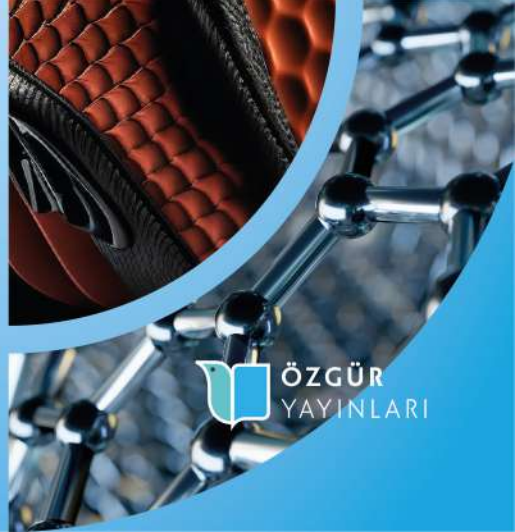


Farklı Mühendislik Yaklaşımlarıyla Kompozit Malzemeler- II

Composite Materials with Different Engineering Approaches- II

Editör: Dr. Öğr. Üyesi Yalçın Boztoprak



ÖZGÜR
YAYINLARI

Farklı Mühendislik Yaklaşımlarıyla Kompozit Malzemeler- II

Editör:

Dr. Yalçın Boztoprak



Published by

Özgür Yayın-Dağıtım Co. Ltd.

Certificate Number: 45503

📍 15 Temmuz Mah. 148136. Sk. No: 9 Şehitkamil/Gaziantep

☎ +90.850 260 09 97

📞 +90.532 289 82 15

🌐 www.ozgurayinlari.com

✉ info@ozgurayinlari.com

Farklı Mühendislik Yaklaşımlarıyla Kompozit Malzemeler- II

Composite Materials with Different Engineering Approaches- II

Editör: Dr. Yalçın Boztoprak

Language: Turkish-English

Publication Date: 2023

Cover design by Mehmet Çakır

Cover design and image licensed under CC BY-NC 4.0

Print and digital versions typeset by Çizgi Medya Co. Ltd.

ISBN (PDF): 978-975-447-667-5

DOI: <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub172>



This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0). To view a copy of this license, visit <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>
This license allows for copying any part of the work for personal use, not commercial use, providing author attribution is clearly stated.

Suggested citation:

Boztoprak, Y. (ed) (2023). *Farklı Mühendislik Yaklaşımlarıyla Kompozit Malzemeler- II*. Özgür Publications.

DOI: <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub172>. License: CC-BY-NC 4.0

The full text of this book has been peer-reviewed to ensure high academic standards. For full review policies, see <https://www.ozgurayinlari.com/>



Ön Söz

Sevgili okuyucular,

Hayatta kullandığımız her ürün bir malzemeden üretilmekte ve günümüz teknolojileri ile birlikte kompozit malzemeler hayatımızda önemli bir yer tutmaktadır. Bu kitap, kompozit alanındaki bilimsel çalışmaları farklı mühendislik perspektiflerinden incelemektedir. Kompozit malzemeler üzerinde çeşitli malzemeler kullanarak yeni ürünler ve yenilikçi teknolojiler geliştirmek ve sürdürülebilir çözümler sağlamak için bu çalışmaları farklı mühendislik yaklaşımlarıyla incelemek önemlidir ve bu kitapta kompozit malzemeler bu bakış açısıyla incelenmiştir.

Okuyucular, günümüzde kompozit alanında yapılan çeşitli çalışmalara erişebilecekler. Kitapta ayrıca farklı matris ve takviye elemanları kullanılarak polimer, seramik ve elastomer matrisli kompozit malzemeler üzerinde yapılan çalışmalar hakkında bilgiler yer almaktadır.

Bu kitap akademisyenler, mühendisler, araştırmacılar ve öğrenciler için bir kaynak olarak tasarlanmıştır. İleride kompozit malzemeler üzerine yapacağınız araştırma ve çalışmalara büyük fayda sağlayacağına inanıyorum.

Saygılarımla.

Dr. Yalçın Boztoprak

Praface

Dear readers,

Every product we use in life is manufactured from a material, and composite materials hold an important place in our lives with today's technologies. This book examines scientific studies in the composite field from different engineering perspectives. It's important to examine these studies with different engineering approaches to develop new products and innovative technologies using a variety of materials on composite materials and provide sustainable solutions, and composite materials are examined in this book from such a perspective.

Readers will be able to access the diverse work being done today in the field of composites. The book also includes information on studies carried out on polymer, ceramic, and elastomer matrix composite materials using different matrix and reinforcing elements.

This book is designed as a resource for academics, engineers, researchers, and students. I believe that it will highly benefit your research and work on composite materials down the road.

Yours sincerely,

Dr. Yalçın Boztoprak

İçindekiler

Ön Söz	iii
Praface	v

Bölüm 1

Biyomalzeme Uygulamalarında Kompozit Malzemeler: Kapsamlı Bir Genel Bakış	1
<i>Taha Çağrı Şenocak</i>	

Bölüm 2

Alternatif Enerji Kaynakları Kullanılan Otoklav Yöntemi İçin Karşılaştırmalı Maliyet Analizleri	19
<i>Kaan Gölçek</i>	
<i>Asım Sinan Karakurt</i>	

Bölüm 3

Polipropilen (PP) Esaslı Organik Takviyeli Kompozitler	35
<i>Mehmet Altuğ</i>	
<i>Yakup Yılmaz</i>	

Bölüm 4

Kauçuk Esaslı Kompozitlerde Kullanılan Katkı Maddeleri	47
<i>Nürettin Akçakale</i>	

Bölüm 5

Seramik Esaslı Kompozitlerin Flaş Sinterleme Tekniğıyle Üretimi	71
<i>Hülya Biçer</i>	

Bölüm 6

AISI 1020 Çeliğinin Yüzeyinde Ferro Bor-(1, 2.5 ve 5) Silisyum Karbür Metal Matrisli Kompozitlerin TIG Yüzey Alaşımına Yöntemi ile Oluşturulması ve Özelliklerinin İncelenmesi	87
<i>Serdar Pazarlıoğlu</i>	
<i>Yasemin Geyin</i>	
<i>Hasan Gökçe</i>	

Bölüm 7

Nanotechnology and Architecture: Applications and Potential of Nanocomposites	107
<i>Doğu Ramazanoğlu</i>	

Biyomalzeme Uygulamalarında Kompozit Malzemeler: Kapsamlı Bir Genel Bakış

Taha Çağrı Şenocak¹

Özet

Biyomalzeme uygulamalarının yenilikçi dünyasında, kompozit malzemeler çok yönlü özelliklere sahip çığır açan bir çözüm olarak ortaya çıkmıştır. İki veya daha fazla maddeyi harmanlayan bu malzemeler, özellikle sağlık ve tıbbi tedaviler olmak üzere çeşitli endüstriler için önemli sayılabilecek bir potansiyele sahiptir. Kompozit malzemeler, biyomedikal uygulamalar için onları oldukça çekici kılan, yüksek mekanik mukavemet, özel biyoaktivite ve yüksek biyouyumluluğun benzersiz bir kombinasyonunu sergilemektedir. Uygulamaları, ortopedik implantlardan, diş restorasyonlarından, doku mühendisliğine ve ilaç dağıtım sistemlerine kadar uzanır. Titanyum ve paslanmaz çelik gibi geleneksel malzemelere avantajlı bir alternatif sunarak mukavemet, biyouyumluluk ve işlevsel uygulanabilirlik sunmaktadırlar. Örneğin ortopedide, kompozitler kemiğe benzer sertlik sağlarken, kemik büyümesini uyarır ve gerilme kalkanlama riskini azaltır. Benzer şekilde, doku mühendisliğinde, polimer-biyoseramik yapı iskeleleri gibi kompozit malzemeler, dokuların yenilenmesini katkıda bulunan hücre yapışması, çoğalması ve farklılaşması için çok yönlü bir ortam sağlama becerisini göstermektedir. Kompozit nanomalzemeler, yapısal özellikleri geliştirilerek, kontrollü ve hedefli ilaç salınımı sağlayan ilaç dağıtım sistemlerinde kullanım alanı bulmuşlardır. Biyomalzeme uygulamalarında kompozit malzemelerin geleceği, nanokompozitlerin, akıllı, uyarıcılara duyarlı malzemelerin ve biyolojik olarak emilebilir kompozitlerin geliştirilmesindeki heyecan verici ilerlemelerle umut verici görünmektedir. Nihayetinde, üretim tekniklerindeki ilerlemeler, özellikle 3B baskının yükselişi, kişiselleştirilmiş kompozit biyomalzemelerde yeni bir çağın başlatılmasında çok önemli bir rolü olduğunu kanıtlamıştır. Bu yenilik, çok sayıda biyomedikal alanda daha çok yönlü ve özel çözümler sunarak biyomalzeme üretimini yeniden şekillendirerek, bu malzemeler için uygulama yelpazesini genişletmiştir. Bu

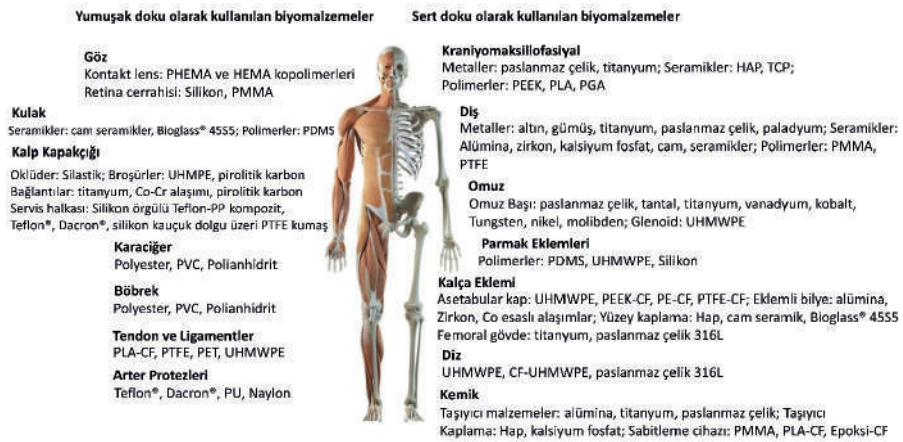
1 Dr., Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, tcsenocak@atauni.edu.tr,
ORCID ID: 0000-0002-0043-5253

makale, biyomalzeme uygulamalarındaki kompozit malzemelere kapsamlı bir genel bakış sunmayı, sınıflandırmalarını, özelliklerini ve çeşitli uygulamalarını incelemeyi amaçlamaktadır.

1. Biyomalzeme Alanında Kullanılan Kompozit Malzemeler

1.1. Biyomalzemelerin Tanımlanması

Geniş anlamda, biyomalzemeler, bir bireyin yaşam kalitesini ve süresini artırma nihai amacı ile biyolojik bir yapıyı tamamlamak veya tamamen değiştirmek için kullanılan doğal veya sentetik maddeleri ifade etmektedir. Biyomalzemelerin uygulanması eski uygarlıklara kadar uzanmaktadır (Park & Lakes, 2007). Tarihsel kayıtlar, erken Romalıların oküler yaralanmaları tedavi etmek için cam kullandığını, Çinlilerin ve Azteklerin diş hekimliği uygulamalarında altının soy metal özelliklerinden yararlandıklarını ve Mısırlılar ve Hintlilerin ise yaraları dikmek için keten kullandıklarını göstermektedir (Guerard et al., 2014). Zamanla, artan klinik talebin ve malzeme bilimcilerin, biyologların ve kimyagerlerin ortak çabalarının birleşimi olarak, bu malzemelerin türlerinde ve uygulamalarında muazzam bir genişlemeyi de beraberinde getirmiştir. Günümüzde, biyomalzemeler, Şekil 1'de kısaca özetlendiği gibi, çeşitli vücut kısımlarında kullanım alanı bulmaktadır.



Şekil 1. İnsan vücuduna uygulanan sert ve yumuşak doku olarak kullanılan biyomalzemeler (Nayak et al., 2021).

Biyomalzemelerin, vücudun herhangi bir dokusunu, organını veya işlevini tedavi etmek, büyütmek veya değiştirmek için tıbbi amaçlarla biyolojik sistemlerle etkileşime girecek şekilde tasarlanması gerekmektedir.

Bu malzemeler genellikle tıbbi cihazlar, doku mühendisliği, yapay organlar ve ilaç dağıtım sistemleri dahil olmak üzere tıbbi uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Biyomalzemeler doğadan elde edilebilir veya bir laboratuvarında sentezlenebilir özellikte olabilir. Genel olarak sınıflandırılacak olursa metaller, seramikler, polimerler ve kompozit malzemeler olarak dört farklı grupta ele alınabilir (O'Brien, 2011). Metalik biyomalzemeler, yüksek mekanik dayanımları nedeniyle genellikle ortopedik implantlar, diş implantları ve kalp kapakçıkları gibi yük taşıyan uygulamalarda kullanılmaktadır. Yaygın örnekler arasında paslanmaz çelik, kobalt-krom alaşımları ve titanyum alaşımları bulunmaktadır. Biyoyumlulukları, korozyon dirençleri ve dayanıklılıkları onları uzun süreli implantasyon için uygun hale getirmektedir. Ancak, aşınma ve metal iyonlarının vücuda potansiyel olarak salınması ile ilgili zorlukları da beraberinde getirmektedir (Gilbert & Kubacki, 2016). Seramik biyomalzemeler, genel olarak çok sert ve güçlü fakat aynı zamanda kırılğan olan inorganik malzemelerdir. İyi biyoyumlulukları, mükemmel aşınma dirençleri ve diş-kemik benzeri görünümleri nedeniyle sıklıkla dental ve ortopedik uygulamalarda kullanılırlar. Zirkonyum, alümina ve biyoaktif cam seramikler bazı örnekleri oluşturmaktadır (Almulhim et al., 2022; Pina et al., 2018). Polimerler, tekrar eden alt birimlerden oluşan büyük moleküllerdir ve özellikleri bakımından büyük esneklik sunmaktadırlar. Biyobozunur veya bozunmaz olarak tasarlanabilirler. Genellikle, ilaç taşıyıcı sistemler, dikişler, tüpler, suni deri ve kontakt lensler dahil olmak üzere geniş bir kullanım alanına sahiptir. Polietilen, polivinil klorür, silikon ve poli(laktik-ko-glikolik asit) sıklıkla kullanılan polimerlerdir. Kompozit biyomalzemeler, önemli ölçüde farklı fiziksel veya kimyasal özelliklere sahip iki veya daha fazla bileşen malzemeden yapılan mühendislik malzemeleridir (Stewart et al., 2018a). Kompozit malzemeyi oluşturan bileşenler, makroskopik düzeyde birbirlerinden ayrı ve farklı özellik ve görüntüleriyle kendine özgü yapısını meydana getirmektedir. Amaç, bileşen malzemelerinin en iyi özelliklerini tek bir malzeme üzerinde bir araya getirmektir. Kemik gibi doğal dokuların özelliklerini taklit edecek şekilde tasarlanabildikleri için genellikle ortopedik ve dental uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadırlar. Polimer-seramik kompozitler ve biyoaktif cam-polimer kompozitler biyomalzeme uygulamaları için en bilinen malzemelerdir (Salernitano & Migliaresi, 2003).

1.1. Biyomalzeme Uygulamalarında Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler, genel anlamda, iki veya daha fazla malzemenin makroskopik ölçekte bir araya getirilerek, kendisini oluşturan elemanların sahip olduğu üstün özellikleri tek bir malzemede bir araya getirmesi olarak tanımlanabilir. Biyomalzeme uygulamalarında doğal dokuların hiyerarşik ve

heterojen yapısını taklit etme yetenekleri nedeniyle kompozit malzemeler dikkatleri üzerine çekmiştir. Biyomalzemelerin kompozit malzemeler açısından kategorize edilmesi Şekil 2’de verilmiştir. Genel olarak kompozit biyomalzemeler kökenlerine, bileşenlerine, yapılarına ve bozunmalarına göre sınıflandırılabilir. Ancak bu sınıflandırmanın başka sınıflandırmalara göre bir bağlayıcılığı bulunmaz. Bileşiklerine, özelliklerine, bileşimlerine ve uygulama alanlarına bağlı olarak farklı sınıflandırmalar da bulunmaktadır (Salernitano & Migliaresi, 2003; Yıldızhan et al., 2018).

1.1.1. Kökenlerine Göre:

Doğal kompozitler: Doğal kaynaklardan elde edilirler. Örneğin, kolajen-hidroksiapatit, kemiğin bileşimine yakın kompozisyona sahip doğal bir bileşiktir.

Sentetik kompozitler: Belirli uygulamalar için tasarlanmış insan yapımı kompozitlerdir. Kemik dokusu mühendisliği için sentetik polimer ve biyoseramik bileşimi buna örnek oluşturabilir.

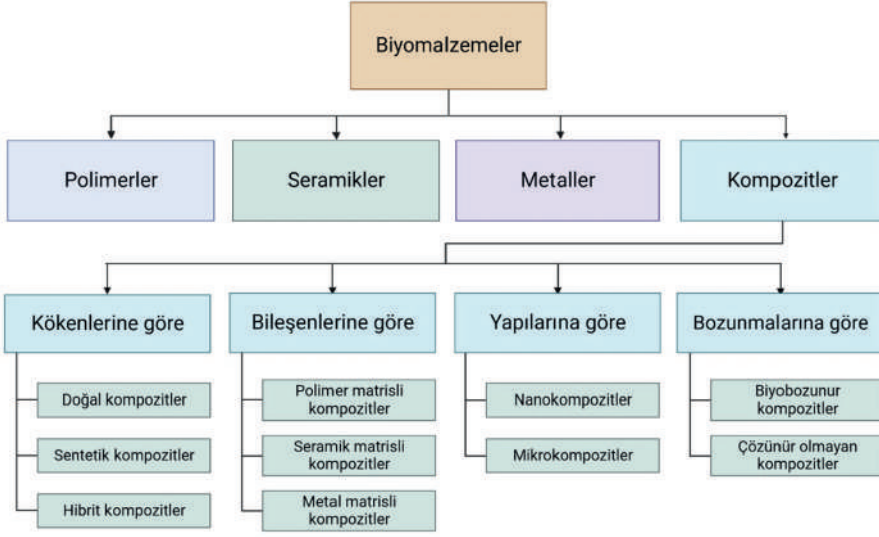
Hibrit kompozitler: Doğal ve sentetik malzemelerin kombinasyonlarıdır. Bir örnek, kollajen (doğal) ve polilaktik asitten (sentetik) oluşan bir bileşiktir (Mallick et al., 2022).

1.1.2. Bileşenlerine Göre:

Polimer matrisli kompozitler: Bu kompozitler, polimer esastır (kollajen, PLA veya PEG gibi) ve biyoseramikler veya metaller gibi diğer malzemelerle takviyelendirilmiştir.

Seramik matrisli kompozitler: Bu kompozitler, seramik esastır (hidroksiapatit gibi) ve polimerler veya metaller gibi diğer malzemelerle takviyelendirilmiştir.

Metal matrisli kompozitler: Bu kompozitler, metalik esastır (titanyum gibi) ve biyoseramikler veya polimerler gibi diğer malzemelerle takviyelendirilmiştir (Zagho et al., 2018).



Şekil 2. Biyomalzemelerin kompozit malzemelere göre sınıflandırılması.

1.1.3. Yapılarına Göre:

Nanokompozitler: Bu kompozitlerin, boyutları nanometre aralığında olan en az bir bileşeni bulunmaktadır. Genellikle benzersiz mekanik, optik veya elektriksel özellikler gösterirler.

Mikrokompozitler: Bu kompozitler, mikro ölçekli bileşenlere sahiptir. Bu kompozitlerin mekanik, yapısal özellikleri genellikle içerdiği bileşenlerin özelliklerinin türevini oluşturmaktadır (Camargo et al., 2009).

1.1.4. Bozunmalarına Göre:

Biyobozunur (Biyolojik olarak emilebilir) kompozitler: Bu kompozitler, zamanla bozulur ve vücut tarafından emilir. Genellikle doku mühendisliğinde geçici iskeleler (PCL, PEOT/PBT gibi) kullanılırlar.

Çözünür olmayan kompozitler: Bu kompozitler stabildir ve zamanla bozulmazlar. Genellikle eklem replasmanları gibi kalıcı implant amacıyla kullanılmaktadır.

Kompozit biyomalzemelerin sınıflandırılması her ne kadar Şekil 2'de bahsedildiği üzere olsa da uygulama açısından ortopedik ve dental uygulamalar, doku mühendisliği ve ilaç taşıyıcı sistemler olmak üzere üç ana başlıkta incelenmiştir (Chen et al., 2017; Mano et al., 2004; Rezwan et al., 2006).

1.2.1. Ortopedik ve Dental Uygulamalar

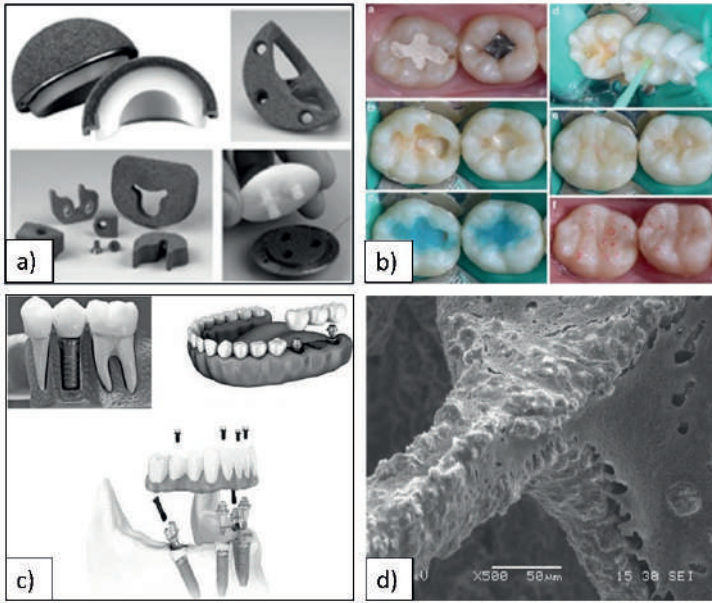
Ortopedik ve dental implantlarda genellikle güçlü, sert ve biyouyumlu malzemelerden üretilmesi gerekmektedir. Geleneksel olarak, bu uygulamalar için titanyum ve paslanmaz çelik gibi metaller biyolojik olarak çok fazla bozunmaya uğramadığı için kullanılmaktadır. Bununla birlikte, gerek biyoaktiviteden yoksun oluşları, gerekse de doğal kemiğe kıyasla yüksek rijitlikleri nedeniyle stres kalkanına neden olabilirler. Bu bağlamda karbon fiber takviyeli polimerler (CFRP'ler) ve biyoaktif cam-seramik kompozitler gibi kompozit malzemeler bu alanda umut verici bir alternatif oluşturmaktadır. Örneğin, biyoaktif cam-seramikler, çevresinde bulunan kemikle birleşebilmekte ve yeni kemik büyümesini uyararak biyoaktif ve mekanik olarak kemiğe katkı sağlamaktadır (Knowles et al., 1992; Manikandan et al., 2021). Biyokompozit malzemelerin, ortopedik ve dental implant uygulamalarıyla ilgili çeşitli örnekleri Şekil 3'te gösterilmiştir.

Kemik doku mühendisliğinde, kompozit biyomalzemeler, vücudun hasarlı veya kayıp kemik dokusunu yeniden oluşturulmasında kritik bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, doğal kemiğin yapısını ve mekanik özelliklerini taklit eden iskeleler oluşturmak için kompozit malzemeler kullanılabilir. Hidroksiapatit (HA) veya trikalsiyum fosfat (TCP) gibi biyoseramiklerle takviyelendirilmiş polimer matrisli kompozitler, kemik dokusu mühendisliğinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kompozitler mekanik destek sağlamanın yanı sıra, hücre tutunmasını ve çoğalmasını destekler ve yeni kemik dokusunun oluşumunu kolaylaştırır (Dorozhkin, 2011).

Ortopedik implantların geliştirilmesinde kompozit biyomalzemeler uygulama alanı bulmaktadır. Örneğin, lifler veya parçacıklarla takviyelendirilmiş polimer matrisli kompozitler, eklem replasmanları için yük taşıyan implantlar üretmek amacıyla kullanılmaktadır. Kompozit tasarım, biyouyumluluğu korurken mukavemet ve tokluk gibi mekanik özelliklerin optimizasyonuna olanak sağlamaktadır. Ek olarak, kompozit malzemeler, implantı çevreleyen kemik dokusu ile doğrudan entegrasyonu olan osseointegrasyonu destekleyecek şekilde uyarlanabilmektedir (Navarro et al., 2008).

Restoratif malzemeler, hasarlı diş yapısını onarmak veya değiştirmek için dental restoratif malzemeler olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Dental kompozitler tipik olarak cam elyafı veya nanoparçacıklar gibi inorganik dolgu maddeleri ile takviyelendirilmiş bir reçine matrisinden oluşur. Bu malzemeler, doğal diş rengiyle uyumlu hale getirilebildikleri için mükemmel estetik sunmaktadırlar. Ayrıca, dayanıklı ve uzun ömürlü restorasyonlar

sağlayarak aşınma direnci ve kırılma tokluğu gibi iyi mekanik özellikler sergilerler (Manikandan et al., 2021; Ramakrishna et al., 2001).



Şekil 3. a) Ortopedik biyokompozit örnekleri (Levine et al., 2006) b) Restoratif dental örnekleri (Dudea et al., 2015) c) Kompozit diş implantı (Das & Bhattacharjee, 2019) d) Polimer kaplı Bioglass® iskele (Misra et al., 2006)

Diş implantları, eksik veya işlevini yitirmiş dişlerin yerine kullanılan kompozit biyomalzemelerdir. Dental implant kompozitleri genellikle fiberler veya parçacıklarla takviyelendirilmiş seramik veya metalik bir matris içerir. Kompozitlerin kullanımı, biyouyumluluk ve osseointegrasyonu korurken, mukavemet ve sertlik gibi mekanik özelliklerin optimizasyonuna olanak sağlar. Kompozit diş implantları, gelişmiş estetik, dayanıklılık ve uzun vadeli kararlılık sağlayarak geleneksel malzemelere bir alternatif sunmaktadır (Salernitano & Migliaresi, 2003).

Ortodontik braketler, dişlere yapıştırılarak ortodontik tedavi sırasında diş hareketini yönlendirmek amacıyla kullanılmaktadır. Kompozit braketler, geleneksel metal braketlere kıyasla daha iyi estetik, daha az sürtünme ve gelişmiş hasta konforu dahil olmak üzere çeşitli avantajlar sağlamaktadır. Kompozitlerin kullanımı, ortodontik tedavi sırasında ağız sağlığını destekleyen antimikrobiyal ajanların dahil edilmesine de olanak sağlamaktadır (Manikandan et al., 2021).

1.3.1. Doku Mühendisliği Uygulamaları

Doku mühendisliği, dokuları ve tüm organları yeniden oluşturmayı, tedavi ederek sürdürmeyi veya geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bu alan, sadece doğal dokuların mekanik özelliklerini değil aynı zamanda biyolojik fonksiyonlarını da taklit eden malzemeler gerektirmektedir. Kardiyovasküler doku mühendisliği uygulamalarıyla ilgili çeşitli örnekler Şekil 4'te gösterilmiştir.

Doku mühendisliğindeki kompozit malzemeler genellikle 3B gözenekli yapı iskeleleri şeklinde üretilmektedir. Bu iskeleler, hücrelerin yapışması, çoğalması ve farklılaşması ve sonunda yeni doku oluşturması için geçici bir matris görevi görmektedir. Optimum mekanik özellikler, bozunma hızı ve biyoaktivite sağlamak için birleştirilmiş, biyolojik olarak parçalanabilen polimerler, seramikler ve biyoaktif camlardan oluşabilmektedir (Han et al., 2020; O'Brien, 2011).

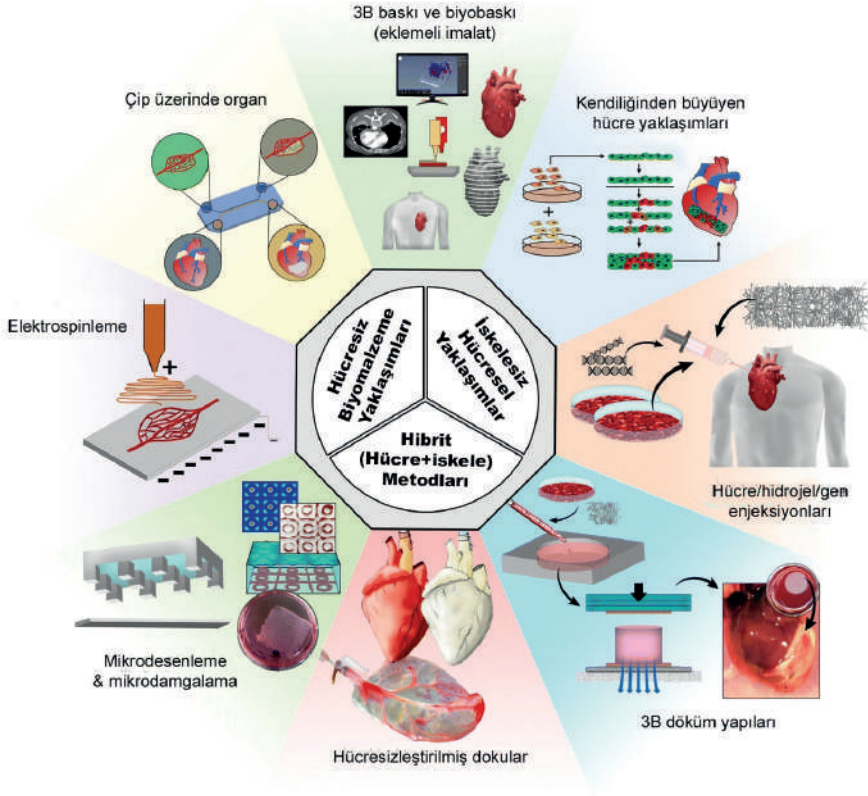
Örneğin, polimer-biyoseramik kompozitler bu alanda umut vadetmektedir. Polimer bileşen, esneklik ve biyolojik olarak parçalanabilirlik sunabilirken, biyoseramik, hücre yapışmasını ve kemik yenilenmesini teşvik ederek biyoaktivite sağlayabilmektedir.

İskeleler (scaffolds), hücre bağlanmasını, çoğalmasını ve doku oluşumunu destekleyen üç boyutlu (3B) bir yapı sağlar. Bu yapı iskelelerinin kompozit yapısı, tamamlayıcı özelliklere sahip birden fazla malzemenin ilave edilmesine olanak sağlar. Örneğin, biyoaktif seramik parçacıklarla takviyelendirilmiş polimer bir matris, hücresel aktiviteyi ve doku rejenerasyonunu desteklerken aynı zamanda mekanik destek sağlayan bir yapı iskelesi oluşturabilmektedir (Arampatzis et al., 2022; Cabral et al., 2019).

Mekanik özellikler, hedef dokuyla eşleşen istenilene sahip olacak şekilde uyarlanabilmektedir. Malzemelerin bileşimi ve mimarisi ayarlayarak mekanik dayanım, esneklik ve sağlamlık optimize edilebilmektedir. Mekanik özellikler, iskelenin fizyolojik kuvvetlere dayanması gereken kemik ve kırıldak gibi yük taşıyan dokular açısından çok önemlidir (Lin et al., 2021).

Biyoaktivite ve biyolojik sinyalizasyon, hücresel davranışı ve doku rejenerasyonunu etkileyen biyoaktif özelliklere sahip olacak şekilde tasarlanabilmektedir. Biyoaktif molekülleri, büyüme faktörlerini veya yüzey modifikasyonlarını kompozit iskeleye dahil etmek, hücre yapışmasını, çoğalmasını ve farklılaşmasını destekleyebilmektedir. Örneğin, spesifik biyolojik sinyal verme yeteneklerine sahip büyüme faktörlerinin veya peptitlerin eklenmesi, hücre davranışına etki edebilmekte ve doku rejenerasyonunu destekleyebilmektedir (Bertsch et al., 2023).

Çok işlevli özellikler, farklı işlevleri tek bir iskelede birleştirebilmektedir. Örneğin, manyetik nanoparçacıkların dahil edilmesi, iskele yöneliminin veya hücre davranışının uzaktan manipülasyonunu ve kontrolünü sağlayabilmektedir. Benzer şekilde, bileşik yapı iskelesi içindeki ilaç dağıtım sistemlerinin entegrasyonu, doku rejenerasyonunu desteklemek veya enflamasyonu önlemek için terapötiklerin lokalize ve kontrollü salınımını sağlayabilmektedir (Bertsch et al., 2023; Lin et al., 2021).



Şekil 4. Kardiyovasküler doku mühendisliği paradigmalarının ve yaygın olarak kullanılan biyomühendislik yaklaşımlarının gösterilmesi (Tomov et al., 2019).

Hibrit kompozit biyomalzemeler, polimerler, seramikler ve metaller gibi birden çok malzeme türünü tek bir yapı iskelesinde birleştirir. Bu durum, farklı malzeme özelliklerinin sinerjik kullanımına izin vermektedir. Örneğin, bir hibrit kompozit yapı iskelesi, esneklik ve hücre uyumluluğu için bir polimer matris, biyoaktivite ve mekanik mukavemet için seramik parçacıklar veya iletkenliği veya yapısal desteği arttırmak için metalik malzemeler içerebilmektedir (Tripathy et al., 2019).

Vaskülarizasyon ve doku entegrasyonu, tasarlanmış dokularda fonksiyonel kan damarı ağlarının gelişimini kolaylaştırabilmektedir. Anjiyogeneziyi (yeni damarların oluşması) destekleyen malzemeler ve vaskülarizasyonu (endotel hücrelerinin oluşturulmasıyla ortaya çıkan yeni kan damarlarının oluşturulması) artıran biyoaktif faktörleri bir araya getiren kompozit yapı iskeleleri, tasarlanmış doku içindeki hücrelere besin ve oksijen sağlanması için kritik olan vasküler ağların oluşumunu destekleyebilmektedir (Katti et al., 2008; Nikolova & Chavali, 2019).

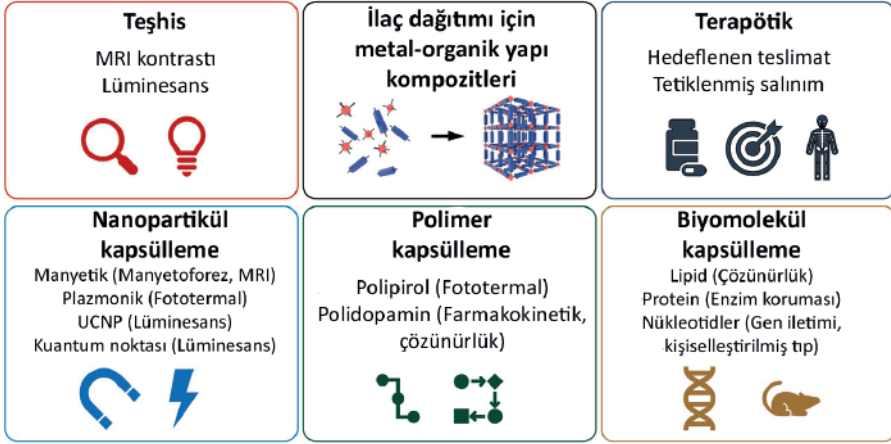
Çip üzerinde organ (Organ-on-a-chip) sistemler, ilaç taraması, hastalık modelleme ve kişiselleştirilmiş tıp için bir platform sağlayarak belirli organların yapısını ve işlevini kopyalamayı amaçlamaktadır. Kompozit malzemeler, doğal dokularda bulunan karmaşık hücresele ve fizyolojik etkileşimleri taklit ederek, bu sistemler içinde çoklu hücre tiplerinin, biyomalzemelerin ve mikroakışkan kanalların entegrasyonuna izin vermektedir (Li et al., 2022).

1.4.1. İlaç Taşıyıcı Sistem Uygulamaları

Kompozit malzemeler, kontrollü ilaç taşıyıcı sistemleri alanında da önemli bir rol oynamaktadır. Bu sistemler, ilaçları kontrollü bir oranda ve hedeflenen yere ulaştırmayı amaçlamaktadır. Kompozitler, pH veya sıcaklık gibi belirli tetikleyicilere yanıt olarak ilaç salmaları ile benzersiz özellikler sunabilmektedirler. Nanopartiküller içeren nanokompozitler, ilaç salınımlarında sıklıkla kullanılmaktadır. Nanopartiküller ilaçlarla yüklenmekte ve daha sonra bir polimer matrise gömülmektedir. Bu kompozisyon, ilaçların sürekli ve kontrollü salımına izin vermektedir (Huo et al., 2022). İlaç taşıyıcı sistemlerin kanser tedavisi ve teşhisindeki uygulamaları Şekil 5'te gösterilmektedir.

Kontrollü salım, kompozitin polimer matrisi içerisine ilaçları dahil edilmesiyle, salım kinetiği, istenen terapötik profile uyacak şekilde uyarlanabilmektedir. Bileşik yapı, ilaç yüklemesi, polimer bozunma hızı ve difüzyon özellikleri gibi faktörlerin modülasyonuna izin vererek ilaç salım hızları ve süreleri üzerinde hassas kontrol sağlamaktadır (Adepu & Ramakrishna, 2021).

Hedeflenen teslimat, ilaçların vücuttaki belirli bölgelere özel olarak iletimini sağlamak için tasarlanabilmektedir. Bileşik yüzeyi işlevselleştirilerek veya antikörler veya peptitler gibi hedefleyici ligandları dahil edilerek, ilaç yüklü bileşik seçici olarak farklı hücre tiplerine veya dokulara bağlanabilmektedir. Bu hedefe yönelik uygulama yaklaşımı, terapötik etkinliği artırmakta, sistemik yan etkileri azaltmakta ve istenen bölgedeki ilaç konsantrasyonunu ise arttırmaktadır (Muro, 2012).



Şekil 5. Metal-organik yapı kompozitleri ve bunların kanser tedavisi ve teşhisindeki uygulamaları (Osterrieth & Fairen-Jimenez, 2021).

Kombinasyon tedavisi, birden fazla ilacın aynı anda veya sıralı bir şekilde verilmesini kapsamaktadır. Bu yaklaşım, karmaşık hastalıkların veya çoklu terapötik ajanların gerekli olduğu durumların tedavisinde kullanılmaktadır. Bileşik matris, kombine tedavilerin sinerjistik etkisine izin vererek farklı ilaç türlerini, salım mekanizmalarını ve salım oranlarını barındırabilmektedir (He et al., 2016).

Kompozit biyomalzemeler, tetiklenen ilaç salınımına yönelik harici uyaranlara veya dahili fizyolojik ipuçlarına yanıt verecek şekilde tasarlanabilmektedir. Bu uyaranlar, hedef dokuda bulunan sıcaklık, pH, ışık, manyetik alanlar veya enzimleri içerebilmektedir. Sıcaklığa duyarlı polimerler veya pH'a duyarlı parçacıklar gibi yanıt veren bileşenlerin dahil edilmesiyle, ilaç salınımı, belirli tetikleyicilere yanıt olarak modüle edilerek tedavinin özgüllüğü ve kesinliği geliştirilebilmektedir (Municoy et al., 2020).

İmplant edilebilir cihazlar implantlar, mikropartiküller, nanopartiküller veya hidrojel şeklinde olabilmektedir. Kompozit yapı, mekanik destek sağlarken, matris, ilaçların uzun bir süre boyunca kontrollü salınmasına izin vermektedir. İmplant edilebilir ilaç verme cihazları, kanser tedavileri veya kronik hastalık yönetimi gibi uzun süreli ilaç uygulamasının gerekli olduğu durumlarda kullanılmaktadır (Stewart et al., 2018b).

Kompozit biyomalzemeler, ilaçları doğrudan hedef doku veya organa vererek bölgesel tedaviye olanak sağlamaktadır. Bu lokalize ilaç dağıtım yaklaşımı, sistemik maruziyeti en aza indirmekte, potansiyel yan etkileri azaltmakta ve terapötik etkinliği en üst düzeye çıkarmaktadır. İlaçları

kompozit bir yapı iskelesi veya taşıyıcı içinde kapsülleyerek, doğrudan hedef bölgeye yerleştirilebilmekte ve tam olarak ihtiyaç duyulan yerde konsantrre ilaç salınımı sağlamaktadır (Mansour et al., 2023).

Görüntüleme yöntemleriyle kombinasyon, ilaç iletiminin ve terapötik yanıtın gerçek zamanlı izlenmesi için kontrast maddeler veya nanopartiküller gibi görüntüleme maddeleriyle entegre edilebilmektedir. Bu entegrasyon, vücutta ilaç salınımının, dağılımının ve birikiminin görselleştirilmesine ve izlenmesine olanak tanımaktadır. Görüntüleme kılavuzlu ilaç dağıtım sistemleri, tedavi izleme, optimizasyon ve kişiselleştirilmiş ilaç yaklaşımlarını geliştirmektedir (Reeßing & Szymanski, 2019).

2. Sonuçlar

Kompozit malzemelerin biyomalzeme alanındaki kullanımı, ortopedi, dişçilik, doku mühendisliği ve ilaç dağıtımını gibi birçok alanda başarılı uygulamalara ve büyük potansiyele sahiptir. Bu malzemeler, farklı malzemelerin stratejik bir şekilde bir araya getirilmesiyle üstün mekanik özelliklere, biyoaktiviteye ve biyobozunurluğa sahip kompozitlerin oluşturulabilmesini sağlamaktadır. Bu alanda devam eden araştırmalar, sağlık ve tıbbi tedavilerde yenilikçi çözümlerin ortaya çıkacağına bir göstergesidir. Ortopedi ve dişçilik alanlarında, kompozit biyomalzemeler çok yönlü çözümler sunarak kemik rejenerasyonu, ortopedik implantlar, diş restorasyonları, diş implantları ve ortodontik braketler gibi uygulamalarda önemli bir potansiyele sahiptir. Bu malzemeler, mükemmel mekanik özellikleri, uyarlanmış biyoaktiviteyi ve biyouyumluluğu birleştirerek hastaların iyileştirilmesine ve yaşam kalitesinin artırılmasına katkıda bulunmaktadır. Kompozit biyomalzemelerdeki araştırma ve geliştirme çalışmaları, ortopedi ve diş hekimliği uygulamalarında inovasyonu yönlendirmeye ve genişletmeye devam etmektedir. Doku mühendisliği uygulamalarında, kompozit biyomalzemeler hasarlı veya hastalıklı dokuların rejenerasyonu ve fonksiyonel restorasyonu için büyük bir potansiyele sahiptir. Araştırmacılar, kompozit malzemelerin çok yönlülüğünden ve uyarlanabilir özelliklerinden yararlanarak, doku mühendisliği alanını ilerletmeye devam etmektedir. İlaç dağıtım sistemlerinde kullanılan kompozit biyomalzemeler, kontrollü salım, hedefli dağıtım, kombinasyon terapisi, uyarılara duyarlı salım, implante edilebilir cihazlar, lokalize terapi ve görüntüleme yetenekleri gibi birçok avantaj sunar. Bu uygulamalar, ilaç dağıtımında devrimsel gelişmelere, terapötik sonuçları iyileştirmeye, yan etkileri en aza indirmeye ve hasta bakımını ilerletme potansiyeline sahiptir. Kompozit biyomalzemelerdeki devam eden araştırma ve geliştirme çalışmaları, ilaç dağıtım sistemlerinin yeteneklerini iyileştirmeye ve genişletmeye devam ederek daha kesin ve etkili tedaviler sağlamaktadır.

3. Referanslar

- Adepu, S., & Ramakrishna, S. (2021). Controlled Drug Delivery Systems: Current Status and Future Directions. *Molecules*, 26(19). <https://doi.org/10.3390/MOLECULES26195905>
- Almulhim, K. S., Syed, M. R., Alqahtani, N., Alamoudi, M., Khan, M., Ahmed, S. Z., & Khan, A. S. (2022). Bioactive Inorganic Materials for Dental Applications: A Narrative Review. *Materials* 2022, Vol. 15, Page 6864, 15(19), 6864. <https://doi.org/10.3390/MA15196864>
- Arampatzis, A., Karra, A., Kyrilas, E., Kampasakali, E., Tsalikis, L., Barmपालेखिस, P., Christofilos, D., & Assimopoulou, A. N. (2022). Bioactive 3D printed scaffolds for the treatment of periodontal diseases. *GA – 70th Annual Meeting 2022*, 88. <https://doi.org/10.1055/S-0042-1759365>
- Bertsch, C., Maréchal, H., Gribova, V., Lévy, B., Debry, C., Lavalle, P., & Fath, L. (2023). Biomimetic Bilayered Scaffolds for Tissue Engineering: From Current Design Strategies to Medical Applications. *Advanced Healthcare Materials*, 2203115. <https://doi.org/10.1002/ADHM.202203115>
- Cabral, C. S. D., Miguel, S. P., de Melo-Diogo, D., Louro, R. O., & Correia, I. J. (2019). Green reduced graphene oxide functionalized 3D printed scaffolds for bone tissue regeneration. *Carbon*, 146, 513–523. <https://doi.org/10.1016/J.CARBON.2019.01.100>
- Camargo, P. H. C., Satyanarayana, K. G., & Wypych, F. (2009). Nanocomposites: synthesis, structure, properties and new application opportunities. *Materials Research*, 12(1), 1–39. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392009000100002>
- Chen, H., Malheiro, A. D. B. F. B., Van Blitterswijk, C., Mota, C., Wieringa, P. A., & Moroni, L. (2017). Direct Writing Electrospinning of Scaffolds with Multidimensional Fiber Architecture for Hierarchical Tissue Engineering. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 9(44), 38187–38200. https://doi.org/10.1021/ACSAMI.7B07151/ASSET/IMAGES/AM-2017-07151J_M001.GIF
- Das, R., & Bhattacharjee, C. (2019). Titanium-based nanocomposite materials for dental implant systems. *Applications of Nanocomposite Materials in Dentistry*, 271–284. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813742-0.00016-X>
- Dorozhkin, S. V. (2011). Biocomposites and hybrid biomaterials based on calcium orthophosphates. *Biomatter*, 1(1), 3. <https://doi.org/10.4161/BIOM.1.1.16782>
- Dudea, D., Alb, C., Culic, B., & Alb, F. (2015). Performance of Dental Composites in Restorative Dentistry. *Handbook of Bioceramics and Biocomposites*, 1–40. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09230-0_53-1
- Gilbert, J. L., & Kubacki, G. W. (2016). Oxidative Stress, Inflammation, and the Corrosion of Metallic Biomaterials: Corrosion Causes Biology and

- Biology Causes Corrosion. *Oxidative Stress and Biomaterials*, 59–88. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803269-5.00003-6>
- Guerard, S., Manaserro, M., Viateau, V., Migonney, V., Skalli, W., & Mitton, D. (2014). Biomechanical evaluation of a bioactive artificial anterior cruciate ligament. *Hal.Science*, 1(4). <https://doi.org/10.12989/aba.2014.1.4.239i>
- Han, F., Wang, J., Ding, L., Hu, Y., Li, W., Yuan, Z., Guo, Q., Zhu, C., Yu, L., Wang, H., Zhao, Z., Jia, L., Li, J., Yu, Y., Zhang, W., Chu, G., Chen, S., & Li, B. (2020). Tissue Engineering and Regenerative Medicine: Achievements, Future, and Sustainability in Asia. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8, 83. <https://doi.org/10.3389/FBIOE.2020.00083>
- He, B., Lu, C., Zheng, G., He, X., Wang, M., Chen, G., Zhang, G., & Lu, A. (2016). Combination therapeutics in complex diseases. *Journal of Cellular and Molecular Medicine*, 20(12), 2231. <https://doi.org/10.1111/JCMM.12930>
- Huo, Y., Liu, Y., Xia, M., Du, H., Lin, Z., Li, B., & Liu, H. (2022). Nanocellulose-Based Composite Materials Used in Drug Delivery Systems. *Polymers*, 14(13). <https://doi.org/10.3390/POLYM14132648>
- Katti, D. S., Vasita, R., & Shanmugam, K. (2008). Improved Biomaterials for Tissue Engineering Applications: Surface Modification of Polymers. *Current Topics in Medicinal Chemistry*, 8(4), 341–353. <https://doi.org/10.2174/156802608783790893>
- Knowles, J. C., Hastings, G. W., Ohta, H., Niwa, S., & Boeree, N. (1992). Development of a degradable composite for orthopaedic use: in vivo biomechanical and histological evaluation of two bioactive degradable composites based on the polyhydroxybutyrate polymer. *Biomaterials*, 13(8), 491–496. [https://doi.org/10.1016/0142-9612\(92\)90099-A](https://doi.org/10.1016/0142-9612(92)90099-A)
- Levine, B. R., Sporer, S., Poggie, R. A., Della Valle, C. J., & Jacobs, J. J. (2006). Experimental and clinical performance of porous tantalum in orthopedic surgery. *Biomaterials*, 27(27), 4671–4681. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMATERIALS.2006.04.041>
- Li, Z., Hui, J., Yang, P., & Mao, H. (2022). Microfluidic Organ-on-a-Chip System for Disease Modeling and Drug Development. *Biosensors 2022*, Vol. 12, Page 370, 12(6), 370. <https://doi.org/10.3390/BIOS12060370>
- Lin, C.-Y., Kang, J.-H., Lin, C.-Y., & Kang, J.-H. (2021). Mechanical Properties of Compact Bone Defined by the Stress-Strain Curve Measured Using Uniaxial Tensile Test: A Concise Review and Practical Guide. *Materials 2021*, Vol. 14, Page 4224, 14(15), 4224. <https://doi.org/10.3390/MA14154224>
- Mallick, M., Are, R. P., & Babu, A. R. (2022). An overview of collagen/bio-ceramic and synthetic collagen for bone tissue engineering. *Materialia*, 22, 101391. <https://doi.org/10.1016/J.MTLA.2022.101391>

- Manikandan, S., Gokulanathan, L., Thangavel, P., & Sathishkumar, S. (2021). A Review on Bio-Composite Materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1084(1), 012127. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1084/1/012127>
- Mano, J. F., Sousa, R. A., Boesel, L. F., Neves, N. M., & Reis, R. L. (2004). Bioinert, biodegradable and injectable polymeric matrix composites for hard tissue replacement: state of the art and recent developments. *Composites Science and Technology*, 64(6), 789–817. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSCITECH.2003.09.001>
- Mansour, A., Romani, M., Acharya, A. B., Rahman, B., Verron, E., & Badran, Z. (2023). Drug Delivery Systems in Regenerative Medicine: An Updated Review. *Pharmaceutics*, 15(2). <https://doi.org/10.3390/PHARMACEUTICS15020695>
- Misra, S., Valappil, S., Roy, I., Biomacromolecules, A. B., & 2006, undefined. (2006). Polyhydroxyalkanoate (PHA)/inorganic phase composites for tissue engineering applications. *ACS Publications*, 7(8), 2249–2258. <https://doi.org/10.1021/bm060317c>
- Municoy, S., Álvarez Echazú, M. I., Antezana, P. E., Galdopórpora, J. M., Olivetti, C., Mebert, A. M., Foglia, M. L., Tuttolomondo, M. V., Alvarez, G. S., Hardy, J. G., & Desimone, M. F. (2020). Stimuli-Responsive Materials for Tissue Engineering and Drug Delivery. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(13), 1–39. <https://doi.org/10.3390/IJMS21134724>
- Muro, S. (2012). Challenges in design and characterization of ligand-targeted drug delivery systems. *Journal of Controlled Release : Official Journal of the Controlled Release Society*, 164(2), 125. <https://doi.org/10.1016/J.JCONREL.2012.05.052>
- Navarro, M., Michiardi, A., Castaño, O., & Planell, J. A. (2008). Biomaterials in orthopaedics. *Journal of the Royal Society Interface*, 5(27), 1137. <https://doi.org/10.1098/RSEIF.2008.0151>
- Nayak, G. S., Carradó, A., Masson, P., Pourroy, G., Mouillard, F., Migonney, V., Falentin-Daudre, C., Pereira, C., & Palkowski, H. (2021). Trends in Metal-Based Composite Biomaterials for Hard Tissue Applications. *JOM 2021 74:1*, 74(1), 102–125. <https://doi.org/10.1007/S11837-021-04992-5>
- Nikolova, M. P., & Chavali, M. S. (2019). Recent advances in biomaterials for 3D scaffolds: A review. *Bioactive Materials*, 4, 271–292. <https://doi.org/10.1016/J.BIOACTMAT.2019.10.005>
- O'Brien, F. J. (2011). Biomaterials & scaffolds for tissue engineering. *Materials Today*, 14(3), 88–95. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(11\)70058-X](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(11)70058-X)

- Osterrieth, J. W. M., & Fairen-Jimenez, D. (2021). Metal–Organic Framework Composites for Theragnostics and Drug Delivery Applications. *Biotechnology Journal*, *16*(2), 2000005. <https://doi.org/10.1002/BIOT.202000005>
- Park, J., & Lakes, R. (2007). *Biomaterials: an introduction*. [https://www.google.com/books?hl=tr&lr=&id=bb68wb0R_EAC&oi=fnd&pg=PR5&dq=R.+S.+Park,+J.+B.+Lakes,+Biomaterials:+An+Introduction,+3rd+ed.+\(Florida,+2007\)&ots=TD8KayMMHI&sig=VQ0pxeU-teK3Zc-ddPHhI_3EAWk](https://www.google.com/books?hl=tr&lr=&id=bb68wb0R_EAC&oi=fnd&pg=PR5&dq=R.+S.+Park,+J.+B.+Lakes,+Biomaterials:+An+Introduction,+3rd+ed.+(Florida,+2007)&ots=TD8KayMMHI&sig=VQ0pxeU-teK3Zc-ddPHhI_3EAWk)
- Pina, S., Reis, R. L., & Oliveira, J. M. (2018). Ceramic biomaterials for tissue engineering. *Fundamental Biomaterials: Ceramics*, 95–116. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102203-0.00004-4>
- Ramakrishna, S., Mayer, J., Wintermantel, E., & Leong, K. W. (2001). Bio-medical applications of polymer-composite materials: a review. *Composites Science and Technology*, *61*(9), 1189–1224. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(00\)00241-4](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(00)00241-4)
- Reeßing, F., & Szymanski, W. (2019). Following nanomedicine activation with magnetic resonance imaging: why, how, and what's next? *Current Opinion in Biotechnology*, *58*, 9–18. <https://doi.org/10.1016/J.COPBIO.2018.10.008>
- Rezwan, K., Chen, Q. Z., Blaker, J. J., & Boccaccini, A. R. (2006). Biodegradable and bioactive porous polymer/inorganic composite scaffolds for bone tissue engineering. *Biomaterials*, *27*(18), 3413–3431. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMATERIALS.2006.01.039>
- Salernitano, E., & Migliaresi, C. (2003). Composite materials for biomedical applications: a review. *Journal of Applied Biomaterials & Biomechanics*, *1*, 3–18. <https://doi.org/10.1177/228080000300100102>
- Stewart, S. A., Domínguez-Robles, J., Donnelly, R. F., & Larrañeta, E. (2018a). Implantable Polymeric Drug Delivery Devices: Classification, Manufacture, Materials, and Clinical Applications. *Polymers 2018, Vol. 10, Page 1379*, *10*(12), 1379. <https://doi.org/10.3390/POLYM10121379>
- Stewart, S. A., Domínguez-Robles, J., Donnelly, R. F., & Larrañeta, E. (2018b). Implantable Polymeric Drug Delivery Devices: Classification, Manufacture, Materials, and Clinical Applications. *Polymers*, *10*(12). <https://doi.org/10.3390/POLYM10121379>
- Tomov, M. L., Gil, C. J., Cetnar, A., Theus, A. S., Lima, B. J., Nish, J. E., Buser-Heaton, H. D., & Serpooshan, V. (2019). Engineering Functional Cardiac Tissues for Regenerative Medicine Applications. *Current Cardiology Reports*, *21*(9), 1–13. <https://doi.org/10.1007/S11886-019-1178-9/TABLES/1>

- Tripathy, N., Perumal, E., Ahmad, R., Song, J. E., & Khang, G. (2019). Hybrid Composite Biomaterials. *Principles of Regenerative Medicine*, 695–714. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809880-6.00040-0>
- Yıldızhan, Ş., Çalık, A., Özcanlı, M., & Serin, H. (2018). *Bio-composite materials: a short review of recent trends, mechanical and chemical properties, and applications*. <https://doi.org/10.26701/ems.369005>
- Zagho, M. M., Hussein, E. A., & Elzatahry, A. A. (2018). Recent Overviews in Functional Polymer Composites for Biomedical Applications. *Polymers*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/POLYM10070739>

Alternatif Enerji Kaynakları Kullanılan Otoklav Yöntemi İçin Karşılaştırmalı Maliyet Analizleri

Kaan Gölçek¹

Asım Sinan Karakurt²

Özet

Çevresel etmenlerin en az enerji üretimi ve kullanımı kadar etkili olduğu günümüzde üretilen ürün başına tüketilen enerjinin yanında ürün başına çevreye verdiği emisyonlar da etkili olmaktadır. Bu nedenle üretim sektöründe yaygın olarak kullanılan tekniklerinin iyileştirilmesi bu sürece olumlu katkıda bulunacaktır. Bu çalışmada, kompozit üretiminde yaygın bir şekilde kullanılan otoklav fırınlar için alternatif enerjiler ve diğer enerjiler kullanılması ile karbon salımının minimize edilerek yatırım ve işletme maliyetleri gelecek piyasa koşulları için optimize edilmesi üzerine çalışılmıştır. Sistemde kullanılan enerji kaynağı olarak alternatif enerjiler ve doğal gaz kullanımı ile toplam enerji maliyetinin ve karbon salımının düşürüldüğü görülmüştür.

1. Giriş

Denizcilikten uzay ve havacılığa, otomotivden bilişim sistemlerine kadar birçok alanda ihtiyaç duyulan ürünlerin kısa sürede, kaliteli, çevreci ve ekonomik bir şekilde üretiminin yapılabilmesi sürdürülebilir bir rekabet için gerekli bir durumdur. Hızla artan ve sürekli değişen üretim ihtiyaçlarının optimum bir şekilde karşılanabilmesi için üretim maliyeti ve kullanılabileceği sıcaklık aralıklarının darlığı gibi dezavantajlarına karşın hafiflik, yüksek dayanım ve düşük termal genleşme gibi avantajları bulunan kompozit malzemelerin kullanımı geçmişte olduğu gibi günümüzde de ayrıcalıklı yerini korumaktadır (Dhaka ve Ismail, 2021). Özellikle havacılık ve uzay

1 Yüksek Mühendis, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü, Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, TÜRKİYE, Tulkas Mühendislik ve Teknoloji Limited Şirketi, kaan.golcek@std.yildiz.edu.tr, 0000-0002-6958-4863

2 Dr. Öğr. Üyesi, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü, Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, TÜRKİYE, asinan@yildiz.edu.tr, 0000-0002-6205-9089

endüstrisinde kompozit parçaların kullanılması, parça ağırlığını azaltarak artan hıza, iyileştirilmiş yakıt verimliliğine ve güç ve dayanıklılığı artırarak güvenilirliğin artmasına olanak sağlamıştır (Ekuase, Anjum, Eze ve Okoli, 2022). Üretim esnasında birim ürün başına harcanan enerjinin ve salınan emisyonların önemli olduğu ve bununla ilgili yasal düzenlemelerin de yürürlüğe konulduğu dikkate alınır ise hem üretim yöntemlerinde hem de üretimde kullanılacak malzeme türlerinde iyileştirmelerin yapılması gerekli bir durumdur.

Kompozit malzemeler, iki veya daha fazla türde ayrı bileşenden oluşur. Bu kombinasyon genellikle her bir bileşenin faydalarını ayrı ayrı gerçekleştirmek için uygulanırken, performans açısından her bir kompozit ayrı parçadan daha üstün olan yeni bir malzeme elde edilir. Kompozit üretimi için en yaygın kullanılan tekniklerden biri, reçine ve liflerin bir vakum torbası içine alınmış bir kalıba yerleştirilmesini içeren vakum torbası/otoklav kalıplama işlemidir (Advani ve Hsiao, 2012). 1800'lü yılların sonlarından beri tıbbi sterilizasyon işlemlerinde de kullanılan otoklav yöntemi temelde Dennis Papin tarafından icat edilen basınçlı kapların çalışma prensipleri ile aynı şekilde işlemektedir (Hugo, 1991).

Özellikle son zamanlarda yapılan çalışmalar incelendiğinde kalıpların ısıtma ve soğutma aşamalarında enerji verimliliği ve zaman optimizasyonu üzerinde yoğunlaştığı görülmüştür. Dünyamız sanayisinde artan talepler ve üretim kapasiteleri karşısında dünyada yaşanmaya başlayan enerji kıtlığı, yüksek karbon emisyonlarından kaynaklanan çevre kirlilikleri ve bunların sebep olduğu iklim krizleri yakın gelecekte emisyonlarında maliyetlere ciddi oranda etkileyeceği senaryoları göz önüne alındığında hem ticari hem de küresel iklim anlamında sürdürülebilirlik hedeflerinin bu türlerde optimizasyon çalışmalarının yapılmasında önemli ölçüde etkili olmaktadır. Günümüzde birçok sektörde kullanılan ürünlerin üretim tekniklerindeki harcanan toplam enerji dikkate alındığında büyük bir çoğunluğunun termoset plastik ve termoplastik hammaddeler ile üretildiği bilinmektedir (Shama Rao, Simha, Rao ve Ravi Kumar, 2018). Bu ürünlerin üretiminde harcanan enerji ise kullanılan kalıpların ısıtma ve soğutma işlemleri sırasında ortaya çıktığından dolayı proseslerin enerji verimliliği oldukça ön plana çıkmaktadır.

Fisher ve diğ. (Fisher, Levy ve Kratz, 2023) hem fırın hem de otoklav üzerinde yaptığı ölçümlerde ısı transfer katsayılarını karşılaştırmışlardır. Bu çalışmalar incelendiğinde otoklav içerisindeki ısı transfer katsayısının daha büyük olduğu gösterilmiştir. Athanasopoulos ve diğ. (Athanasopoulos, Koutsoukis, Vlachos ve Kostopoulos, 2013) vakum torbalama üretim

yönteminde ısıtıcı olarak fırın yerine kalıp üzerine serilen ısıtıcı kumaş ve film rezistanslar kullanmışlardır. Böylece daha verimli bir ısıtma sağlandığı görülmüştür. Liu ve Fu (Liu ve Fu) ısı transferini artırmak için kanatlı kalıp yüzeyleri ile çalışılmıştır. Kanatlar sayesinde ısıtma/soğutma veriminin artırılacağı ve bu artışın çevrim süresinin kısılması açısından önemli avantajlar sağladığını göstermişlerdir. Hassen ve diğ. (Hassen ve diğerleri, 2022) büyük parçaların eklemeli olarak üretilmesinde otoklav kullanılarak üretilmesini mümkün kılmak için basınç ve vakum bütünlüğünü sağlayacak O-ring'li birleştirme sistemi kullanmışlardır. Forcellese ve diğ. (Forcellese, Marconi, Simoncini ve Vita, 2020) otoklav kürelemeli kalıplama ile basınçlı torba kalıplama yöntemlerini karşılaştırmışlardır. En etkili sürecin kompozit kalıp ve poliüretan poşet ile en sürdürülebilir sürecin ise alüminyum kalıp ve otoklav torbası ile kalıplama olduğunu göstermişlerdir. Vita ve diğ. (Vita, Castorani, Germani ve Marconi, 2019) karbon takviyeli kompozit üretiminde yaygın olarak kullanılan otoklav ve basınçlı torba kalıplama yöntemleri arasında karşılaştırmalı bir yaşam döngüsü ve maliyet analizi gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmada belirlenen amaca göre farklı sonuçların elde edildiği ancak, çevresel şartlar dikkate alındığında ise otoklav yöntemin daha uygun olduğu belirtilmiştir. Yue ve diğ. (Yue ve diğerleri, 2022) otoklavı elektrik rezistansı ile ısıtarak küreleme (ERHC) yöntemlerini karşılaştırmışlardır. ERHC'nin enerji tasarrufu ve hızlı ısıtma sağladığı gözlemlenmişti. Ding ve diğ. (Ding, Chiu ve Liu, 1999) yağ kullanımı ile ısıtma ve soğutma proseslerini incelemişlerdir. Yağ ısıtmalı aletler için ısıtma/soğutma işlemlerinin akış hızı ile kontrol edilebileceği, ısıtma işleminin homojen bir şekilde yapılabileceği, akış debisi yükseldikçe ısı transferinin hızlandığı gösterilmiş ve ısı işlemlerinin daha az enerji girdisi ile yapılabileceği belirtilmiştir.

Bohne ve diğ. (Bohne, Frerich, Jendry, Jürgens ve Ploshikhin, 2018) otoklavdaki ısı transferini incelemişlerdir. Sıcaklığın veya ısıtma hızının ısı transfer katsayısı üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı belirtilmiştir. Buna karşın basınç ve otoklav içerisindeki konumun önemli bir etkiye sahip olduğunu gösterilmişlerdir. Mirzaei ve diğ. (Mirzaei, Krishnan, Al Kobtawy, Roberts ve Palmer, 2021) belirli koşullar altında otoklav içerisinde parça sayısının iki katına çıkarılmasının, ısınma oranlarını önemli ölçüde etkilemeden ısı transferini yavaşlatabileceğini göstermişlerdir. Bu nedenle yaşanan gecikmenin, üretim oranındaki artış sebebiyle tolere edilebileceğini belirtilmişlerdir. Zhang ve diğ. (Zhang, Zhang, Luo, Lin ve Xue, 2021) kalıp sıcaklık dağılımını iyileştirmek amacıyla, ısıtma performansını etkileyen metal ve ısı transfer sıvısı malzemelerinin termal özelliklerini incelemişlerdir. Kalıp malzemesi olarak bakır kullanıldığında çeliğe göre

sıcaklık farkının %30.63 oranında azaldığı ve ısıtma hızının %3.45 oranında arttığı belirtilmiştir. Isı transfer ortamı olarak helyum kullanımı sonucunda ise havaya göre sıcaklık farkının %68.27 azaldığı ve ısıtma hızının %32.76 arttığını belirtmişlerdir. Hu ve diğ. (Hu ve diğerleri, 2020) HFC (ısı transfer kanadı)ler ile kurulan kalıbın sıcaklık alanı sayısal analizi oluşturmuşlardır. Kalıp yüzeyinin maksimum sıcaklık farkı, orijinal kalıba göre %15.1 düşürülerek, kalıbın düşük sıcaklık alanının ısı transfer verimliliği iyileştirildiğini göstermişlerdir. Wang ve diğ. (Wang, Zhu, Wang, Xu ve Ke, 2019) homojen bir kürlenme prosesi elde etmek için kalıp plakasının altına yerleşik lokal bir izolasyon aracı kullanmışlardır. Bu yapının optimizasyonu için sayısal simülasyon ve algoritmalar ile yapılan analizler sonucunda kompozit parçadaki maksimum sıcaklık değişiminin %45.69; maksimum kürlenme derecesinin ise %40.16 oranında azaldığı belirtilmişlerdir. Xie ve diğ. (G. N. Xie, Liu, Zang, Lorenzini ve Biserni, 2013) otoklav içerisinde ısı dağılımını etkileyen faktörler göz önünde bulundurularak kürlenme sıcaklığı alanı üzerinde bir simülasyon modeli tasarlamışlardır. Isı koruma süresi ve periyot sayısındaki artışın ısının homojen dağılımını önemli ölçüde artırdığını göstermişlerdir. Düşük hızda yapılan ısıtmanın; ısıtma verimliliği ve sıcaklık alanının homojenliği bakımından çok daha etkili bir proses sunduğunu belirtmişlerdir. Zhu ve diğ. (Zhu, Frerich, Dimassi, Droste ve Herrmann, 2021) ısı transferi katsayısını sonlu elamanlar metodu ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği metodunu birleştirmişlerdir. İki simülasyon yaparak tam geçici ve yarı geçici olarak durumları ele almışlardır. Yarı geçici sonuçları çok az sayıda hesap yaparak doğru bir sonuç vermeyi başarmışlardır. Xie ve diğ. (G. Xie, Liu, Zhang ve Sunden, 2012) bir diğer çalışmada ise otoklavla kompozit üretiminde ısı dağılımının homojen olmasını sağlamak için termal analiz ve simülasyon yapmışlardır. Bu çalışmalarında kürlenmede sertleşen malzemenin ısı transferine etkisinin çok az olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca bu çalışmalarında ısıtma hızının yavaş olması daha homojen ısıtma sağladığı göstermişlerdir. Lin ve diğ. (Lin ve Guan, 2021) otoklavlarda kürlenme prosesinde ısı dağılımını tahmin etmek için birkaç farklı makina öğrenmesi yöntemi kullanmışlardır. Bu çalışmalarında en iyi makine öğrenmesi yöntemini belirleyerek simülasyona ve denemeye gerek kalmadan en verimli sıcaklık dağılımını elde etmeye yardımcı olduğunu göstermişlerdir. Chen ve diğ. (Chen, Zhan ve Xu, 2015) otoklavlarda kürlenme kalıplarının sıcaklık dağılımı simülasyonunu yaparak daha verimli ve homojen ısıtılmasını incelemişlerdir. Böylece kalıp üretilmeden önce tasarımında iyileştirmeler yapılarak rehberlik etmesi sağlanmıştır.

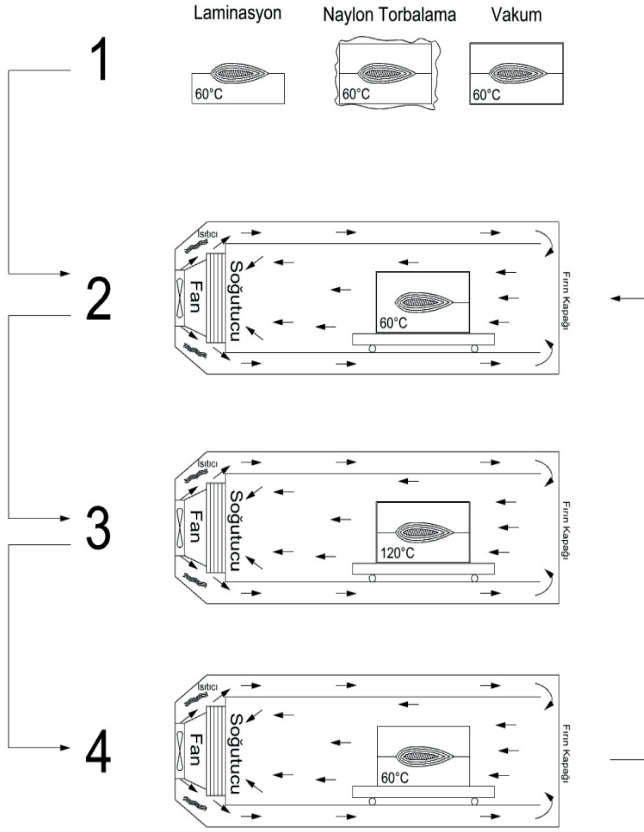
Bu çalışmada gelecekte değişecek maliyet faktörleri dikkate alınarak enerji maliyeti hesaplanırken karbon salımından oluşacak maliyetler de

hesap edilmiştir. Emisyon maliyetleri güneş enerji sisteminin kullanımı ile düşürülürken yatırım maliyeti ve kısıtlı panel alanı dikkate alınarak doğal gaz enerji sistemi ile hibrit şekilde çalışan optimizasyon çalışması yapılmıştır.

2. Modelleme

Otoklav yöntemi ile fiber takviyeli termoset plastiklerin imalatında cam, karbon, kevlar ve aramid elyaf hammaddesine sahip malzemeler ile polyester, vinilester ve epoksi gibi reçinelerin birleşimi ile birçok hammadde çeşidi ve bu hammaddelerin kullanıldığı vakum torbalama, kalıp sıkıştırma gibi birçok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerde kullanılan kompozit malzemelerin kurlenme sıcaklıkları reçine sistemlerine bağlı olarak 100 - 200 °C arasında değişmekte ve kurlenme süreleri ise 90 dk – 300 dk arasında değişebilmektedir (Hubert, Fernlund ve Poursartip, 2012). Özellikle vakum torbalamalı otoklav yönteminde kurlenme işlemi yaklaşık 120 °C sıcaklıkta, kurlenme süresi ise yaklaşık 160 dk olmaktadır. Laminasyon planına göre kesilmiş prepreg karbonlar kalıbın ürün yüzeyine serildikten sonra kalıp kapatılarak sıkıştırılır ve kalıp naylon torbaya konularak vakumlanır. Kalıp 160 dk sonra açılarak içindeki ürün çıkartılır. Seri üretimde kalıp 60 °C sıcaklığa soğutulduktan sonra aynı işlemler tekrarlanır. Bu yöntemde enerji tüketimi, ısıtma ve soğutmada kullanılacak enerjinin kaynağı ve verimliliği karbon salımını doğrudan etkilemektedir.

Bu çalışmada fırın ile imalatı yapılan kompozit malzemelerin ısı çevriminin maliyet optimizasyonu üzerine çalışılmıştır. Hesaplamalar için iç hacmi 1 m³ fırın, yüzey alanı 1x0.5 m, kalınlığı 0.1 m olan çift taraflı çelik bir kalıp örnek olarak alınmıştır. Bu kalıbın kurlenme sıcaklığı 120 °C'de 160 dk, ürünü kalıba koyma sıcaklığı ise 60 °C olarak belirlenmiştir. Üretim başlangıcında kalıp sıcaklığı 60 °C sıcaklığa çıkarıldığında kompozit laminasyon kalıbın içine yerleştirilip kalıp kapatılacaktır. Daha sonra kalıp naylon torba ile vakumlanıp fırında ısıtılacaktır. Kalıp sıcaklığı belirli bir hızda 120 °C'ye çıkartılıp toplamda 160 dk beklenicek ve kalıp otoklavdan çıkartılıp 60 °C'ye kadar soğutulduktan sonra ürün içerisinden alınarak üretim prosesi seri olarak tekrarlanacaktır.



Şekil 1. Üretim Prosesi Akış Şeması

Mevcut durumda Şekil 1'deki gibi kalıplar fırındaki rezistanslar ile ısıtılmaktadır. Bu rezistanslar elektrikle çalışmakta olup örnek alınan kalıbın bu süreç içerisinde ısıtma ve soğutma için gerekli olan enerji miktarları 1 ve 2 numaralı denklemler kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$Q = m c \Delta T \quad (1)$$

$$Q = \alpha A_s (T_s - T_{\infty}) \quad (2)$$

Burada, Q alınan veya verilen ısı enerjisi miktarını [kJ], m ısıtılacak kalıbın kütlesini [kg], C özgül ısıyı [kJ/kg°C], ΔT sıcaklık farkını [°C], α ısı taşınım katsayısını [W/m²°C], A_s fırın yüzey alanını [m²], T_s kalıp yüzey sıcaklığını [°C], T_{∞} ortam sıcaklığını [°C] belirtmektedir.

1 numaralı denklem kalıbı ısıtmak için gerekli enerji miktarını hesaplarken ve soğutma için kalıptan çekilmesi gereken enerji miktarını hesaplamak için kullanılmaktadır. 2 numaralı denklem ise kalıp ve fırın arasındaki zorlamalı

ısı transferinin hesaplanması için kullanılacaktır. Bu çalışmada örnek olarak kullanılacak kalıbın özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Kalıp özellikleri

Kalıp Ağırlığı	350 kg
Öz ısı	0.45 kJ / kg.°C
Fırın toplam yüzey alanı	6 m ²
Isı taşınım katsayısı	17 W/ m ² °C
Malzemesi	Çelik

3. Analizler ve Değerlendirme

Yapılan çalışmada Tablo 1'de verilen kalıp özellikleri dikkate alınarak Şekil 1'deki akış şemasına göre harcanan enerji ve güç gereksinimleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Prosesin güç harcamaları

Aşama	Kalıp sıcaklığı (°C)	Proses	Harcanan güç (W)	Fırının ısı kayıpları (W)	Süre (dk)	Harcanan Enerji (kWh)
1	60	Kalıbı Yerleştirme	0	192	1	0.0032
2	60-120	Isıtma	2718.75	648	60	3.36675
3	120	Kürleme	2718.75	1296	60	4.01475
4	120-60	Soğutma	4078.125	-648	40	2.28675
					Toplam	9.67145

Yapılan hesaplamalara göre ürün üretim prosesindeki enerji tüketimi toplam 9.67145 kWh olarak hesaplanmıştır. Bu tüketimlerin elektrik maliyeti 4.63 TL/kWh olarak kabul edilerek hesaplanacaktır. Buna göre bir ürün üretimi prosesi için 44.78 TL enerji maliyeti oluşmaktadır. Gün boyunca 8 saatlik mesai süresince 3 defa üretim yapılacağı için toplam 134.34 TL maliyet oluşmaktadır.

Gelecek yıllarda maliyet kalemi olarak ortaya çıkacak CO₂ emisyon ücretinin maliyeti de hesaplanmalıdır. Bu maliyet hesabında ikincil enerji kaynağı (şebeke elektriği) olan elektriğin CO₂ salım katsayısı 0.5 kgCO₂/kWh olarak kabul edilmiştir. Karbon emisyonunun fiyatı da 1.7 TL/CO₂ olarak kabul edilmiştir. Gün boyunca yapılan karbon emisyonu 24.66 TL olarak maliyet oluşturmaktadır. Yapılan imalat yöntemine göre ayda 22 gün

mesai günü kabul edilerek yapılan hesapta aylık elektrik faturası 2955.40 TL aylık emisyon faturası 542.57 TL olarak hesaplanmıştır. Yıllık toplam maliyet 41975.64 TL olarak hesaplanmıştır.

Bu imalat aşamalarında güneş panelinden sağlanan elektrik enerjisi, doğalgaz ile su ısıtma sistemi ile sağlanan enerji ile şebeke elektriği kullanımı azaltılarak karbon emisyonu maliyetini düşürme ve enerji maliyetlerini azaltmak hedeflenmiştir. İmalat yapılan fabrika İstanbul'da kabul edilerek kurulacak güneş enerjisi elektrik üretimi ve doğal gaz su ısıtma sistemi için aylara göre ortalama güneşlenme süresi Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. İstanbul için ortalama güneşlenme süreleri (Saat)

Aylar	OCAK	ŞUBAT	MART	NİSAN	MAYIS	HAZİRAN
Ortalama	3.46	4.43	5.32	6.85	8.61	10.51
Aylık Saat	107.26	124.04	164.92	205.5	266.91	315.3
Aylar	TEMMUZ	AĞUSTOS	EYLÜL	EKİM	KASIM	ARALIK
Ortalama	11.17	10.14	7.83	5.22	3.85	2.96
Aylık Saat	346.27	314.34	234.9	161.82	115.5	91.76
Yıllık Saat	2448.52					

Yıllık enerji sarfiyatı ve üretimini baz alarak hesaplama yapıldığı takdirde uygulanan üretim prosesi için güneş paneli alanının maliyete etkisi ve yatırım miktarı Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Güneş Paneli Sisteminin Maliyetlere Etkisi

Kurulacak Güneş Paneli alanı [m ²]	Güç [kW]	Yıllık Toplam Enerji [kWh]	Yatırım Maliyeti [TL]	Güneş Paneli Sistemli Yıllık İşletme Güç Sarfıyatı [kWh]	Enerji Maliyeti [TL]	Karbon Emisyonu Maliyeti	Yatırım Maliyetinin Yıllık Maliyeti	Toplam Maliyet
0	0	0	0	9199.44	42593.39	7819.52	0.00	50412.91
2	0.46	1126.32	11557.08	8073.12	37378.53	6862.15	3467.13	47707.81
4	0.92	2252.64	23017.10	6946.80	32163.67	5904.78	6905.13	44973.58
6	1.38	3378.96	34380.05	5820.48	26948.82	4947.41	10314.02	42210.24
8	1.84	4505.28	45645.94	4694.16	21733.96	3990.04	13693.78	39417.78
10	2.3	5631.60	56814.77	3567.84	16519.10	3032.66	17044.43	36596.20
12	2.76	6757.92	67886.52	2441.52	11304.24	2075.29	20365.96	33745.49
14	3.22	7884.23	78861.22	1315.20	6089.39	1117.92	23658.36	30865.67
16	3.68	9010.55	89738.84	188.88	874.53	160.55	26921.65	27956.73
18	4.14	10136.87	100519.41	-937.44	-4340.33	-796.82	30155.82	25018.67
20	4.6	11263.19	111202.90	-2063.76	-9555.19	-1754.19	33360.87	22051.49
22	5.06	12389.51	121789.33	-3190.07	-14770.05	-2711.56	36536.80	19055.19
24	5.52	13515.83	132278.70	-4316.39	-19984.90	-3668.93	39683.61	16029.77
26	5.98	14642.15	142671.00	-5442.71	-25199.76	-4626.31	42801.30	12975.23
28	6.44	15768.47	152966.24	-6569.03	-30414.62	-5583.68	45889.87	9891.57
30	6.9	16894.79	163164.41	-7695.35	-35629.48	-6541.05	48949.32	6778.80
32	7.36	18021.11	173265.52	-8821.67	-40844.34	-7498.42	51979.65	3636.90
34	7.82	19147.43	183269.56	-9947.99	-46059.19	-8455.79	54980.87	465.88
36	8.28	20273.75	193176.53	-11074.31	-51274.05	-9413.16	57952.96	-2734.25
38	8.74	21400.06	202986.44	-12200.63	-56488.91	-10370.53	60895.93	-5963.51
40	9.2	22526.38	212699.29	-13326.95	-61703.77	-11327.91	63809.79	-9221.89
42	9.66	23652.70	222315.07	-14453.27	-66918.63	-12285.28	66694.52	-12509.38

Tablo 4'e göre 16 m² üzerinde güneş paneli sistemi kurulduğunda elektrik sarfıyatının ve dolayısı ile emisyon maliyetinin tamamını sıfırlayacağı görülmektedir. Fakat güneş paneli sisteminin yatırım maliyetleri faiz oranı %30 kabul edilerek yıllık olarak hesaplandığında 34 m² üzerinde panel sisteminin kurulması gerektiği görülmektedir. Kompozit imalatı yapan bir tesisin içerisinde birden fazla fırın ve ısıtıcı sistemlerin kullanıldığı kabul edilerek bu tesis içerisinde sadece bir fırını çalıştırmak için güneş paneline tesis çatısı üzerinde 34 m² alan ayrılması diğer alet ve teçhizatlarında aynı sistemle çalıştırma hedeflendiğinde çatının alanının kısıtlı olması sebebi ile mümkün değildir. Bu sebeple güneş enerjisinin kullanımının minimize edilerek farklı sistemlerle tasarruf sağlanması hedeflenmelidir.

Bu sisteme alternatif olarak doğalgaz ile fırın ısıtması sağlanıp soğutma için şebeke elektriği kullanımına devam edilerek oluşan maliyetler Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Doğalgaz Sisteminin Maliyetlere Etkisi

Doğalgaz Hattı Gücü [kWh]	Doğalgaz Yıllık Toplam Enerji [kWh]	Yatırım Maliyeti [TL]	Yıllık İşletme Isıtma Güç Sarfıyatı [kWh]	Yıllık İşletme Soğutma Güç Sarfıyatı [kWh]	Doğalgaz Sistemli Yıllık İşletme Güç Sarfıyatı [kWh]	Enerji Maliyeti [TL]	Karbon Emisyonu Maliyeti	Yatırım Maliyetinin Yıllık Maliyeti	Toplam Maliyet
0	0	0	5848.68	1811.11	7659.79	35464.82	6510.82	0	41975.64
1	2080	15000	5848.68	1811.11	5579.79	25834.42	6510.82	4500	36845.24
2	4160	15000	5848.68	1811.11	3499.79	16204.02	6510.82	4500	27214.84
3	6240	15000	5848.68	1811.11	1811.11	8385.4208	6510.82	4500	19396.24
4	8320	15000	5848.68	1811.11	1811.11	8385.4208	6510.82	4500	19396.24
5	10400	15000	5848.68	1811.11	1811.11	8385.4208	6510.82	4500	19396.24
6	12480	15000	5848.68	1811.11	1811.11	8385.4208	6510.82	4500	19396.24
7	14560	15000	5848.68	1811.11	1811.11	8385.4208	6510.82	4500	19396.24
8	16640	15000	5848.68	1811.11	1811.11	8385.4208	6510.82	4500	19396.24
9	18720	15000	5848.68	1811.11	1811.11	8385.4208	6510.82	4500	19396.24
10	20800	15000	5848.68	1811.11	1811.11	8385.4208	6510.82	4500	19396.24

Tablo 5'e göre hesaplanan maliyetlerde, doğalgaz yatırım maliyeti 24 kWh'e kadar sabit olduğundan 15000 TL olarak kabul edilmiştir. Doğalgaz sadece ısıtmada kullanılabileceğinden dolayı şebekeden soğutma için kullanılan güç hiç azalmamıştır. Aynı zamanda karbon emisyonu maliyetinde de bir değişim olmamıştır. Yatırım maliyetinin yıllık bazda maliyeti hesabında yıllık faiz oranı %30 olarak kabul edilip yatırım maliyetinin yıllık faiz maliyeti olarak kabul edilmiştir. Bu hesaplara göre 41975.64 TL olan aylık yıllık maliyetleri 19396.24 TL'ye düşürmenin mümkün olduğu görülmüştür.

Fırının ısıtması için doğalgaz sisteminin kullanımı soğutma için ise güneş enerji sisteminin kullanımı sağlanarak şebeke elektriğinin kullanılmaması koşullarında oluşan maliyetler Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Doğalgaz ve Güneş Enerji Sisteminin Maliyetlere Etkisi

Güneş Paneli Yıllık Enerji (kWh)	Yatırım Maliyeti [TL]	Doğalgaz Yıllık Toplam Enerji [kWh]	Doğalgaz Yatırım Maliyeti [TL]	Yıllık İşletme Isıtma Güç Sarfiyatı [kWh]	Yıllık İşletme Soğutma Güç Sarfiyatı [kWh]	Hibrit Sistemli Yıllık İşletme Güç Sarfiyatı [kWh]	Enerji Maliyeti [TL]	Karbon Emisyonu Maliyeti	Yatırım Maliyetinin Yıllık Maliyeti	Toplam Maliyet
0	0	0	0			7659.79	35464.82	6510.82	0.00	41975.64
563.16	5790.7	1040				6056.63	28042.19	6032.13	6237.20	40311.53
1126.32	11557.1	2080				4453.47	20619.56	5553.45	7967.13	34140.14
1689.48	17299.2	3120				2850.31	13196.93	5074.76	9689.77	27961.46
		4160				1247.15	5774.30			21775.51
		5200				207.15	959.10			16960.31
		6240								
		7280								
		8320								
		9360								
		10400								
		11440	15000	5848.68	1811.11					
		12480								
2252.64	23017.1	13520						4596.08	11405.13	
		14560				-441.53	-2044.30			13956.91
		15600								
		16640								
		17680								
		18720								
		19760								
		20800								
		21840								

Tablo 6'ya göre hesaplanan maliyetlerde, doğalgaz ve güneş enerjisi yatırım maliyeti yıllık bazda maliyeti hesabında yıllık faiz oranı %30 olarak kabul edilip yatırım maliyetinin yıllık faiz maliyeti olarak kabul edilmiştir. Doğalgaz sadece ısıtmada güneş paneli sistemi ise sadece soğutmada kullanılmıştır. Aynı zamanda karbon emisyonu maliyetini de sadece güneş paneli kullanımı azaltmıştır. Bu hibrit sistemde kullanılacak güneş paneli soğutma sisteminin gücünü karşılayan 4 m² panel alanı olarak hesaplanmıştır. Tesisin kısıtlı alana sahip çatısında bir fırın için güneş paneli sistemi kurulabilmesi bu hesaplanan alan için mümkün olduğu kabul edilmiştir. Hibrit sistem sadece doğalgaz sistemini kullanımına göre daha düşük olan 13956.91 TL yıllık maliyet olarak saplanmıştır.

4. Sonuç

Hibrit sistemin enerji verimliliği açısından avantajları olduğu görülmüştür. Hibrit sistem, enerji kaynaklarını en etkin şekilde kullanarak enerji tüketimini optimize etmeye olanak sağlamaktadır. Bu, daha düşük

enerji maliyetleri ve daha az kaynak israfı anlamına gelmektedir. Bu sistemin işletme maliyetleri üzerinde de olumlu bir etkisi olduğu görülmüştür. Güneş paneli sistemi, elde ettiği enerjii kullanarak tesisin elektrik ihtiyacını karşılamakta ve elektrik faturalarının azalmasını sağlarken ve uzun vadede maliyetleri düşürdüğü görülmüştür. Hibrit sistem, enerji arzında çeşitlilik sağlamaktadır. Tesisin Sadece doğalgaz sistemine bağımlı olmak yerine, güneş enerjisi gibi yenilenebilir kaynakları da kullanarak enerji güvencesini arttırdığı görülmüştür. Bu durum enerji arzında süreklilik sağlarken ve enerji kesintilerinin etkisini de azaltmaktadır. Bu durum ayrıca işletmede üretim sürekliliğini korumakta ve bakım maliyetlerini düşürdüğü görülmüştür. Sonuç olarak, hibrit sistemler, çevreci olmaları, enerji verimliliği, işletme maliyetlerinde tasarruf sağlamaları ve enerji arzında çeşitlilik sunmaları gibi birçok avantaja sahiptir olduğu görülmüştür. Bu nedenlerle maliyet ve sürdürülebilirlik açısından optimum bir sistem olarak değerlendirilmektedir.

Kaynaklar

- Advani, S. G. ve Hsiao, K.-T. (2012). Introduction to composites and manufacturing processes. Suresh G. Advani ve K.-T. Hsiao (Ed.), *Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs)* içinde , Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering (ss. 1-12). Woodhead Publishing. doi:10.1533/9780857096258.1.1
- Athanasopoulos, N., Koutsoukis, G., Vlachos, D. ve Kostopoulos, V. (2013). Temperature uniformity analysis and development of open lightweight composite molds using carbon fibers as heating elements. *Composites Part B: Engineering*, 50, 279-289.
- Bohne, T., Frerich, T., Jendry, J., Jürgens, J.-P. ve Ploshikhin, V. (2018). Simulation and validation of air flow and heat transfer in an autoclave process for definition of thermal boundary conditions during curing of composite parts. *Journal of Composite Materials*, 52(12), 1677-1687.
- Chen, F., Zhan, L. ve Xu, Y. (2015). Simulation of mold temperature distribution in a running process autoclave. *Iranian Polymer Journal*, 24, 927-934.
- Dhakal, H. N. ve Ismail, S. O. (2021). Introduction to composite materials. H. N. Dhakal ve S. O. Ismail (Ed.), *Sustainable Composites for Lightweight Applications* içinde , Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering (ss. 1-16). Woodhead Publishing. doi:10.1016/B978-0-12-818316-8.00001-3
- Ding, Y., Chiu, W. K. ve Liu, X. L. (1999). Numerical investigation on thermal response of oil-heated tool for manufacture of composite products. *Composite structures*, 47(1-4), 491-495.
- Ekuse, O. A., Anjum, N., Eze, V. O. ve Okoli, O. I. (2022). A Review on the Out-of-Autoclave Process for Composite Manufacturing. *Journal of Composites Science*, 6(6), 172. doi:10.3390/jcs6060172
- Fisher, A., Levy, A. ve Kratz, J. (2023). Effects of heat transfer coefficient variations on composite curing. *Journal of Composite Materials*, 57(3), 363-376.
- Forcellese, A., Marconi, M., Simoncini, M. ve Vita, A. (2020). Life cycle impact assessment of different manufacturing technologies for automotive CFRP components. *Journal of Cleaner Production*, 271, 122677.
- Hassen, A. A., Betters, E., Tsiamis, N., West, J., Smith, T., Billah, K. M. M., ... Kunc, V. (2022). Joining technique for in-oven/autoclave molds manufactured by large scale polymer additive manufacturing. *Manufacturing Letters*, 32, 77-82.
- Hu, J., Zhan, L., Yang, X., Shen, R., He, J. ve Peng, N. (2020). Temperature optimization of mold for autoclave process of large composite manufacturing. *Journal of Physics: Conference Series* içinde (C. 1549, s. 032086). IOP Publishing.

- Hubert, P., Fernlund, G. ve Poursartip, A. (2012). Autoclave processing for composites. Suresh G. Advani ve K.-T. Hsiao (Ed.), *Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs)* içinde , Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering (ss. 414-434). Woodhead Publishing. doi:10.1533/9780857096258.3.414
- Hugo, W. B. (1991). A brief history of heat and chemical preservation and disinfection. *Journal of Applied Bacteriology*, 71(1), 9-18. doi:10.1111/j.1365-2672.1991.tb04657.x
- Lin, Y. ve Guan, Z. (2021). The Use of Machine Learning for the Prediction of the Uniformity of the Degree of Cure of a Composite in an Autoclave. *Aerospace*, 8(5), 130.
- Liu, S.-J. ve Fu, K.-H. (2008). Effect of enhancing fins on the heating/cooling efficiency of rotational molding and the molded product qualities. *Polymer testing*, 27(2), 209-220.
- Mirzaei, S., Krishnan, K., Al Kobtawy, C., Roberts, J. ve Palmer, E. (2021). Heat transfer simulation and improvement of autoclave loading in composites manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112, 2989-3000.
- Shama Rao, N., Simha, T. G. A., Rao, K. P. ve Ravi Kumar, G. V. V. (2018). Carbon composites are becoming competitive and cost effective. *White paper*. <https://www.infosys.com/engineering-services/white-papers/documents/carbon-composites-cost-effective.pdf> adresinden erişildi.
- Vita, A., Castorani, V., Germani, M. ve Marconi, M. (2019). Comparative life cycle assessment and cost analysis of autoclave and pressure bag molding for producing CFRP components. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105(5), 1967-1982. doi:10.1007/s00170-019-04384-9
- Wang, L., Zhu, W., Wang, Q., Xu, Q. ve Ke, Y. (2019). A heat-balance method for autoclave process of composite manufacturing. *Journal of Composite Materials*, 53(5), 641-652.
- Xie, G., Liu, J., Zhang, W. ve Sunden, B. (2012). Simulation and thermal analysis on temperature fields during composite curing process in autoclave technology. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition* içinde (C. 45233, ss. 1-9). American Society of Mechanical Engineers.
- Xie, G. N., Liu, J., Zang, W. H., Lorenzini, G. ve Biserni, C. (2013). Simulation and improvement of temperature distributions of a framed mould during the autoclave composite curing process. *Journal of Engineering Thermophysics*, 22, 43-61.
- Yue, C., Zhang, Y., Lu, W., Zhang, Y., Wang, P., Li, Y. ve Zhou, H. (2022). Realizing the curing of polymer composite materials by using electrical

resistance heating: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 107181.

Zhang, G., Zhang, B., Luo, L., Lin, T. ve Xue, X. (2021). Influence of mold and heat transfer fluid materials on the temperature distribution of large framed molds in autoclave process. *Materials*, 14(15), 4311.

Zhu, J., Frerich, T., Dimassi, A., Droste, D. ve Herrmann, A. S. (2021). A quasi-transient coupling approach to the modeling of conjugate heat transfer in the autoclave. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 40(23-24), 912-926.

Polipropilen (PP) Esaslı Organik Takviyeli Kompozitler

Mehmet Altuğ¹

Yakup Yılmaz²

Özet

Günümüzde doğaya karşı duyarlılıktaki artış ile birlikte atık ve plastik maddelerin geri dönüştürülebilme konuları üzerine araştırmalar da artmaktadır. Bu çalışmaların önemli bir kısmını polimerlere takviye edilen organik malzemelerdir. Bu çalışmada polipropilen matrise ilave edilen farklı oranlardaki organik takviyeli malzemelerden elde edilen kompozit malzemelerin mekanik özelliklerindeki değişiklikler incelenmiştir. Polipropilen polimer matrisine organik malzemelerin takviyesi ile üretilen kompozit malzemelerin mekanik özellikleri, üretim teknikleri, takviye elemanlarının polipropilen matrisi üzerine etkileri, ilave edilen takviye oranları, ara yüz malzemelerin etkileri üzerine yapılmış çalışmalar incelenerek, elde edilen bulgular ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

Giriş

İki veya daha fazla malzemenin bir araya getirilmesiyle oluşturulan ve yeni özelliklere sahip malzemeler “Kompozit Malzeme” olarak adlandırılmaktadır. Kompozit üretiminde farklı polimerler ve farklı oranlarda lignoselülozik destek elemanı (lif veya un) dolgu maddesi ya da güçlendirici olarak kullanılabilir. Kompozit malzemeler, tasarım gereği, bileşenleri arasındaki ara yüzün kalitesi ile karakterize edilir. Yenilikçi kompozit malzemeler geliştirmedeki ana odak noktalarından biri, takviyeler ve matris arasında uygun bir bağlanma sağlamaktır. Malzemelerin üretiminde karbon içeriğini azaltma ilgisinin artmasıyla birlikte, biyo-bazlı veya geri

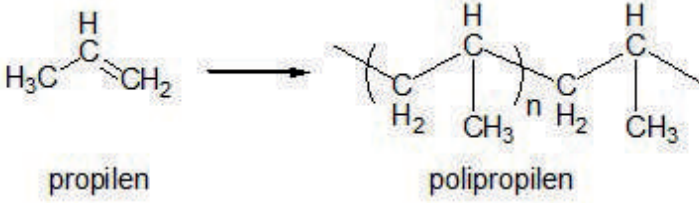
1 Doç. Dr., İnönü Üniversitesi Malatya OSB Meslek Yüksekokulu Malatya/Türkiye, mehmet.altug@inonu.edu.tr, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4745-9164>

2 Makine Mühendisi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Malatya/Türkiye, yk.yilmaz4488@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5712-0650>

dönüştürülebilir malzemeler gibi daha çevre ile uyumlu materyalleri geliştirmek için endüstriyel bir fikir birliği vardır.

1. Polipropilen (PP)

Polipropilen, otomotiv sanayinde kullanılan parçalardan, tekstil ve yiyecek paketlemesine kadar çok geniş kullanım alanı olan termoplastik bir polimerdir [1]. Monomer propilenin polimer hale getirilmesi ile elde edilen polipropilen kimyasal solventlere (asit ve bazlar) karşı aşırı derecede dirençlidir.



Şekil 1. Polipropilen kimyasal formülü

1.1. Polipropilen Elde Edilmesi

Polipropilenin eriyik işlemi ekstrüzyon ve kalıplama yoluyla elde edilebilir [1]. Sık kullanılan ekstrüzyon yöntemleri arasında eriyik üflenmiş ve iplik bağlı lifler üretilerek uzun rulolar elde edilmesi ve bunların dönüştürülerek yüz maskeleri, filtreler, bebek bezleri ve ıslak mendil gibi kullanışlı ürünlerin üretiminde kullanılması yer alır.

1.2. Polipropilenin Fiziksel Özelliği

Propilen; sert, opak ve sağlam bir malzemedir. Düşük özgül ağırlığa sahiptir, suda yüzebilir. En yaygın ticari polipropilenin, kristal yapısı düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) ve yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) arasında bir seviyeye sahiptir. Young modülü (elastizite modülü) de orta seviyededir (Yüksek sıcaklık ve nem koşullarında iyi derecede boyut kararlılığına sahiptir). Bununla beraber, LDPE'den daha az sert ve HDPE'den çok daha az gevrek. Bu polipropilenin ABS gibi mühendislik plastiklerinin yerine kullanılmasına izin verir.

1.3. Polipropilenin Kimyasal Özelliği

Polipropilen, yorulmaya karşı çok iyi direnç göstermektedir. Maliyet anlamında düşük seviyesi ile ticari kullanım alanı oldukça geniştir. Oldukça iyi darbe dayanımı bulunmaktadır. Sürtünme katsayısı düşük olup, çok iyi elektrik yalıtımı sağlamaktadır. Kimyasal direnci iyidir. Tüm termoplastik

işleme proseslerine uygundur. Polipropilenin, erime sıcaklığı 130 ile 171°C arasındadır.

Tablo 1. Polipropilenin özellikleri

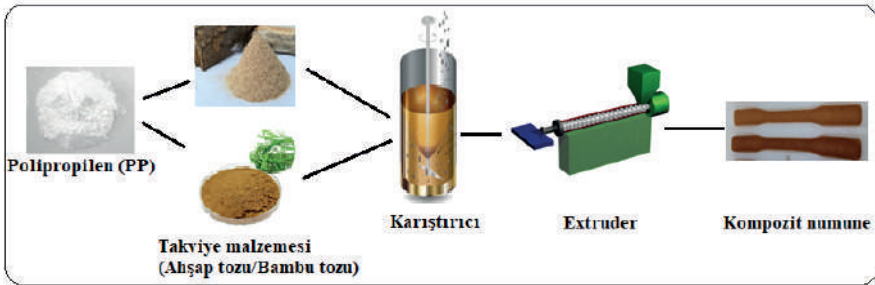
Polipropilen	Birim	Test Metodu (ISO)	Değer
Özgül Ağırlık	gr/cm ³	1183	0,92
Su Emme (Doymuş)	%	62	0,1
Çekme Dayanımı	kg/cm ²	527	300
Elastik Modül	MP3	527	1250
Kopma Uzaması	%	527	>50
Darbe Dayanımı (İzod Çentikli)	Kj/m ²	180	7
Sertlik	Shore D	868	70
Maksimum Sürekli Çalışma Sıcaklığı	°C	-	100
Minimum Sürekli Çalışma Sıcaklığı	°C	-	5
Isı Genleşme Katsayısı	°C ⁻¹	11359	1.6x10 ⁻⁴
Dielektriksel Dayanımı	Kv/mm	60243	55

1.4. Polipropilen Kullanım Alanları

Otomotiv sanayinde kullanılan parçalardan, tekstil ve gıda paketlemesine değin oldukça geniş kullanım alanı bulunan termoplastik bir polimerdir. Monomer propilenin polimer hale getirilmesi ile elde edilen polipropilen kimyasal solventlere (asit ve bazlar) karşı aşırı derecede dirençlidir.

2. Organik Takviye Malzemeleri

Polipropilen matrise ilave edilen farklı oranlardaki organik takviyeli malzemelerden elde edilen kompozit malzemelerin hazırlama aşamaları şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. PP esaslı organik katkılı kompozit aşamaları

2.1. Fındıkkabuğu

Fındıkkabuğu fındık ürününün kırım işlemleri sonucunda tane ile kabuk malzemenin birbirinden ayrışması sonucunda meydana gelen odunsu sert bir malzemedir. Polimerlerde, kullanılması gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Fındıkkabuğu katkılı bazı çalışmalara aşağıda yer verilmiştir.

Cengiz Ö. vd. (2021) çalışmalarında, fındıkkabukları toz haline getirilmiş, farklı boyutlarda elek sallama makinesinde elenmiş, ekstrüder makinesinde karışım oranlarına göre granül olarak hazırlanmış ve enjeksiyon makinesinde çekme ve eğme test numunelerinin üretimi başarılı bir şekilde gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında elde edilen genel sonuçlar, atık olarak görülen ve yakılarak tüketilen fındıkkabuğu tozları katma değeri yüksek ürünlere dönüştürülebilir sonucuna varmışlardır [2].

Kufel A. ve Kuciel S. (2020) çalışmalarında, bir PP matrisine doğal dolgu maddeleri eklemenin hibrit kompozitlerin mekanik ve fiziksel özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Ağırlıkça %10, %15 ve %20 bazalt lifleri (BF) ve öğütülmüş fındıkkabukları (HS) PP matrisine ilave etmişlerdir. Sonuç olarak iki tip dolgu maddesinin eklenmesinin mekanik özelliklerini geliştirdiğini gözlemlemişlerdir. Bununla birlikte, termal yaşlanma, çekme mukavemetinde ve çekme modülünde bir azalmaya neden olduğunu gözlemlemişlerdir [3].

2.2. Lignoselülozik

Selüloz, hemiselüloz ve lignin olmak üzere 3 karbohidrattan oluşan kompleks bir polimerdir. Yüksek miktarlarda ve düşük maliyette bulunabilirliği nedeniyle, biyoetanol üretimi için cazip bir hammadde olarak değerlendirilmektedir.

Çavuş V. ve Mengeloğlu F. (2017) çalışmalarında, Lignoselülozik dolgu maddesi olarak zeytin pirinası ve kızılçam odununu %20 ve %40 oranlarında kullanmışlardır. Kızılçam odunu veya zeytin pirinası, vaks ve maleik anhidrit graflanmış polipropilen (MAPP) ve yüksek veya düşük erime akış indeksine sahip polipropilen üretim reçetesine göre yüksek devirli mikser yardımıyla homojen bir şekilde karıştırmışlardır. Erime akış indeksinin odun plastik kompozitlerin (OPK) özelliklerini önemli bir etkisinin olmadığını buna karşın dolgu maddesi türü ve oranına göre değişkenlik göstermesine rağmen mekanik özelliklerin ASTM D6662 standardında belirlenen değerleri karşıladığını tespit etmişlerdir [4].

Çavuş V. ve Mengeloğlu F. (2019) çalışmalarında, iki farklı türde (sentetik temelli mineral lif ve lignoselülozik) dolgu maddesi farklı oranlarda kullanılarak

üretilen odun plastik kompozitlerin fiziksel özelliklerinden uzun süreli su alma ve kalınlıkça artış oranlarının belirlenmesini hedeflemişlerdir. Hibrit kompozit karışımları yüksek devirli karıştırıcı içerisinde kızılçam (*Pinus brutia* Ten.) odun unu, vaks ve maleik anhidrit grafted polipropilen (MAPP) ve polipropilenin karıştırılması yöntemi ile elde etmişlerdir. Su alma ve kalınlıkça artma oranlarında sentetik ve lignoselülozik dolgu maddesi türü ve oranının ve sentetik dolgu maddesi katılım sırasının etkili olduğu gözlemlenmişlerdir [5].

2.3. Bambu

Bambuseae adı verilen tür bambular; ağaç gibi büyüyen, ahşaplaşan, ince yapraklı ama çok büyük yapraklı bambu türüdür. Büyümekte sınır tanımayan bambular boyları 38 metre ve genişliği 80 santimetreye kadar çıktığı görülmektedir. Bir günde en hızlı büyüyen ölçülebilmüş bambu ağacı yaklaşık 40 santimetre civarında büyümüştür. Esneklikleri sayesinde kırılma olasılıkları oldukça düşüktür.

Lima C. vd. (2020) çalışmalarında, polipropilen/bambu elyaf (PP/BF) kompozitinin özelliklerindeki değişiklikleri ve doğal yaşlanma sonrasında bu kompozitlerde bağlayıcı ajan (CA) kullanımının etkisini araştırmışlardır. Bir CA kullanımının fiber ve polimer arasında daha yüksek etkileşimi destekleyebileceğini göstermektedir. Ek olarak, organik kökenli ve sentetik kökenli CA'lar, doğal yaşlanmaya benzer tepkiler sergilediğini gözlemlenmişlerdir [6].

Lima C. vd. (2021) çalışmalarında, bambu elyafı (BF) ile bir polipropilen matris arasındaki arayüzey bağımlı geliştirmek için, üç organik asidin mekanik özellikler ve arayüzey morfolojisi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çekme mukavemetinde birleştirme aracı (CA) kompozitlerde artış yaklaşık %190 olurken, eğilme modülünde akuple kompozitler daha yüksek değerler göstermiş ve artış trikarboksilik asit'li (TRIA) kompozitlerde daha fazla olduğunu gözlemlenmişlerdir [7].

Yeh H.C. ve Yang C.T. (2020) çalışmalarında, dört tip atık bambu lifi (BF) takviye olarak kullanmışlar ve bambu-PP kompozitleri (BPC'ler) üretmek için PP dahil etmişlerdir. Termogravimetrik sonuçlar, Flynn-Wall-Ozawa (FWO) yöntemiyle hesaplanan çeşitli dönüşüm oranlarında en yüksek aktivasyon enerjisini gösterdiği için Makino BF'nin termal olarak en kararlı olduğunu gözlemlenmişlerdir [8].

2.4. Ahşap-Odun Tozu/Unu

İstenilen incelikte öğütülerek ya da mobilya ve diğer oduna dayalı endüstri işlem atıklarından elde edilen, görünüş özellikleri ve tekstür

bakımından tahıl ununa benzeyen, odun plastik kompozit üretiminden çeşitli tutkal ve yalıtıcılardaki dolgu maddesine, tekstil endüstrisindeki yağ emici ve aşındırıcıdan dinamit yapımına kadar çok çeşitli uygulamalarda katkı maddesi olan bir odun ürünüdür.

Güldeş A. vd. (2018) çalışmalarında, PP dolgu malzemesi olarak odun unu (WF) farklı ağırlık oranlarında ilave edilerek etkilerini araştırmışlardır. Odun unu dolgu miktarı arttıkça viskozite arttığını; ancak sıcaklık, basınç ve kayma hızı arttıkça viskozite azalır. Takviyeli polipropilenin değişen oranlarda çekme mukavemetinin, takviyesiz polipropilene göre sırasıyla %11, %16 ve %21 oranında azaldığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca darbe testleri, en yüksek enerji emiliminin %10 odun unu ile güçlendirilmiş polipropilende elde ettiklerini tespit etmişlerdir [9].

Nafis Z. A. S. vd. (2023) çalışmalarında, ahşap tozu elyaf işleminin, odun tozu takviyeli geri dönüştürülmüş polipropilen kompozit (r-WoPPC) filament özelliğini araştırmışlardır. Ahşap tozu lifi üzerindeki silan işlemi, ahşap lifi ile geri dönüştürülmüş PP arasındaki ara yüzey bağımlı geliştirdiğini bu nedenle, işlenmemiş ve alkalikle işlenmiş ağaç tozu filamentleri kıyasla %35,2 daha yüksek olan tel çekme mukavemeti elde ettiklerini gözlemlemişlerdir. Silanla işlenmiş ağaç tozu içeren r-WoPPC filamentleri daha iyi mekanik özellikler ortaya çıkardıklarını tespit etmişlerdir [10].

Narlıoğlu N. vd. (2018) çalışmalarında, polipropilen matrise ilave edilen farklı oranlardaki karaçam testere talaşından elde ettikleri kompozit malzemelerin mekanik özelliklerindeki değişiklikler incelemişlerdir. Mekanik test sonuçlarına göre en yüksek çekme direnci değeri %10 odun unu ilaveli kompozit örneğinde, en yüksek eğilme direnci ise %50 odun unu ilaveli kompozit ve en yüksek darbe direnci, %20 odun unu ilaveli kompozit örneğinde elde etmişlerdir [11].

Özdemir F. (2021) çalışmasında, odun plastik kompozit üretiminde, perlit kullanımının etkisini araştırmıştır. Bu amaçla odun unu, polipropilen ve farklı oranlarda perlit karışımı elde etmiştir. Sonuç olarak perlit ilave edilerek üretilen odun-plastik kompozit (OPK) malzemenin perlit ilave oranının artmasına bağlı olarak fiziksel, mekanik ve yüzey pürüzlülüğü özelliklerin belirli oranlarda olumsuz etkilendiğini belirlemiştir. Tüm özellikler için en olumlu etki kontrol numunelerinde tespit edilirken en olumsuz etki miktarı ise %20 perlit kullanım oranlarında olduğu tespit etmiştir [12].

3. Diğer Organik Katkılar

3.1. Kitosan

Kitosan, kitin'in deasetilasyonu ile elde edilen lineer bir aminopolisakkarittir. Kitin ise, kabuklu deniz hayvanlarının kabuklarında çok miktarda mevcut olan ve yeryüzünde selülozdan sonra en fazla bulunan doğal bir biyopolimerdir. Kitin, bir N-asetil-D-glukozamin polimeri ve kitosan ise bir D-glukozamin ve N-asetil-D-glukozamin kopolimeridir. Deasetile edilmiş kitin, kitosan olarak adlandırılır.

Yamankaradeniz N. vd. (2020) çalışmalarında, PP polimeri ve ağırlıkça üç farklı oranda kitosan katkısı kullanılarak üretilmiş kitosan/PP kompozit malzemelerin yanma davranışları araştırılmışlardır. Kitosan katkısının, PP polimerinin yoğunluk ve sertlik değerlerini artırma eğiliminde olduğunu tespit etmişlerdir [13].

Akgündüz İ. ve Uysal Y. (2019) çalışmalarında, kağıt fabrikası arıtma tesisinden çıkan atık arıtma çamuru, yumurta kabuğu ve lületaşı tozu atık materyalleri ile birlikte polipropilen (PP) bazlı termoplastik plaka üretiminde değerlendirmişler ve elde ettikleri kompozit plakanın radyasyon geçirgenlik ve mekanik dayanım özelliklerini belirlemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar yumurta kabuğu katkılı kompozit levhanın radyasyon geçirgenliğini azalttığı, çekme direncini artırdığı, arıtma çamurunun çekme direncini düşürdüğünü ve arıtma çamurunda bulunan liflerin ve lületaşı (sepiyolit) tozunun elastikiyet modülünü artırdığını tespit etmişlerdir [14].

Atabek Savaş L. vd. (2022) çalışmalarında, PP/poliamid 6 (PA6) karışımlarında kullanılan kemik külü ve uyumlaştırıcı olarak maleik anhidrit aşıllı polipropilen (MAPP) katkısının kompozitlerin mekanik ve ayrıca tribolojik özellikleri üzerindeki etkileri araştırmışlardır. Sonuçlar incelendiğinde, kemik külü katkısının sertlik üzerinde, uyumlaştırıcı katkısının ise çekme ve eğme mukavemeti üzerinde daha etkili olduğunu bulmuşlardır. Kemik külünün sürtünme katsayılarını düşürmede de çok etkili olduğunu, özellikle uyumlaştırıcı ile birlikte kullanıldığında aşınma direncini önemli miktarda (%98'e kadar) azalttığını gözlemlemişlerdir [15].

Atar İ. vd. (2016) çalışmalarında, PP esaslı kompozit üretiminde patlıcan sapı ununun dolgu maddesi olarak değerlendirilip değerlendirilemeyeceğini araştırmışlardır. Bu amaç doğrultusunda pres kalıplama yöntemiyle dört farklı kompozisyonda örnekler üretmişlerdir. İstatistik analiz sonuçlarına göre polimer matriste patlıcan sapı unu kullanım oranının darbe direnci üzerine önemli derecede bir etkisinin olmadığını, fakat çekme direnci, çekmede elastikiyet modülü, eğilme direnci, eğilmede elastikiyet modülü,

kopmada uzama ve yoğunluk değerleri üzerinde önemli derecede etkili olduğunu gözlemlemişlerdir [16].

Chun K.S. vd. (2018) çalışmalarında, polipropilen kompozitlerde dolgu maddesi olarak kakao pod kabuğunun (CPH) tarımsal yan ürününü kullanmışlardır. Dolgu modifikasyonu için hindistancevizi yağından bir yeşil bağlayıcı madde (GCA) geliştirmişlerdir. Kompozitlerin genel gerilme özellikleri, su emilimi, termal kararlılığı ve kristallliği, GCA'nın ortaya çıkmasıyla önemli ölçüde iyileştirdiğini ve taramalı elektron mikroskobu yoluyla elde edilen sonuca göre CPH partiküllerinin homojen dağıldığını ve matris ile daha iyi ara yüzey bağını gösterdiğini ve kompozitlerin özelliklerinde önemli ölçüde iyileştirdiğini gözlemlemişlerdir [17].

Mansor M.R. vd. (2019) çalışmalarında, PP ve polietilen (PE) içeren, kullanılmamış tek kullanımlık çocuk bezlerinden türetilen geri dönüştürülmüş plastiğin karakterizasyonunu araştırmışlardır. Karışımlar termal, mekanik ve morfolojik özellikler açısından test etmişlerdir. Çekme testi, v-PP/PE ile karşılaştırıldığında r-PP/PE'nin mukavemet ve gerinme açısından daha düşük, ancak modül için sırasıyla %56, %55 ve %2 daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir [18].

Peşman E. ve Güleç T. (2019) çalışmalarında, mürekkebin (ofset ve toner) mevcudiyetinin, gazete ve ofis kağıdı fiber-plastik kompozitlerinin mekanik, fiziksel, morfolojik ve termal özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Basılı ve baskısız gazete ve ofis kağıdı lifleri, ağırlıkça %50 lif yüklemesinde geri dönüştürülmüş polipropilen ile karıştırmışlardır. Mürekkep formülasyonu ve lif özellikleri nedeniyle, basılı ofis kağıdı fiber-plastik kompozitlerle, basılı gazete fiber-plastik kompozitlere göre daha iyi sonuçlar elde ettiklerini gözlemlemişlerdir [19].

Shubhra TH Q. vd. (2011) çalışmalarında, kompozit hazırlamak için termoplastik PP matrisinde takviye olarak çeşitli lifler yaygın olarak kullanmışlardır. Elyaf takviyeli PP kompozitlerin (FRPC'ler) mekanik özellikleri birçok araştırmacı tarafından incelenmekte ve bunlardan çok azı bu çalışmalarından bahsetmişlerdir. Doğal lifler arasında keten lifleri çok güçlü olduğunu ve PP ile takviye edildiğinde iyi mekanik özelliklere sahip kompozitler üreteceğini tespit etmişlerdir [20].

Taşdemir M. ve Şen E.G. (2022) çalışmalarında, PP üzüm sapı ve çeltik karışımlarının özelliklerinin atık cam elyaf ilavesi ile geliştirilmesi üzerine çalışmışlardır. Polipropilen üzüm sapı ve çeltik çift vidalı ekstrüderde homojen bir karışım sağlamak için karıştırmışlardır. PP içerisine %20 oranında üzüm sapı-çeltik katmışlardır. Cam elyaf ise %10-15 ve 20 oranlarında katmışlardır.

Üzüm sapı-çeltik ve cam elyaf ilavesi, polimer kompozitinin mekanik özelliklerinde önemli değişimler sağladığını gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak kopma mukavemeti ve elastiklik modül değerleri artmış buna karşılık kopma uzaması ve darbe mukavemeti değerleri ise düştüğünü tespit etmişlerdir [21].

Zander N.E. vd. (2019) çalışmalarında, yeşil bir kompozit hammadde oluşturmak üzere selüloz atık malzemeleri kullanılarak geri dönüştürülmüş polipropilenin güçlendirilmesinde yapılan çalışmaları sunmuşlardır. Geri dönüştürülmüş polipropilen/atık kağıt, karton ve odun unu kompozitleri, katı hal kesmeli pulverizasyon işlemi kullanmışlardır. Geri dönüştürülmüş polimer kompozitler, işlenmemiş polimer kompozitlere kıyasla basılı parçalara dahil edilen daha yüksek dolgu seviyelerine sahipti. Selüloz malzemelerin eklenmesiyle depolama modülünde %20–30 artış. Çekme mukavemeti, ağırlıkça %10 selüloz ilavesiyle önemli ölçüde artmadı, ancak işlenmemiş polipropilende elastik modül %38 arttı. Kırılma yüzeylerinin analizi, kırılmanın arayüzeyde başladığını ortaya çıkardı, bu da arayüzey kuvvetinin dolgu kuvvetinden daha zayıf olduğunu gözlemlemişlerdir [22].

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmadan elde edilen genel sonuçlar aşağıdaki gibi listelenebilir:

1. Atık olarak sınıflandırılan fındık, ahşap-odun, hindistan cevizi lifleri, bambu, kevlar, kayısı çekirdeği kabuğu vb. organik takviye malzemeleri toz haline getirilerek, polimer kompozitlerin üretiminde dolgu malzemesi olarak kullanılabilir. Bu şekilde atık olarak görülen ve yakılarak tüketilen bu malzemeler katma değeri yüksek ürünlere dönüştürülebilir. Dolayısıyla zararlı çevresel etkileri minimize edilebilir.

2. Farklı inorganik ve organik katkıları bir arada kullanılarak yüksek ısı ve mekanik özelliklere sahip kompozitler elde edilebilir. PP içerisine eklenen organik takviye malzemelerinin ekstrüderde uygun parametre değerleri ayarlanarak granül haline getirilebilir. Organik takviye malzemelerinin yanmaması ve yapı içerisinde olumsuz bir etki göstermemesi için ekstrüder sıcaklık parametreleri ve vida dönme hızı doğru bir şekilde ayarlanmasıyla istenen özelliklerde kompozitler elde edilebilecektir.

3. Kompozit üretiminde en önemli aşama karışımların ekstrüzyon makinesinde doğru bir şekilde hazırlanmasıdır. Eğer bu süreç başarılı bir şekilde tamamlanırsa, granül haline getirilmiş malzemelerin enjeksiyonla kalıplanmasında çok ciddi bir problemle karşılaşılmamaktadır. Enjeksiyon yöntemiyle karışımlardan test numunesi üretilmesinde karşılaşılan en önemli sorun organik takviye malzemelerinin iyi ve homojen karışmaması ve toplanan bu tozların enjeksiyon nozulu ve yolluğu tıkararak malzeme akışına engel olmasıdır.

5. Kaynaklar

- [1] B. Beşergil, “Polimer Kimyası”, Gazi Kitabevi, s.25-475, 2008.
- [2] H. CENGİZ, Ömer, KARAGÖZ, İdris, DEMİRER, “Fındık Kabuğu ve Talk Dolgulu Polipropilen Kompozitlerin Mekanik ve Isıl Fındık Kabuğu ve Talk Dolgulu Polipropilen Kompozitlerin Mekanik ve Isıl Özelliklerinin İncelenmesi”, sayı August, 2021.
- [3] A. Kufel ve S. Kuciel, “Hybrid Composites Based on Polypropylene with Basalt/Hazelnut Shell Fillers: The Influence of Temperature, Thermal Aging, and Water Absorption on Mechanical Properties”, *Polymers (Basel)*., c. 12, sayı 1, s. 18, Ara. 2019, doi: 10.3390/polym12010018.
- [4] V. Çavuş ve F. Mengeloğlu, “The effect of lignocellulosic filler types and concentrations on the mechanical properties of wood plastic composites produced with polypropylene having various melt flowing index (MFI)”, *Pamukkale Univ. J. Eng. Sci.*, c. 23, sayı 8, ss. 994–999, 2017, doi: 10.5505/pajes.2017.80000.
- [5] V. Ç. F. MENGELOĞLU, “The Effect Of Synthetic And Lignocellulosic Filler Material Type, Ratio On Some Physical Properties Of Wood Plastic Composites”, c. 26–27, sayı March, 2019.
- [6] L. del P. Fajardo Cabrera de Lima, R. M. C. Santana, ve C. D. Chamorro Rodríguez, “Influence of Coupling Agent in Mechanical, Physical and Thermal Properties of Polypropylene/Bamboo Fiber Composites: Under Natural Outdoor Aging”, *Polymers (Basel)*., c. 12, sayı 4, s. 929, Nis. 2020, doi: 10.3390/polym12040929.
- [7] L. del P. Fajardo Cabrera de Lima, C. D. Chamorro Rodríguez, ve J. H. Mina Hernandez, “Use of Organic Acids in Bamboo Fiber-Reinforced Polypropylene Composites: Mechanical Properties and Interfacial Morphology”, *Polymers (Basel)*., c. 13, sayı 12, s. 2007, Haz. 2021, doi: 10.3390/polym13122007.
- [8] C.-H. Yeh ve T.-C. Yang, “Utilization of Waste Bamboo Fibers in Thermoplastic Composites: Influence of the Chemical Composition and Thermal Decomposition Behavior”, *Polymers (Basel)*., c. 12, sayı 3, s. 636, Mar. 2020, doi: 10.3390/polym12030636.
- [9] A. Gültaş, M. Zeyveli, S. Kaya, ve M. Altuğ, “Investigation of rheological and mechanical properties of wood flour reinforced polypropylene”, *Materyal. Werkstofftech.*, c. 49, sayı 1, ss. 73–88, Oca. 2018, doi: 10.1002/mawe.201600714.
- [10] Z. A. S. Nafis vd., “Effect of Wood Dust Fibre Treatments Reinforcement on the Properties of Recycled Polypropylene Composite (r-WoPPC) Filament for Fused Deposition Modelling (FDM)”, *Materials (Basel)*., c. 16, sayı 2, s. 479, Oca. 2023, doi: 10.3390/ma16020479.

- [11] N. Narlıoğlu, N. S. Çetin, M. H. Alma, N. Narlıoğlu, N. S. Çetin, ve M. H. Alma, “Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi özelliklerine etkisi Effect of black pine sawdust on the mechanical properties of polypropylene composites”, c. 1, sayı 1, ss. 38–45, 2018.
- [12] E. ÖZDEMİR, “PERLİT KULLANIMI İLE ODUN PLASTİK KOMPOZİTLERİN FİZİKSEL, MEKANİK VE YÜZEY ÖZELLİKLERİNDEKİ DEĞİŞİMLERİN BELİRLENMESİ”, *Kabramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg.*, c. 24, sayı 1, ss. 15–23, Mar. 2021, doi: 10.17780/ksujes.795348.
- [13] N. Yamankaradeniz, E. Kilik, ve T. Meral, “Investigation the Effects of Chitosan Added PP Polymer on Burn Retarding”, c. 1, sayı 3, ss. 9–17, 2020.
- [14] Y. U. İlkey AKGÜRBÜZ, “Kahramanmaraş Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences”, *Kabramanmaraş Sutcu Imam Univ. J. Eng. Sci.*, c. 22, sayı 3, ss. 71–77, 2019.
- [15] L. A. Savaş ve Y. Uzunoğlu, “EFFECT OF BONE ASH AND COMPATIBILIZER ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF PP / PA6 MATRIX COMPOSITES KEMİK KÜLÜ VE UYUMLAŐTIRICININ PP / PA6 MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK”, c. 6, sayı 1, 2022.
- [16] F. M. İlkey ATAR , İbrahim Halil BAŐBOĖA, Kadir KARAKUŐ, “Received: 1 November 2016; Accepted: 23 December 2016”, c. 6, sayı 2, ss. 96–103, 2016.
- [17] K. S. Chun, C. M. Yeng, ve S. Hussienyash, “Green coupling agent for agro-waste based thermoplastic composites”, *Polym. Compos.*, c. 39, sayı 7, ss. 2441–2450, Tem. 2018, doi: 10.1002/pc.24228.
- [18] M. R. Mansor *vd.*, “Thermal and mechanical behaviour of recycled polypropylene/polyethylene blends of rejected-unused disposable diapers”, *J. Adv. Manuf. Technol.*, c. 13, sayı 3, ss. 13–23, 2019.
- [19] E. PESMAN ve T. GÜLEÇ, “The Effects of Ink Presence on Mechanical, Physical, Morphological and Thermal Properties of Office and Newspaper Fiber-Polypropylene Composites”, *Mater. Sci.*, c. 25, sayı 2, ss. 195–201, Nis. 2019, doi: 10.5755/j01.ms.25.2.19617.
- [20] Q. T. H. Shubhra, A. Alam, ve M. Quaiyyum, “Mechanical properties of polypropylene composites”, *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, c. 26, sayı 3, ss. 362–391, Nis. 2013, doi: 10.1177/0892705711428659.
- [21] M. TAŞDEMİR ve E. G. ŞEN, “Polipropilen/Üzüm Sapı/Çeltik Polimer Kompozitinin Mekanik Özelliklerinin Atık Cam Elyaf ile Geliştirilmesi”, *Int. J. Adv. Eng. Pure Sci.*, c. 34, sayı 1, ss. 131–140, Mar. 2022, doi: 10.7240/jeps.1041672.

- [22] N. E. Zander, J. H. Park, Z. R. Boelter, ve M. A. Gillan, “Recycled Cellulose Polypropylene Composite Feedstocks for Material Extrusion Additive Manufacturing”, *ACS Omega*, c. 4, sayı 9, ss. 13879–13888, Ağu. 2019, doi: 10.1021/acsomega.9b01564.

Kauçuk Esaslı Kompozitlerde Kullanılan Katkı Maddeleri¹

Nürettin Akçakale¹

Özet

Kauçuklar; çekme kuvveti altında çok yüksek oranda uzama gösteren ve kuvvet kaldırıldığında ilk uzunluğuna dönen, çapraz bağlanmış polimerik malzemelerdir.

Kauçuk formül karışımlarına değişik özellikler kazandırmak için farklı malzemeler katılır. Bu malzemeler dolgu ve katkı maddeleri olarak isimlendirilir. Elastomer özellikli malzemelerde; elastomerik malzemelerin yanı sıra malzemenin özelliklerini geliştirmek için farklı dolgu ve katkı maddeleri kullanılmaktadır.

Kauçuklarda kuru toz halinde katılan çok küçük tane boyutlu maddelere dolgu maddeleri denir. Bu maddeler; kauçukların fiziksel ve mekaniksel özellikleri geliştirme etkilerinin yanı sıra, işlenebilme özelliği geliştirmek, ekonomik karışımlar oluşturmak ve renklendirme amacı ile katılır. Dolgu maddelerini, güçlendirici etkisi olanlar, yarı güçlendirici etkili, salt dolgular diye üçe ayırmak mümkündür.

Katkı maddeleri; ise kauçuklarda belli özellikler sağlamak için az miktarlarda ilave edilen maddelerdir. Bunları; vulkanizasyon maddeleri (hızlandırıcılar, aktivatörler, geciktiriciler), yumuşatıcılar (yağlar), proses kolaylaştırıcılar (hidrokarbonlar, yağ asitleri, sentetik reçineler, kurutucular (organik thio karışımlar), yaşlanma önleyiciler ve koruyucular (antiozanat, antioksidant), şişiriciler, boya maddeleri (pigmentler), koku vericiler, özel amaçlı maddeler olarak gruplandırılmak mümkündür.

Doğal veya sentetik kauçuktan imal edilmiş makine parçalarının hemen hepsi organik ve inorganik malzemelerin ezilmiş ve sakızlaşmış elastomerlere karıştırıldıktan sonra vulkanize edilmeleri ile elde edilir.

1 Doç. Dr. Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, akcakale_n@ibu.edu.tr,
ORCID ID: 0000-0002-2038-3294

Kauçuk malzemelerin imalatı iki aşamada gerçekleşir. İlk aşamada belli formülasyona göre karışım hazırlanır. Daha sonraki aşama ise karışımın ekstrüzyon, kalenderleme ve kaplama yöntemi ile şekillendirilmesidir. İşlem vulkanizasyon işlemi ile tamamlanır. Bazı malzemelerde ise işlem daha kısa sürdüğünden vulkanizasyon sonrası bitirme işlemleri yapılır.

Bu çalışmada kauçuk esaslı elastomerlerde kullanılan katkı maddelerinin özellikleri ve etkileri incelenmiştir.

1. Giriş

22-23 C⁰ sıcaklıklarda orijinal boyunun en az iki misli kadar uzatılabilen ve bu uzamaya sebep olan kuvvet ortadan kaldırıldığında eski halini alabilen polimerik malzemelere elastomer adı verilir. Elastomerleri diğer polimerlerden ayıran bu en önemli özellik, tamamen molekül yapılarının içerdiği düşük çapraz-bağ yoğunluğuna sahip olmalarından kaynaklanmaktadır.

Kauçuklardaki bu elastikiyet özelliği polimer zincirlerinin arasındaki düşük çapraz bağ yoğunluğuna ve sahip olduğu düzensiz yapıya bağlıdır. Kauçuğumsu polimer zincirleri çekme yükü altında uzamaya başlar, ancak kalıcı deformasyon çapraz-bağlar tarafından engellenir. Ancak sıcaklık arttıkça, malzemenin akışkanlığı artar ve giderek termoplastik davranış gösterirler [1].

Kauçuk özellikli kompozit malzemelerin kullanım alanları gelişen teknoloji ile her geçen gün artmaktadır. Kauçuklar; otomotiv sanayi, beyaz eşya sektörü, inşaat, doğal gaz, tıp, uzay bilimi, tekstil, gıda ve bunun yanında birçok sektörde geniş kullanım alanına sahiptir.

Kauçuk endüstrisinde gelişen teknolojiye paralel olarak malzemelerden beklenen özellikler de artmaktadır. Kauçuklar çok maksatlı, geniş kullanım potansiyeli olan yaşamımızda hayati önem taşıyan lastik malzemelerin yegâne hammaddeleridir.

Özellikle otomotiv sektöründe insan hayatı için çok önemli ve fonksiyonel parçaların üretiminde kauçuklar kullanılmaktadır. Otomotiv endüstrisinde kauçuk kullanım alanlarına; tekerlekler, akaryakıt ve fren hortumları, cam silecekleri, transmisyon kayışları, radyatör ve hava hortumları, contalar, titreşim takozları, aks körükleri ve izolasyon maddeleri örnek olarak verilebilir [2, 3].

Beyaz eşya sanayinde sıcak, soğuk su hortumları, körükler, contalar; otoyol ve viyadüklerde kullanılan elastomer yataklar, genleşme contaları; uzay, elektronik, tıp, gıda, inşaat, elektronik ve ayakkabı sanayinde çeşitli ve önem arz eden lastik parçalar kauçuğun diğer kullanım alanlarıdır [4, 5,6].

Kauçuk malzemelerin endüstride mamul veya yarı mamul olarak kullanıldıkları yerlerde; hava, güneş ışığına, kimyasallara, sıcak ve soğuğa maruz kaldıkları ve bunlardan olumsuz olarak etkilendikleri bilinmektedir. Kauçuk parçaların dış tesirlerden ne kadar etkileneceği ve ömürlerinin ne olacağı uygulanan çeşitli testlerle tespit edilmeye çalışılmaktadır.

Elastomerler; kauçukların seyrek çapraz bağlanması (cross linking) sonucu elde edilirler. Elastomerler, seyrek çapraz bağlanma sonucunda molekül zincirlerinin birbirlerine göre sabit bir konumda olmaları nedeniyle, kauçuklardan farklı olarak yüksek sıcaklıklarda termoplastik davranış göstermemektedir. Elastomerler, çapraz bağ yoğunluğu bakımından, plastomerler ve duromerler arasında yer alır.

Kauçuk reçetesine mamul ürünün kullanım yerinin özelliğine göre organik veya inorganik birçok katkı ve dolgu malzemesi ilave edilmektedir. Bu katkı maddeleri ve işlem proseslerinin etkisi ile; iyi elastikiyet, sertlik, yumuşaklık, düşük veya yüksek yoğunluk, yüksek aşınma, kopma ve çekme dayanımı ile yanmaya karşı direnç vb istenilen özelliklere sahip kauçuk malzemelere talepler artmaktadır.

2. Kauçukların Sınıflandırılması

Kauçuklar en genel anlamı ile doğal ve sentetik kauçuklar olmak üzere iki grup altında sınıflandırılabilir. Yaygın bir sınıflandırma da kullanım sıklığına göre yapılandır. Kullanım sıklığına göre, kauçuklar genel kullanım kauçukları, özel kullanım kauçukları olarak sınıflandırılabilir. Genel kullanım kauçukları, kauçuk tüketiminin % 95'ini oluşturmaktadır. [7, 8]. Özel kullanım kauçukları içinde en önemlileri klor kauçuğu (CR) ve nitril kauçuğudur (NBR). Diğer kauçukların tüketimlerinin toplamı % 2 civarındadır.

2.1. Kauçuklarda Karışım Hazırlama

İstenilen özellikleri vermek amacı ile ham kauçuğa çeşitli kimyasalların ilavesi, kauçuk bileşimi hazırlama olarak tanımlanır [9].

Kauçuk karışımı, istenilen özelliklere göre ayarlanmış, kauçuk ve diğer hammaddeler ile katkı maddelerinden oluşan, vulkanize edilebilen bir karışımdır. Kauçuk ürünlerin hayatın hemen her alanında çok önemli yerleri vardır. Bu ürünlerin başarıları ise doğru polimerlerin, kauçuk kimyasallarının ve dolgu maddelerinin uygun oranlarda karışmalarına bağlıdır [10].

Kauçuk karışımı, istenilen özelliklere göre ayarlanmış kauçuk ve diğer hammaddeler ile katkı maddelerinden oluşan vulkanize edilebilen bir karışımdır.

Kauçuk karışımından istenilen özellikler:

- a. Bitmiş mamulden istenilen özellikler,
- b. Uygulanacak metot ve kullanılacak makine ve ekipmana uygunluk açısından beklenen özellikler,
- c. Rekabet edebilmesi bakımından maliyet özellikleridir.

Amaca uygun olarak seçilmiş ve birbirleriyle oransal olarak ayarlanmış maddeler topluluğu “Reçete” veya “Formül” olarak isimlendirilir [11, 12]. Fonksiyonel olarak kauçuk karışımına giren maddelerin sistematığı şöyledir:

-Doğal, suni kauçuk(lar)

-Vulkanizasyon maddeleri

Kür maddeleri (kükürt ve kükürt vericiler), (peroksit vb kür maddeleri)

(Hızlandırıcılar, Aktivatörler, Geciktiriciler)

-Aktif (Takviye edici) ya da aktif olmayan dolgu maddeleri

-Proses kolaylaştırıcılar

-Yaşlanmayı önleyiciler

-Koruyucular

-Şişiriciler

-Yumuşatıcılar

-Boya maddeleri

-Özel amaçlı maddeler.

Her kauçuk karışımının ortak özelliği en az bir kauçuk çeşidinden ve vulkanizasyon sisteminden oluşmasıdır. Bunlar olmadan elastik özellikler sağlanamaz, bu sistematığın en önemli elemanı kauçuk ya da kauçuklardır.

Kauçuk(lar) dışında kullanılan tüm maddeler elastomer veya elastomerlerin toplamı 100 olacak şekilde reçeteye konur. Elastomer dışı tüm katkıları phr olarak reçeteye konur. Bununla birlikte bazı kauçuklar bünyelerinde kauçuk dışı katkılarda bulundurulabilmektedir. Phr “ parts per hundred of rubber “ yani, “yüz kısım kauçuk” olarak tanımlanır [11]. Tablo 1’de bir karışım formülü (reçetesi) örneği görülmektedir. Tablodaki örnekte, her reçete için bu maddelerin tamamının kullanılması gerektiği sonucu çıkarılmamalıdır. Ama en az bir kauçuk çeşidi ve vulkanizasyon sistemi oluşturan maddeler (geciktirici dışında) bulunmak zorundadır.

Kauçuklar hiçbir zaman yalnız olarak kullanılmazlar. Bir kauçuk karışımı (hamuru) genellikle ağırlıkça %50 oranında kauçuk içerir [2,9,13]. Bazı uygulamalarda bu oranların dışına çıkılabilmektedir. Karışımda kauçuk oranının fazlalığı maliyeti artırmaktadır [6, 7, 9].

Tablo 1. Kauçuk formülünde kauçukların ve diğer dolgu ve katkı malzemelerin kullanım oranları [2, 9,13]

Malzeme	Kullanım %
Kauçuk(lar)	100
Vulkanizasyon maddeleri (Kükürt)	2-10
Dolgu maddeleri	20-100
Yumuşatıcılar	0-30
Proses (işlem) kolaylaştırıcılar	3-5
Yaşlanma önleyiciler	0-10
Yağ asidi (Stearik asit)	1,5
Hızlandırıcı	1,2
Antiozanat	1
Antioksidant	1
Boyalar	0-8
Koku vericiler ve koku kapatıcılar	0-2

Kauçuk teknolojisinde karışım formülleri hazırlamak malzeme ve teçhizatla yüzlerce değişken olduğundan oldukça zor ve karmaşık bir iştir. Formül (reçete) hazırlamak sadece matematiksel yöntemlerle çözülemez ve sadece malzeme bilgisi de yeterli olmamaktadır. İyi bir formül için karışımın kullanılacağı işlemlerdeki makine ve teçhizat bilgisi de gerekmektedir. Bütün bunlar bilindiği takdirde, işleme imkânları ve fiyat belirli bir dengeye getirilebilir. Yeni bir reçete hazırlanırken; mesleki deneyim, eski formül bilgileri ile işyeri ve çevredeki bütün hazır bilgilerden yararlanmak gerekir. Formül oluşturmada aşağıdaki maddeler göz önünde bulundurulmalıdır [2].

- Hedeflerin tespit edilmesi (Özellikler, fiyat)
- Kullanılacak elastomer seçimi
- Karışımın test bilgilerinin incelenmesi
- Malzeme özellik ve bilgilerinin incelenmesi
- Bir başlangıç formülü seçimi
- Laboratuvarda bunu hedeflerine göre geliştirme

- Karışımın milliyetinin gözden geçirilmesi
- İmalatta işlenebilme özelliklerinin kontrol edilmesi
- Uygun karışımdan bir mamul hazırlanması
- Mamulün şartnameye uygun olarak kontrol edilmesi

2.2. Kauçuk Esaslı Kompozitlerde Kullanılan Katkı Maddeleri

Kauçuğun işlenmesi aşamasında üretilen ürüne istenilen özellikleri kazandırmak için çeşitli katkıları katılır. Kauçuk sanayinin ilk yıllarından beri, kauçuğun kuvvetlendirilmesi işlenebilme özelliklerinin iyileştirilmesi, kuvvetlendirilmesi, fiyatının ucuzlatılması ve renk verilmesi gibi amaçlarla kuru toz halindeki inorganik ya da organik birçok madde kullanılmaktadır.

Dolgu maddeleri, tabii kauçuğun mastikasyonu yapılarak, bu maddeleri bünyesine alabileceği anlaşıldıktan sonra kullanılmaya başlanmıştır. Güçlendirici türünde olanlar, kauçuğun mekanik özelliklerinde, kuvvetlendirici etkiler yaparken, salt dolgu maddesi türünde olanlar genellikle formülasyonu ucuzlatmakta ve bazı proses işlemlerinde iyileştirici özellikler sağlamaktadır. “Güçlendirici Tesir” sözcüğünden, polimer molekülleri ile etkileşime giren dolgu maddelerinin, karışımın mekanik özelliklerini (kopma dayanımı, yırtılma ve aşınma dayanımı) güçlendirmeleri anlaşılır. Örneğin; hiçbir dolgu maddesi içermeyen saf Stiren bütadien (SBR) kauçuktan oluşan bir karışımın kopma dayanımı değeri 25–30 kg/cm² olarak test edilirken, belirli bir oranda ve uygun özellikte karbon siyahı ile takviye edilmesi halinde bu değer 200 kg/cm²’ye ulaştığı görülmüştür [7].

Kauçuğu güçlendirici dolgu maddeleri ile salt dolgu görevi gören maddelerin birbirinden ayrılması ve güçlendirmenin tarifi konusunda kauçuk ile uğraşanlar arasında tam bir fikir birliği sağlanamamıştır.

2.3. Vulkanizasyon (Çapraz Bağlama)

Charles Goodyear 1839 yılında, doğal kauçuğun kükürtle reaksiyona girmesi sonucu özelliklerinin değiştiğini keşfetti, fakat bu süreci işletemedi. Bu proses Thomas Hancock tarafından 1843 yılında Londra’da sonuçlandırıldı ve Roma Ateş Tanrısından esinlenerek, vulkanizasyon adı verildi [2, 6].

Kauçuk; katkı maddeleri karıştırıldığı zaman plastik haldedir. Isıtılır ya da bir dış kuvvet etkisinde kalırsa deforme olur veya bulunduğu kabın şeklini alır. Kauçuğun daha fazla kullanılabilir bir malzeme haline gelmesi ancak vulkanizasyonun bulunmasından sonra, olmuştur. Vulkanizasyon işlemi uygulanan kauçuğun, yapışkanlığının kaybolduğu, kopma dayanımı ve

elastikliğinin arttığı, çözücülerde çözünmediği, ancak şiştiği, hava şartlarına, sıcaklığa, ısıya ve ışığa daha dayanıklı olduğu gözlenmiştir. Başlangıçta, kauçuk moleküllerinin kükürt vasıtası ile (Kükürt köprüleri) çapraz bağlanması “vulkanizasyon” olarak isimlendirilmiştir. Ancak daha sonraları, bu çapraz bağlanma işleminin başka kimyasallar ile (peroksitler v.s.) ve başka metotlarla da (yüksek enerjili ışınlar) yapılabildiği anlaşılınca, kauçuğun daha fazla plastik halden, daha fazla elastik hale getirilerek, elastomer haline dönüştürülmesi işlemine “vulkanizasyon” denmiştir. Günümüzde kauçuk teknolojisinde vulkanizasyon ve çapraz bağlanma (cross linking) kavramları eş anlamlı olarak kullanılmaktadır.

Kauçuk molekülleri birbirlerine bağlı değilken, bilhassa yüksek sıcaklıklarda, birbirlerine karşı az veya çok serbest hareket edebilirler. Malzeme plastik olup, mekanik ve termodinamik olarak, geri dönüşümsüz bir akışkanlık gösterir. Çapraz bağlanma sonucunda ise, kauçuk, üç boyutlu bir ağ yapısı oluşturarak, termoplastik halden, elastik hale geçer.

Çapraz bağlar tek bir kükürt atomundan oluşan kısa bir bağ olabileceği gibi, iki veya daha fazla kükürt atomundan veya mesela peroksitle yapılan vulkanizasyon sonucu, doğrudan doğruya karbon-karbon bağlarından da oluşabilir.

Üç boyutlu ağ yapılaşması neticesinde, molekül ağırlıkları normal olarak 100 000 ile 500 000 arasında değişen uzun kauçuk molekülleri üzerinde oluşan bağ noktaları arasındaki ortalama molekül ağırlıkları (M_c) 4.000 ile 10.000 arasında olmaktadır.

2.3.1. Kükürtle Çapraz Bağlama

Kükürt ilk kez doğal kauçuğun vulkanize işleminde kullanılmıştır. Vulkanizasyon; 100 phr polimerin 8 phr kükürt ile karıştırılarak 5 saate 140 °C pişirilmesi ile oluşmuştur. Daha sonraları metal oksit (5 phr çinko oksit) Fatty asit ve organik hızlandırıcılar (0,5–2 phr) ilave edilerek modern pişirme sistemleri oluşmuştur. Bu katkı maddelerinin ilavesi ile pişme süresi 2–3 dakikalara inmiştir. Tablo 2’de çapraz bağ yoğunluğunun elastomer özelliklerine etkileri görülmektedir.

Tablo 2. Çapraz bağ yoğunluğundan çok ve az etkilenen elastomer özellikleri [2]

Çok Etkilenen Özellikler	Az Etkilenen Özellikler
Gerilim değeri	Aşınma dayanımı
Kopma dayanımı	Gaz geçirgenliği
Kopma uzaması	Oda sıcaklığında geri çarpma elastisitesi
Yüksek sıcaklıklarda geri çarpma elastisitesi	Oda sıcaklığında dinamik soğukta esneklik
Yırtılma dayanımı	Elektrik direnci
Kalıcı uzama	
Kalıcı deformasyon	
Yorulma dayanımı	
Dinamik çalışmada ısınma	
Şişme dayanıklılığı	

Serbest kükürt 2–3 phr azaltarak mekaniksel ve performans özelliklerinde iyileşmeler sağlar. Kauçukların büyük çoğunluğu, hatta genel maksatlı kauçukların tamamı molekül zincirlerinde çift bağ ihtiva ettiklerinden, kükürt ile çapraz bağlanabilmektedirler. Kükürt ile çapraz bağlama, bugün hala endüstride kullanılan en yaygın vulkanizasyon metodudur. Tablo 3’de kauçukta vulkanizasyon maddeleri ve kullanım oranları görülmektedir.

Vulkanizasyonda kullanılacak kükürtün en az % 99,5 saflıkta ve kül oranının en fazla % 0,5 tane büyüklüğünün ise orta büyüklükte (takriben 70 -80 Chancel derecesi) olması gerekir. Asidik maddeler taşımamalıdır.

Tablo 3. Vulkanizasyon maddeleri ve kullanım oranları.

Vulkanizasyon Maddeleri	Kullanım %
Çinko Oksit	2–10
Stearik Asit	1–4
Kükürt	0,5–4
Akseleratör	0,5–10

Elastomer malzeme üretiminde kullanılan vulkanizasyon sistemlerinde kükürt oranı, genel olarak ağırlıkça 100 kısım kauçuk (100 Phr) üzerinden 0,2 kısım ile 5 kısım arasında kükürt olarak değişmektedir. Fazla miktarda kullanılan kükürt çapraz bağların daha ziyade “polisülfid-köprüleri şeklinde oluşmasına sebebiyet verdiği gibi aynı molekül zinciri üzerinde (intramoleküler), halka yapısında (Cyclic) çapraz bağ yapmayan kükürt köprüleri oluşmasına da sebep vermektedir. Bu durum ise elastomerin mekanik özelliklerine olumsuz etki yapmakta ve çapraz bağların koparak, ağ yapısının bozulmasına, dolayısıyla malzemenin yaşlanmasına yol açmaktadır.

2.3.2. Vulkanizasyonda kükürdün özellikleri

Kükürt; NR ve CBR'de oda sıcaklığında kolayca çözünür. NBR de ise CBR den daha az çözünür. Yüksek ısılarda kükürdün kauçuk içerisindeki çözünürlüğü artar. Fazla çözünen kükürt hamurun soğuması sırasında kükürt kuma yapar. Dinlendirilmiş hamurda görülen beyazlık bundan ileri gelmektedir [10]. Bu kuma hamurun birbirine yapışmasını önler. Bu problemi gidermek için çözünmez kükürt diye isimlendirilen (karbon sülfürde % 65–95 çözünmeyen) kükürt çeşidi kullanılır.

2.3.3. Hızlandırıcıların (akselatör) karşılaştırılması

İdeal bir vulkanizasyon için ikili hızlandırıcılar kullanılmalıdır. Tiazol grupları thiuram ile ya da asidik hızlandırıcılar bazik hızlandırıcılarla karıştırılarak daha güvenli ve hızlı reaksiyonlar elde edilebilir [6].

Tiazol grubundan bir hızlandırıcı (MBT) bir aminle birleşip sulfenamidi meydana getirir. Sulfenamidin reaksiyon öncesi parçalanması gerekir. Bu süre çalışma güvenliğini sağlar. Parçalanmış sulfenamidin yerinde artık çok hızlı olan tiazol + amin kombinasyonu vardır. Böylece egrin eğimi dikleşir ve hızlı reaksiyon oluşur [7].

Yanma zamanının uzunluğu kükürt halkalarının daha fazla parçalanmaları ve sonuçta kükürdün bir atoma kadar düşmesini sağlar. Oluşan köprüler kısalar, ısıya daha dirençli olur. Hızlandırıcı önce aktif kükürtle bağ kurarak polimerdeki doymamış C atomuna köprü kurma işlemini hızlandırır. Bu etki özellikle kalın kauçuk numunelerinin pişmesinde önemlidir. Optimum pişme en iyi mekaniksel özellikler dengesini veren pişme zamanıdır [8]. Tablo 4'de kükürtlü pişirme sistemi ile vulkanizasyon işleminde kullanılan katkıları görülmektedir.

Tablo 4. Kükürtlü pişirme sistemi ile vulkanizasyon [7]

Karışım Katkıları		
Vulkanizasyon Elemanları	Kükürt Kükürt esaslı hızlandırıcılar	
Hızlandırıcılar	Bazik tip	Diefenil guanilid Tiocarbanilit
	Asitik tip	Tiazoller Sulfnamidler
Ultra hızlandırıcılar	Thiuramlar Ditiokarbonatlar Xantat'lar	
Hızlandırıcı Aktivatörler	Çinko oksit Steatik asit Diğer değiştiriciler (Metal oksitler)	

Vulkanizasyon; ham kauçuklar belirli kimyasal maddelerin tatbik edilmesiyle, onların çekme kuvvetini, sağlamlığını ve dayanıklılığını arttırmak ve kullanıma hazır hale getirmek için yapılan işlemlere denir [11]. Genelde ve en basit şekilde kauçuk vulkanizasyondan sonra aşağıdaki değişiklikleri gösterir;

1. Yapışkanlığın önlenmesi
2. Çekme kuvvetinde artma
3. Solventlerde çözünmeye karşı direnç
4. Soğukta akma ve plastiklikte azalma
5. Elastikiyet artışı
6. Sıcaklık hassasiyetinde azalma

2.2.4. Süreç ve Üretim

Kauçuk parçaların üretimi şu kademeleri içerir.

2.2.4.1. Karıştırma

Kauçuk sanayinde karıştırma işlemi yoğurma olarak da anılır.

- 1- Açık Karıştırıcı (Hamur makinesi). Bu makine ayarlanabilir ara boşluğu olan iki koşut valsten oluşur.
- 2- İç karıştırıcılar (Kapalı Karıştırıcı). En çok kullanılan Banbury dir. Banbury karıştırma süresini kısaltır.

2.2.4.2. Kükürtlenme (Vulkanizasyon)

Elastomer malzeme üretebilmek için en yaygın kullanılan kükürtleme yöntemi: Elektrik, ışın, ısıtılmış buhar ya da kızgın yağla ısıtılan ve hidrolik preste plakalar arasına konulan kalıbın içine yerleştirilen kauçuk karışımı sıcaklık ve basınç etkisiyle kükürtlenir.

Sıkıştırma kalıplama sisteminde kullanılan kalıplar genellikle iki parçadan oluşur. Önceden hazırlanmış hamur kalıp boşluğuna konulur ve sıkıştırma gerçekleştirilir. Artan bölüm kanal vasıtasıyla dışarı atılır. Bu artığa çapak adı verilir.

2.2.5. Vulkanizasyon Mekanizması

Kauçuğun vulkanizasyonu amacıyla kullanılan maddelerin başında kükürt gelmektedir. Uzun polimer zincirlerinin köprüler üzerinden birbirine bağlanması kükürt ile gerçekleştirilir. Zincirlerin köprülenmesi benzoil

peroksit, mor ötesi ışınlan ya da iyonlaştırıcı ışınım etkisiyle de sağlanabilir. Kükürtleme kauçuğun gerçek esnekleşmesini, yaşlanmaya karşı direnci olmasını sağlar. Kauçuk sanayinde % 1–5 arası kullanılır. Ebonit üretiminde %30 kükürt oranı söz konusudur.

Çinko oksit en çok kullanılan aktivatör olmasına rağmen, kauçukta çözünürlüğü iyi olmadığından, çözünürlülüğü arttırmak için stearik asit ilave edilir. Çinko oksit ve stearik asit birleşerek kompleks aktivatörü oluşturur ve bu kompleks aktivatör hamurda çözünürdür. Bu ürün daha sonra kükürdü kauçuk zincirine transfer eder.

2.2.5.1. Vulkanizasyon Sisteminin Bileşimi

Kükürtle vulkanizasyon sisteminde ağırlıkça 100 birini kauçukta 0,5 ile 3 birim arasında kükürt kullanılmaktadır. Çinko oksit için bu oran 1 ile 5; stearik asit içinse, 1 ile 3 birimdir. Ayrıca farklı tipte hızlandırıcılar da toplamda 3 birime kadar ilave edilebilir. Öte yandan, hızlandırıcılar ile kükürdün oranı ters orantılıdır. Sentetik kauçuklarda doğal kauçuğa göre daha fazla hızlandırıcı kullanılmaktadır [14].

Karbon-Kükürt molekülleri arasındaki bağ enerjisi 268 kJ/mol iken, bu değer kükürt-kükürt arasındaki bağ için 205 kJ/mol'dur. Fakat peroksitli vulkanizasyonda oluşan karbon-karbon bağının enerjisi 352 kJ/mol'dur [2, 15].

Kükürt oranı zengin ve yüksek oranda polisülfür köprüler ihtiva eden vulkanize olmuş karışımlar çok iyi elastiklik ve iyi esneme dayanımı özelliklerine sahiptir. Fakat yaşlanma dayanımları kötüdür. Diğer yandan kükürt oranı az, etkili veya yarı etkili olarak adlandırılan vulkanizasyon sistemlerinde ısıl dayanımı çok iyi, özellikle sıcakta basma kuvveti altında kalıcı deformasyonu düşüktür [8, 16].

2.2.5.2. Diğer Vulkanizasyon Yöntemleri

Metal oksitler; özellikle polikloropren olmak üzere, polietilen klorosülfon, poliepioklorhidrin gibi halojen elastomerlerin vulkanizasyonunda kullanılır. Çinko oksit olan vulkanizasyon ajanı, elastomer zinciri üzerindeki klor atomları ile reaksiyona girer. Çinko oksitle beraber kullanılan magnezyum oksit de oluşan HCl asidini nötrleştirir ve pişmeye başlama riskini azaltır. Çoğunlukla çinko oksit ve magnezyum okside tiuram sınıfı bir hızlandırıcı da ilave edilebilir [15,16].

Formofenolik reçinelerle ve kionin dioksinlerle vulkanizasyon; özellikle butil kauçuklara (IIR) iyi ısı dayanımı (160 °C) özelliği kazandırmak amacıyla kullanılır. Fakat pişme süreleri çok uzundur [2, 16].

Amin ve metal oksit sabunları ile vulkanizasyon, ACM (poliakrilik kauçuk) ve EACM (etilen akrilat kauçuk) elastomerlerde kullanılır [17, 18].

2.2.5.3. Peroksitle Vulkanizasyon

Peroksit, molekül zincirlerinde çift bağ bulunmayan (doymuş) elastomerlerin (EPM, CR.) vulkanizasyonunda kullanılmaktadır. Ayrıca sağlam karbon-karbon bağ yapısı ihtiva ettiğinden, dien elastomerlerde düşük kalıcı deformasyon ve iyi ısı dayanımı özellikleri sağlamak için kullanılmaktadır. Nadir olarak kullanılan anorganik ve silisyum organik peroksitlerin yanı sıra, günümüzde yaygın olarak organik peroksitler (Dikümil, Benzoiil, Di-tertiobutil) kullanılmaktadır [6, 19].

Çapraz bağ yoğunluğu önemli ölçüde sıcaklığa bağlıdır. Dien tipi kauçukların kükürt ile vulkanizasyonunda olduğu gibi, hızlandırıcılarla daha hızlı ve daha yoğun bir çapraz bağlanma elde etmek mümkün değildir. Hızlı reaksiyon ancak artan sıcaklıkla mümkündür. Peroksit miktarının kauçuğun cinsine ve kullanılan peroksidin cinsine bağlı olarak belirli bir optimum orana kadar artırılmasıyla, çapraz bağ yoğunluğunu arttırmak mümkündür. Bu durumda elastomerin gerilme dayanımı, kalıcı deformasyonu artar, dinamik özellikleri olumlu etkilenir, ancak yırtılma dayanımı kötüleşir. Çapraz bağ yoğunluğunu arttırmak için “coagent” adı verilen kimyasallar kullanılır. Triallil siyanürat, bismaleimid ve akrilik ester en çok kullanılan kimyasallardır [2].

2.2.6. Aktivatörler

Vulkanizasyon işlemini hızlandıran ve çok zaman mekaniksel özellikleri de etkileyen hızlandırıcıları etkinleştiren maddelere aktivatör adı verilir. Etkinlikleri hızlandırıcının türüne göre değişen bu maddelerin başında çinko oksit ve stearik asit gelmektedir.

2.2.7. Geciktiriciler

Vulkanizasyonu geciktirerek erken kavrumayı engelleyen ve süreç işlemlerine süre tanyan maddelerdir.

2.2.8. Koruyucular

Elastomerlerin yaşlanmasını yavaşlatan ya da önleyen maddelerdir. Yaşlanma: Elastomerin özelliklerinin zaman içerisinde değişikliğe uğraması, bozulmasıdır.

Bu değişiklikler çatlama, sertleşme, kırılma ve kabuklaşma olarak kendini gösterebilir. Polimerdeki doymamışlık oranı arttıkça yaşlanmaya

karşı duyarlılık artar. Çift bağlar oksijen ozon ve diğer etkin maddelerin tepkisini çeker, ayrıca kükürt ile tepkimeye girerek sertleşmeye sebep olur. Yaşlanmaya en çok eğilim gösteren SBR'dir. Bunu NBR takip eder.

2.2.9. Hızlandırıcılar

Vulkanizasyon hızını arttıran ve bu arada elde edilen ürün üzerinde de olumlu etkiler yapan organik kökenli maddelerdir. Etkinlik derecelerine göre dört sınıfa ayrılırlar.

- Çok hızlı: Thiuram, ditiyokarbamat ve ksantat cinsi hızlandırıcılar. Bunların kullanılması durumunda 140 °C olan vulkanizasyon süresi birkaç dakikaya düşebilir.
- Hızlı: 2-Merkaptobenzotiyazol (MBT) ve benzotiyazildisülfid (MBTS).
- Orta hızlı: Difenilguanidin ve heksametilentetramin. Bu hızlandırıcılar daha çok ikincil (yardımcı) hızlandırıcı olarak kullanılmaktadır.
- Yavaş hızlandırıcılar: Sülfenamit grubu hızlandırıcılar. Bunlar gecikmeli olarak etki ederler.

2.2.10. Yükseltgenme Önleyiciler

Yükseltgenme sonucu yaşlanmayı geciktiren kimyasal maddelerdir. Arilaminler, fenoller fenol -fosfinler yükseltgenme önleyici olarak kullanılır.

Özellikle çifte bağ içeren kauçuklarda (NR, IR, SBR, NBR, BR, CR) oksijen polimer zincirlerinin parçalanmasına, çapraz bağlanmanın ağırlık kazanmasına ve dolayısıyla sertliğin artmasına neden olur.

Çifte bağ içermeyen kauçuklar Poliakrilik kauçuk (ACM), Haypalon kauçuk (CSM), Viton kauçuk (FKM), Etilen-propilen kauçuk (EPM), İzopren kauçuk (IR), Silikon kauçuk (Q) yükseltgenmeden çok az etkilenirler.

Yükseltgenme önleyiciler genellikle % 0,5–3, olağandışı durumlarda % 5 phr kullanılır. (phr: Per hundred rubber: 100 birim kauçuk için.). Tüm etkenlere karşı kullanılacak ve leke bırakmayan tek bir koruyucu madde bulunmamaktadır. Etkili koruyucular genellikle daha fazla leke bırakma özelliğine sahiptir.

2.2.11. Ozondan Koruyucular

Havadaki ozon değişiminin çok düşük oranlarda olması bile elastomerde çatlaklar meydana getirebilir, mekanik dayanım değerlerinde düşüşe neden olabilir. Sıcaklık ve nem ozon çatlama hızını kolaylaştırır. Parafin ve mikro-

kristalin vakslar, p-fenilen diaminler en çok kullanılan ozon koruyuculardır. Bunlar, ozon çatlaklarının oluşması için gereken kritik enerjiyi yükselterek çatlak oluşumunu ve oluşan çatlağın ilerleme hızını yavaşlatır.

2.2.12. Şişiriciler (Gözenek Yapıcılar)

Süngerli kauçuklar elde etmek için kullanılırlar, organik ve anorganik türleri vardır. Bu maddeler oda sıcaklığında kararlı, yüksek sıcaklıkta ise gaz (N_2 ve CO_2) çıkaran maddelerdir

Şişiriciler (blowing agent), gözenekli (cellular) lastik üretiminde yaygın olarak kullanılan organik yapıda maddelerdir, Normal sıcaklıklarda stabil olmakla birlikte ısının etkisiyle bozularak gaz çıkışına sebep olurlar. Özellikle azot gazı çıkışıyla birlikte izlenen hacim genişlemesi gözenekli, esnek bir yapıyı ortaya çıkmasını sağlamaktadır.

Organik yapıdaki şişiricilerin ortak özelliği, elastomer yapı içerisinde kolay dağıtılabilmeleri ve homojen gözenekli bir yapının oluşumunu sağlamalarıdır. Organik ve anorganik olmak üzere iki tipte bulunmaktadır.

2.2.13. Reçineler

Bu maddeler lastiğin yapışma özelliğini artırır. Fenolik reçineler, petrol reçineleri çam katranı bu amaçla kullanılan reçinelerden birkaçıdır.

2.2.14. Boyalar

Anorganik ve organik pigmentler olarak ayrılır. Anorganik pigmentler yüksek sıcaklığa dayanıklıdır. Ancak mattır. Organik pigmentlerde dikkat edilecek noktalar; vulkanizasyon sıcaklıklarına ve ışığa direnç, lastik karışımında iyi çözülme ve leke bırakmamalıdır. Plastik malzemelerden farklı olarak, elastomer malzemeler belirli işlevleri bulunan katkı maddeleri ile karıştırılarak kullanılır. Kauçuk hamuru içindeki en temel katkı maddesi vulkanizasyon elemanıdır ve kauçuğu çapraz bağlamak için gereklidir.

Koruyucu maddeler, ozon, oksidasyon, yaşlanma v.b. gibi etkenlere karşı gerek proses esnasında gerekse parçanın kullanımında hamuru korurlar. Dolgu maddeleri, hamur maliyetini düşürürler ve hamuru takviye edici işlevleri vardır. Yumuşatıcılar, hamurun viskozitesini düşürerek esnekliğini arttırırlar. Diğer katkı maddeleri de (şişiriciler, pigmentler, yağlayıcılar v.s.) ihtiyaç olduğunda ilave edilebilirler. Kauçuk hamurunda kullanılan katkı maddelerinin aşağıda belirtilen özelliklere sahip olması istenir [15];

- a. İşlevlerini etkili bir şekilde yerine getirmeli,
- b. Proses şartlarında bozulmamalı,

- c. Kusma ve çiçek açma yapmamalı,
- d. Başka katkı maddelerinin işlevlerine engel olmamalı,
- e. Ucuz olmalı,
- f. Zehirli olmamalı.

2.2.15. Proses Kolaylaştırıcılar

Kauçuğun karışma, yoğrulma ve üretim içinde uygulanan diğer işlemlerdeki davranışını kolaylaştırır. Kauçukların özellikle yüksek akma hızında olanları çıkış durumunda oldukça zor işlenebilen bir yapıya sahiptir. İşlem kolaylaştırıcılar polimeri ve dolgu maddelerini ıslatarak karıştırma sırasında sürtünmelerini azaltır ve mekanik aşınmaları önlemiş olur.

2.2.15.1. Kimyasal Kolaylaştırıcılar

Doğal kauçuk ve yüksek akmaz olan yapay kauçukların işlenmesi zordur. Özellikle doğal kauçuk oldukça karmaşık bir polimer yapısına sahiptir. İşlenebilme kolaylığı, polimerin iyice parçalanabilmesi ve ezilmesi ile mümkündür. Ezilme sırasında serbest kökler (radikal) oluşur. Bu köklerin eski haline dönme isteği yüksek olduğundan ezme işlemi uzun zaman alır. Ezme işlemine kauçuk sanayinde “Mastikasyon” denilmektedir.

Peptitleştirici olarak adlandırılan bazı kimyasal maddeler köklere bağlanarak polimeri yansız (nötral) kılar. Bu şekilde polimerin molekül ağırlığı ve akma hızı düşer. Bu işleme “peptitleştirme” denir. Aromatik merkaptanlar, fenil hidrazin tuzları peptitleştiricilere örnektir.

2.2.15.2. Fiziksel Kolaylaştırıcılar

Bu bağlamda, yumuşatıcılar parçanın mekaniksel özelliklerine önemli ölçüde etki yapar. Özellikle uzama, düşük sıcaklık özellikleri, elektriksel iletkenlik, kullanıldığı sıvılardaki hacimsel değişim üzerinde etkilidirler [19]. Yağlar bu amaçla kullanılır. Kullanılacak yağın seçiminde polimerin yapısı dikkate alınır. Yağ kullanımında dikkat edilecek noktalar:

1-Yağ içerisinde bulunan asitler vulkanizasyonu geciktirdiği için yağlarda serbest asit bulunmasından kaçınılmalıdır.

2-Uçucu yağlar zamanla sertliğe sebep olur.

3-Aşın yağ kullanımı mekaniksel özelliklerin bozulmasına örneğin renk bozulmasına neden olur.

2.2.15.3. *Yumuşatıcılar (Yağlar)*

Doğal veya sentetik kauçuklar ilk hallerinde uzun zincirli molekül yapısında oldukça serttir. Eğer kauçuk bir merdanelen birkaç kez geçirilirse, uzun molekül zincirler bölünerek kısa zincirler haline dönüşürler. Havadaki oksijende bu kopmayı hızlandırır. Bu işlem sırasında karışıma yumuşatıcı veya plastikleştirici denilen maddeler katıldığı takdirde kauçuk yumuşar ve plastikleşir.

Yumuşatıcılar, küçük taneli molekülleri elastomerlerin makro molekülleri arasına nüfuz ederek viskoziteyi düşüren ve böylece hareketliliği arttıran sıvılardır. Karışımdaki plastifiyan oranı arttıkça; karışımın sertliği azalır, viskozite düşer, uzama oranı artar ve kopma ve yırtılma dayanımı azalır. Yumuşatıcılardan ayrıca elastomerle uyuma, düşük uçuculuk, vulkanizasyon sistemi ile karışma yapmama, düşük ayrışma, yani yağ ve yakıt dayanımını arttırma, kirlilik yapmama ve zehirli olmama özellikleri istenir [2, 6, 20].

Yumuşatıcılar aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir;

1. Hayvansal kökenliler: Stearik asit dışında günümüzde kullanılmamaktadır.
2. Bitkisel kökenliler: Palmiye yağı, ayçiçeği yağı, keten yağı, kolza yağı, çam katranı.
3. Kömür katranı türevleri: Özellikle Kumaron reçineleri ve katran.
4. Petrol türevleri: Günümüzde en çok kullanılan yumuşatıcılar. Yapılarında parafinik, naftenik ve aromatik bileşenler vardır. Yapısında en fazla hangi bileşen varsa, örneğin aromatik, yumuşatıcılar aromatik olarak adlandırılır.
5. Sentetik organik bileşikler: Esterler, eterler ve eter-tio-eterler. Bu yumuşatıcılar polar yapıda olduğundan, NBR, CM, CSM gibi polar elastomerlerde kullanılırlar.

2.2.15.4. *Yumuşatıcılarda (Yağ Kullanımında) Dikkat Edilecek Hususlar*

Yağ içerisinde bulunan asitler vulkanizasyonu geciktirdiği için yağda asitlikten kaçınılmalıdır. Uçucu yağlar zamanla üründe sertliğe, aşırı yağ kullanımı ise mekaniksel özelliklerin ve rengin bozulmasına neden olur [21].

2.2.16. **Diğer Kimyasallar**

Vulkanizasyon sistemi ile ilgili maddeler ve dolgu maddeleri ve yumuşatıcıların dışında kalan tüm karışım katkı maddeleri bu başlık altında toplanır.

2.2.17. Mastikasyon ve Mastikleştiriciler

Kauçuğun işlenmesinde, yani kauçuk karışımının hazırlanmasında ham kauçuğun viskozitesi önemli rol oynar, aynı karışımda birden fazla kauçuk çeşidinin kullanılması halinde bu konu daha da önemlidir. Çünkü polimer moleküllerinin homojen dağılımı dolayısıyla iyi bir dispersiyon ancak aynı viskozitedeki kauçukların karıştırılmasıyla mümkün olabilir.

Genellikle sentetik kauçuk tipleri orijinal olarak değişik viskozitelerde üretildiğinden, özellikle NR'da önem kazanmaktadır. Çok fazla olmamak şartıyla viskoziteyi stearik asit, çinko sabunlan veya yağ-alkol-kalıntıları gibi "işlemeye yardımcı maddeler" ile düşürmek mümkündür. Viskoziteyi fazla düşürebilmek için ise mutlaka mastikasyon işlemi yapılmalıdır. Mastikasyon sırasında polimer molekülleri kırılarak daha küçük moleküller haline getirilir. Böylece viskozite düşer. Kırılan moleküllerin uçları aktif olduğu için bunlar derhal birleşirler, bu birleşmeyi havanın oksijeni önler. Mastikasyon işlemi sıcaklığa bağlıdır, artan sıcaklıkla zorlaşır, 120–130 °C'den itibaren moleküllerin mekanik olarak parçalanması mümkün değildir [22]. Ayrıca aktivatör içeren mastikleştiriciler de mevcuttur. Gerek enerji tasarrufu gerekse zaman açısından doğru mastikleştirici seçilmelidir [2, 20].

2.2.18. Koruyucu (Kimyasal) Ajanlar

Koruyucu kimyasallar dış etkenlere karşı kullanılan kimyasal maddeleri kapsamaktadır. Yaşlanmaya karşı dayanıklı elastomeri seçmek her zaman mümkün olmadığı için, kauçuk karışımına koruyucu ajanlar ilave etmek gerekir. Bu koruyucu ajanların görevleri mümkün olduğu kadar uzun süre, kauçuğu özellikleri bozulmadan veya çok az bozulmasına müsaade edecek şekilde korumaktır. Genelde kauçuk karışımlarında 100 birim ağırlık elastomere karşılık 2 birim ağırlık kullanılır [22, 23].

Koruyucu ajanlar kimyasal yapılarına göre sınıflandırılırlar. Amin türevleri, en önemli gruptur. Leke verme, renk bozma özelliğine sahip olmakla beraber, çeşitli yaşlanma etkenlerine karşı çok iyi sonuç verirler. İki gruba ayrılırlar:

Parafenilen diaminler; ozon dâhil farklı etkenlere karşı iyi sonuç verirler [6, 15].

Aminler ve amin türevleri, 90k kuvvetli antioksidanlardır. Isı ve tekrarlanan gerilme etkenlerine karşı iyi sonuç vermelerine rağmen, antiozonan değildirler [20].

Fenol türevleri, Amin türevlerine göre daha zayıf koruyuculardır. Özellikle ozona karşı hiçbir faydası yoktur. Fakat leke verme özelliği olmadığından, açık renkli elastomerlerde kullanılırlar [2].

2.2.19. Organik Dolgu Maddeleri

%50 ile 90 oranında, özellikle %85 oranında stiren ihtiva eden Butadien-Stiren-Kopolimer'leridir. Dolgu maddesi fazla miktarlarda kullanılmadan sert elastomerler elde etmek amacıyla kullanılırlar. Termoplastik oldukları için karışıma iyi işlenebilme özellikleri verirler. Fakat çok miktarda kullanıldığında yüksek erime sıcaklığı nedeniyle problemler çıkabilir. 5 ile 60 phr arasında kullanılırlar.

2.2.20. Fenoplastlar

Fenoplastlar tam kondensasyona uğramamış fenol-formaldehit reçineleri özellikle NBR kauçukta bazı mekaniksel özellikleri iyileştirmek için kullanılırlar. Bunlar vulkanizatın sertliğini, kopma, aşınma ve yırtılma dayanımını arttırlar. Kauçuğun ACN oranı arttıkça, daha fazla etki ederler. Fenoplast oranı arttıkça, uzama ve elastisite azalır, karışımın da plastizitesini arttırıcı etki ederler.

2.2.21. Polivinilklorid (PVC)

NBR kauçuklarında kullanılır, sertleştirir ve aynı zamanda hava şartlarına dayanıklılığı artırır, %50 oranına kadar kullanılabilir, bu oranı geçen durumlarda ise NBR'nin PVC'nin yumuşatıcısı olarak kabul edilmesi gerekir [2, 22].

2.2.22. Diğer Bileşenler

Kauçuk formüllerinde yukarıda anlatılan bileşenler dışında, belli özellikleri iyileştirmek, bazı eksiklikleri gidermek veya fiyatı düşürmek amacıyla ikincil bileşenler kullanılır. Bu bileşenlerden en önemlileri aşağıda belirtilmiştir:

Peptizanlar, yüksek viskoziteye sahip doğal kauçuk, SBR ve bazı klor kauçukların plastifikasyon işlemini kolaylaştıran kimyasallardır. 2-merkaptobenzimidazol, çinko 2-benzamidotiofenat, tetrametiltiuram disülfür en çok kullanılan peptizanlardandır [23].

Oda sıcaklığında kararlı, yüksek sıcaklıklarda gaz çıkaran kimyasallar olan şişiriciler, süngerli kauçuklar elde etmek için kullanılmaktadır. Diazoaminobenzen (DAB), azodikarbonamid (ADC), benzosulfohidrazid (BSH) önemli şişiricilerdendir [6, 24].

Bitkisel yağ kökenli bir kauçuk olan faktis, ekstrüzyon ve kalenderleme hızlarını arttırır, profillerin yüzey kalitesini iyileştirir. Ayrıca ısıya ve ozona karşı koruyucu etkisi vardır. Yüksek oranda 50 birim civarında matbaa merdanesi, silgi gibi yumuşak mamullerde kullanılır, kahverengi ve beyaz faktis tipleri vardır [2].

Boyalar, siyahtan farklı renkte kauçuk ürün elde etmek için açık renk dolgu maddeleri ile kullanılırlar. İnorganik ve organik pigmentler olarak ikiye ayrılırlar. Demir oksitler, sarıdan kırmızı kahveye kadar çeşitli renk ve tonlarda bulunur ve çok kullanılır. Yeşil krom oksit mat, fakat kalıcıdır. Kadmiyum pigmentleri soluk sarıdan mavi kırmızıya kadar değişik tonlarda çok kullanılır [2, 7, 24].

2.3. Koruyucu Maddeler

Elastomerlerin özelliklerinin gerek karışımın hazırlanmasından sonra gerek mamul elde edilmesinden sonra; ısı, ışık, zehirli metaller vb. gibi dış etkenlerden dolayı zaman içerisinde değişikliğe uğramasına, kaybolmasına yaşlanma adı verilir. Bu değişiklikler çatlama, sertleşme, kırılğan hale gelme, yapışkan hele gelme, yumuşama, kabuk bağlama gibi hallerde görülebilir. Elastomer zincirlerinde doymamışlık arttıkça, yaşlanmaya karşı hassasiyet de artar. Zira vulkanizasyon sırasında, az sayıda çift bağlar reaksiyona girmiştir. Çift bağlar, oksijen, ozon ve diğer reaktif maddelere karşı hassastırlar. Ayrıca kükürt ile reaksiyona girerek sertleşmeye neden olurlar [22].

2.4. Kauçuklarda Yaşlanma ve Yaşlanmayı Önleyiciler

Yaşlanma ifadesi ile elastomer malzemenin özelliklerinin herhangi bir kimyasal maddenin tesiri olmaksızın zaman içerisinde değişikliğe uğraması, kaybolması hatta malzemenin tamamıyla bozulması (tahrip olması) anlaşılır. Bu değişiklikler çatlama, sertleşme, kırılğan hale gelme, kabuklaşma gibi hallerde meydana gelebilir. Yaşlanma, yorulmayı da kapsar. Polimerdeki doymamışlık oranı arttıkça, yaşlanmaya karşı duyarlılıkta artar. Çift bağlar oksijen, ozon ve diğer reaktif maddelere karşı hassastırlar, ayrıca kükürt ile reaksiyona devam ederek sertleşmeye sebep olurlar. Yüksek sıcaklıklar, bakır ve mangan bileşikleri gibi bazı oksidasyon katalizatörleri (kauçuk zehirleri) yaşlanmanın çabuklaşmasına neden olurlar. Sentetik kauçuklarda polimerizasyonun devamı veya moleküller arası çapraz bağlanma sertleşmeye ve kırılğanlığa yol açabilir.

Tablo 5. Elastomerlerin bozulmasındaki etkenler [2, 24].

İç Etkenler	Dış Etkenler
Polimer tipi	Oksijen
Vulkanizasyon derecesi ve tipi	Oksidasyon katalizörleri
Hızlandırıcı tipi	Sıcaklık
Karışık katkı maddeleri	Ozon
İşlenme şartları	Yorulma
Stabilizatörler	Işık ve hava şartları

Bir elastomer malzemenin bozulması Tablo 5'te belirtilen etkenlerin kombinasyonu sonucu olur. Dış etkenlerin ilk üçü malzemenin tüm hacmini kapsarken, diğerleri sadece yüzeyde etkili olmakta ve oradan içeriye doğru yayılmaya çalışmaktadır.

2.5. Yaşlanmaya Sebep Olan Dış Etkenler

2.5.1. Oksijen Etkisi (Oksidasyon) ile Yaşlanma

Çeşitli şekillerde oluşan oksijenin malzemeye nüfuz ederek, elastomer zincirlerini parçalaması halidir. Oksijenin tesiri ile aktif radikaller oluşur ve bu radikaller polimer molekülleri ile reaksiyona girerler. Yüksek sıcaklıkta bu işlem daha da hızlıdır. Özellikle dien kauçuklarda çok tesirlidir, bu nedenle koruyucu maddeler bu tip elastomerlerde çok az miktarlarda dahi gayet etkili olurlar.

Yumuşama şeklinde kendini gösteren parçalanmanın yanı sıra, oksijen çapraz bağlanmaya da sebep olabilir, böylece malzeme sertleşir. Bir kısım oksijen de parçalanma veya çapraz bağlanmaya yol açmaksızın, molekül zincirine kimyasal olarak bağlanır, bu durumda yaşlanmaya etkisi olmaz.

NR, IR ve IIR zincirleri başlangıçta parçalanırlar, malzeme yumuşar, yaşlanma arttıkça, çapraz bağlanma ağırlık kazanır, malzeme sertleşir. SBR, NBR, BR, CR ve EPDM gibi elastomerlerde sıkılaşıma reaksiyonu görülür, malzeme sertleşir. Dien grubu ihtiva etmeyen metilen grubu elastomerler (ACM, CSM, FKM, EPM, Q.) oksidasyondan çok az etkilenirler [7, 24].

2.5.2. Isı Etkisi ile Yaşlanma

Isı, oksijenin tesirini artırır, ayrıca ısının etkisi ile oksijensiz ortamda malzemenin özelliklerini değiştiren çeşitli reaksiyonlar meydana gelebilir. Örneğin; çapraz bağların termik olarak parçalanması, moleküllerin kendi

aralarında çapraz bağlanması gibi. Hidrolize olabilen elastomerlerde (AU, EAM, Q) su buharı çok çabuk bir parçalanmaya neden olur [23].

Isıdan kaynaklanan yaşlanma, özellikle kopma uzamasındaki azalma ile kendini belli eder. Doğru vulkanizasyon seçimi ve antioksidan ve IIR, EP gibi ısıya dayanıklı elastomer seçimi ile ısının tesiri azaltılabilir.

2.5.3. Ozan Etkisi ile Yaşlanma

Özellikle gerilme altındaki doymamış elastomerler ozona karşı çok hassastırlar, gerilme doğrultusuna dik yönde ozon çatlakları oluşur. Gerilme olmadığı zaman, bu çatlaklar oluşmaz. Sıcaklık ve nem ozon çatlaklarının oluşumunu hızlandırır. Kauçuk karışımına mum ilavesi, ozona karşı uygulanan en bilinen yöntemdir. Mum yüzeye nüfuz ederek koruyucu film oluşturur. Bu film kırılğan olduğundan, statik uygulamalarda iyi sonuç verirken, dinamik uygulamalarda kolayca çatlamaaktadır [22].

2.5.4. Işık ve Hava Şartları

Güneş ışını, özellikle ultraviyole ışınlar, kauçuk yüzeyinde oksijenin tesirini arttırarak okside bir kauçuk filmi meydana getirir. Bu film gelişigüzel istikametlerde birbirleriyle birleşen çatlaklardan oluşur, bu durum fil derisi oluşumu olarak da isimlendirilir. Özellikle açık renkli kauçuklarda rastlanır, karbon siyahı ultraviyole ışını iyi absorbe ettiğinden bu oluşuma siyah elastomerlerde rastlanmaz.

2.5.5. Yorulma

Tekrarlanan gerilmelere maruz kalan elastomer parçaların dayanımı azalır, kopma dayanımının çok altındaki gerilmelerde kırılma oluşabilir, buna neden yorulma olayıdır. Elastomer parçalar uygulanan mekanik enerjiden kaynaklanan ısınmadan dolayı, hızlı bir şekilde yaşlanmaktadır. Sıcaklık, oksijen veya ozonun varlığı, uygulanan gerilmenin genliği ve frekansı çatlak oluşumunda etkili olmaktadır [7].

Çatlak oluşumu, ozon çatlaklarında olduğu gibi, kuvvet yönüne dik doğrultuda ve gerilmenin maksimum olduğu bölgelerde olmaktadır. Genelde, antiozonanlar yorulma çatlamaına karşı da iyi gelmektedir.

2.5.6. Zehirli Metaller

Kauçukta çözülebilen nikel, bakır, kobalt, mangan ve demir gibi bazı ağır metal bileşikleri oksidasyon katalizörleri olarak etki ederek yaşlanmayı hızlandırır. Bu gibi metaller kauçuk zehirleri olarak da isimlendirilirler. Örneğin SBR için demir çok tehlikelidir. Oksidasyona benzer bir bozulma

olur, fakat proses daha hızlıdır Bakır ve manganez, çok düşük miktarlarda dahi, çiğ veya pişmiş haldeki kauçuğun yaşlanmasını hızlandırır. Kauçuk önce yumuşar, daha sonra da sertleşir. Zehirli metaller eğer kauçukta çözünmemiş durumda ise, etkileri zayıflar [6, 22].

Sonuç

Kauçuk esaslı kompozit türü ürünlerin kullanım yerinin özelliğine göre hazırlanan reçetelere organik veya inorganik birçok katkı ve dolgu malzemeleri ilave edilmektedir.

Dolgu maddeleri daha çok maliyeti düşürmek amacıyla kullanılmaktadır.

Katkı maddeleri ise işlem proseslerinin etkisi ile; iyi elastikiyet, sertlik, yumuşaklık, düşük veya yüksek yoğunluk, yüksek aşınma, kopma ve çekme dayanımı ile yanmaya karşı direnç, gözenek oluşumu vb mamulden istenilen özellikler kazandırmak için kullanılmaktadır.

Kaynaklar

- [1] Egwaikhide, P. A., Akporhoner, E., E., Okieimen, F., E., (2007), Effect of Cocount Fibre Filler on the Cure Characteristics Hysico-Mechanical and Selling Properties of Natural Rubber Vulcanisates., International Journal of Physical Sciences Vol. 2, February,
- [2] Babbit, O.R., (1978), The Vanderbilt Rubber Handbook, Vnaderbilt Company Inc. 30 Wifield Street, Norwalk, C. T., USA,
- [3] Hertz, D., L., Farnella, A., C., (1998), Shore A Durometer and Engineering Properties, New York Rubber Group, September,
- [4] Akcakale N., (2008), NR/SBR Tipi Elastomer Esaslı Ayakkabı Taban Malzemelerinin Mekaniksel Özelliklerine Bazı Dolgu Maddelerinin Etkilerinin İncelenmesi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Sakarya
- [5] Akcakale N., (2017), Effect of Carburized Rice Husk Powders on Physical Properties of Elastomer based Materials, International Technical Journal for Polymer Materials, Sayı 4093, Sayfa 49-54, Germany
- [6] Savran, Ö., H., (2001), Elastomer Teknolojisi 1, Kauçuk Derneği Yayınları, İstanbul,
- [7] Savran, Ö., H., (2002), Elastomer Teknolojisi 2, Temel Elastomerler, Kauçuk Derneği Yayınları, İstanbul,
- [8] Sumaila, M., Ugheoke, B., I., Timon, L., Oloyede T., A, (2001), Preliminary Mechanical Characterization of Polyuretane Filled with Lignocellulosic Materials, Federal University of Technology, Yola, Nigeria,
- [9] Semaan, M. E., Quarles, C. A. Ve Nikiel, Leszek, (2001), “Carbon Black and Silica as Reinforcers of Rubber Polymers: Doppler Broadening Spectroscopy Results”, Polymer Degradation and Stability, 75:259-266.
- [10] Öztürk, E., (2008), Farklı Kauçuk Karışımlarının Vulkanizasyonuna Hızlandırıcıların Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [11] Soyubol, B., (2006), Elastomerlerin Statik ve Dinamik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [12] Encyclopedia of Polymer Science and Engineering, a Willey Interscience Publication, Volume 16, USA., 1989
- [13] DPT, (2001 a), Kauçuk Ürünleri Sanayii Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Devlet Planlama Teşkilatı.
- [14] Akcakale N., (2016), Ayakkabı Tabanlarında Kauçuk Kullanımı, Technological Applied Sciences, Cilt 11, Sayı 3, Sayfalar 86-97
- [15] Akçakale N., Bülbül Ş., (2017), The Effect of Mica Powder and Wollastonite Fillings on the Mechanical Properties of NR/SBR Type Elasto-

- mer Compounds, Journal of Rubber Research, Cilt, 20, Sayı 3, Sayfalar 157-167
- [16] Bülbül Ş., (2014), The Effect of Various Inorganic and Organic Fillers on the Mechanical Properties of NR-SBR Type Elastomer Materials, Karabuk University, Graduate School of Natural and Applied Sciences Department of Manufacturing Engineering, Doktora tezi.
- [17] Sanches, E.V., Gomez, J. L., Pradas, M. M., (2000), Morphology and Thermomechanical Properties of Blends of Styrene-Butadiene-Styrene Triblock Copolymer with Polystyrene and Syndiotactic Polybutadiene Homopolymers, European Polymer Journal, 36,
- [18] Ertem, B., Şen, C., (1984), Lastik Malzemeler Üzerinde Yapılan Testler, Otomarsan, İstanbul,
- [19] Kızıtaş, Ü., (1999), Lastik Üretiminde Katkı Elemanlarının Özelliklere Etkisi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul,
- [20] Mevlat, A., (2000), Hybrid Reinforcement Systems in Natural Rubber Composites, Boğaziçi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul,
- [21] Süpürenel, S., (1996), Kauçuk Katkı Maddelerinin ve Kükürtlü Vulkanizasyon Sistemlerinin Ürün Özelliklerine Etkilerinin İncelenmesi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir,
- [22] Şahin, Y., M., (2001), Scrap Rubber Recycling in Nitrile Rubber Composites, Boğaziçi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul,
- [23] Doğan, Y., (1996), Polibütadien ve Poliizopren Elastomerlerin Statik ve Dinamik Özellikleri, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul,
- [24] Kauçuk ve Elastomer Teknolojisi, (1998), Kauçuk Derneği Seminer Notları, İstanbul Kauçuk Derneği, İstanbul,

Seramik Esaslı Kompozitlerin Flaş Sinterleme Tekniğiyle Üretimi

Hülya Biçer¹

Özet

Bir kompozit malzeme, bir matris içinde dolgu maddeleri ve güçlendiricilerin, kullanım alanına uygun özelliklerce belirlenmiş bir düzen içerisinde dağılımından oluşur. Genel olarak birbirlerinden fiziksel ve/veya kimyasal özellikler bakımından farklılık gösteren iki veya daha fazla fazdan üretilirler ve bu nedenle seçilen üretim yönteminin ana matris malzemenin yanı sıra içerdiği diğer faz gruplarına uygunluğuna da dikkat edilmelidir. Sinterleme temel olarak, toz halindeki malzemelerin ısı altında yoğunlaştırılması olayıdır. Sinterleme esnasında farklı difüzyon mekanizmaları bulunmaktadır. Salt ısıya dayalı teknikler, birçok malzeme grubu için nispeten yüksek sıcaklık ve uzun süreler gerektirdiğinden malzemede tane büyümesine yol açar ve dolayısı ile fiziksel özelliklerine zarar verir. Bu motivasyonla, basınç ve elektrik alan destekli sinterleme teknikleri de yoğun olarak araştırılmaktadır. Flaş sinterleme bir elektrik alan destekli sinterleme yöntemidir. Bu teknikte elektrik alan doğrudan malzemeye uygulanmaktadır ve sinterleme sıcaklığı ve süresinde dikkate değer düşüşler gözlenir. Birçok farklı sistemde denenmiş olmasına rağmen kompozit malzemelerde kullanımı esas olarak düşük elektrik iletkenliğine sahip malzemelere iletkenliği artırıcı katkıların eklenmesi ile başlamıştır ve sonrasında çalışmalar yaygınlaşmıştır. Bu bölümde öncelikle flaş sinterleme açıklanmış ve sonrasında literatürde bulunan kompozit malzemelerin flaş sinterleme ile üretimi çalışmaları derlenmiştir. Bu bölümün özellikle kompozit malzemelerin yoğunlaştırılması üzerine çalışmalar yapan ve elektrik alan destekli sinterlemeye ilgi duyan araştırmacılar için önemli bir kaynak olacağı düşünülmektedir.

1. Sinterleme

Kompozit malzemelerin üretiminde birbirinden farklı yöntemler kullanılmaktadır. Uygun başlangıç malzemelerinin kullanımı ile istenen

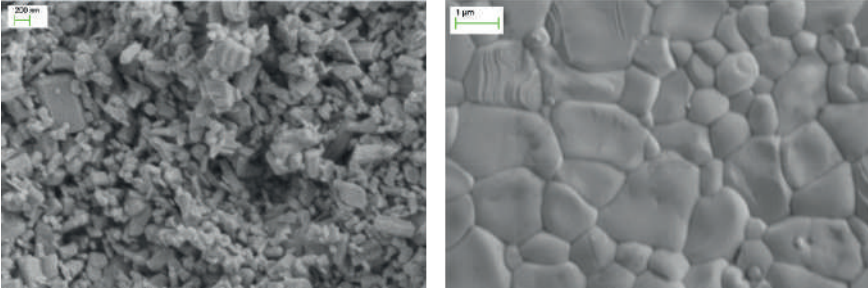
1 Dr. Öğretim Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, hulya.bicer@dpu.edu.tr , 0000-0001-6633-7085

şekil ve mikro yapıya sahip katı bir malzeme üretiminin hedeflendiği bu yöntemler farklı sınıflandırmalara ayrılabilir. Bu sınıflandırmalar genellikle başlangıç malzemelerin fiziksel durumuna (katı, sıvı, gaz) göre değerlendirilir. Başlangıç tozlarından (katı) üretim yöntemlerinden biri olan sinterleme işlemi sıkıştırılmış toz partiküllerinin, ısı altında genel tabiriyle bir araya gelerek hedeflenen katı geometriyi oluşturmasıdır. Şekil 1'de sinterleme için iş akışı verilmiştir. Sinterleme işlemi için tozlar belirlenen oranlarda karıştırılır. Karıştırma işleminde farklı değirmen çeşitleri kullanılabilirdiği gibi tozlar ağız havanda el ile de karıştırılabilir. Sonrasında presleme ile tozlar ön şekillendirilir. Bu aşama, bazı sinterleme yöntemlerinde (sıcak press, spark plazma sinterleme, vb) uygulanmaz çünkü sistemlerin kendi kalıpları mevcuttur. Presleme aşamasında tozların sıkı paketlenmesi için bağlayıcılar (polivinil alkol gibi) kullanılabilir. Bağlayıcı kullanılmış ise bu bağlayıcı ön ısıtma ile giderilmelidir. Son olarak ön şekillendirilmiş numune uygun ısıtma hızlarında, sinterleme sıcaklıklarında ve sürelerinde ısı işlemine tabi tutulur. Oksitlenmeye dayanımı düşük numuneler için bu ısı işlemi vakum ortamında veya inert gaz akışında gerçekleştirilir [1,2].

Sinterleme için itici kuvvet, i) yüzey eğriliği, ii) dışa doğru basınç ve iii) kimyasal bileşimdeki gradyanlardan kaynaklanır. Geniş yüzey alanına sahip küçük toz partikülleri, sonunda tane sınırlarının oluşumuna yol açan şekillendirme bağlantı noktalarını (boyun oluşumu) destekler. Farklı kütle difüzyon mekanizmaları ile yoğunlaşma devam eder ve sinterlemeye, yoğunlaşma tamamlanana kadar mikroyapıdaki sürekli değişim eşlik eder [1-3]. Şekil 2'de ZnO numunesine ait başlangıç toz formunun morfolojisi ile ısı işlemi sonrasında (flaş sinterleme) disk şeklinde yoğunlaştırılmış halinin mikroyapısının taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüleri verilmiştir. Numuneden tam yoğunluğa yakın bir yoğunluk elde edildiği için mikroyapıda da görüldüğü gibi porozite düşüktür. Uygulama alanlarına yönelik birçok özellik (mekanik, elektriksel, vb) numunenin yoğunlaştırılmış formunun mikroyapısına bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle uygun yöntemin ve parametrelerin seçimi büyük önem taşımaktadır.



Şekil 1. Sinterleme yöntemi ile polikristalin kompozitlerin üretimi



Şekil 2. ZnO numunesine ait flaş sinterleme öncesi toz morfoloji (sol) ve sinterleme sonrasındaki yoğun numuneden alınan mikroyapı (sağ) SEM görüntüleri

2. Sıcak Pres ve Elektrik Alan Destekli Sinterleme

Kalıp geometrisi sınırlandırmalarından ve buna bağlı olarak sinterleme sonrası işlemeden kaçınmak için basınçsız sinterleme her zaman avantajlıdır. Fakat, yüksek yoğunluklar elde etmek için numunelerin erime noktasına yaklaşan sıcaklıklar ve ince toz morfolojisi gerekmektedir, ancak çoğu durumda uzun süreli sinterleme sürelerine bağlı olarak tane büyümesi kaçınılmazdır. Bu sebeple alternatif sinterleme metotları üzerine gidilmiştir [4].

Endüstride kullanılan yöntemlerden biri sıcak prestir. Bu işlemde kalıp düzeneği yüksek sıcaklık fırınındadır ve numune, sinterleme sıcaklığına ısıtılırken statik bir yükte tek eksenli olarak preslenir. Sıcak presleme, sinterleme

sıcaklığını düşürür ve sonuç olarak tane büyümesini nispeten bastırır. Öte yandan sıcak preslemede kullanılan kalıplar pahalıdır ve kullanım ömürleri uzun değildir. Ayrıca sıcak presleme, basit şekilli bileşenlerin oluşturulmasıyla sınırlıdır; silindirler ve bloklar gibi. Daha karmaşık şekilli bileşenler, yüksek maliyetli özel kalıplar gerektirir [5].

Bir diğer alternatif metot ise elektrik alan destekli sinterleme yöntemidir. Elektrik akımı, kütle difüzyonunu arttırmak, sinterleme sıcaklığını ve süresini düşürmek ve dolayısı ile tane büyümesinin önüne geçmek için kullanılır. En bilinen elektrik alan destekli sinterleme yöntemi spark plazma sinterleme (SPS) yöntemidir. SPS ve sıcak presleme arasındaki en büyük farklar ısıtma hızı ve ısı transferidir. SPS yönteminde tek eksenli yük ve akım, grafitten yapılmış pistonlar tarafından uygulanır. Düşük voltaj (maksimum 10-15 V), çok yüksek akım (1000 A ila 10.000 A) kullanılır, bu da yoğunlaştırma için gerekli termal aktivasyonu sağlayan Joule ısıtmaya yol açar. Uygulanan basınç tipik olarak 30-200 MPa arasında değişir. Elektrik akımının uygulanması, bilinen sinterleme mekanizmalarını geliştirir çünkü elektrik akımı, parçacık temas noktalarında bir kıvılcım deşarjı oluşturarak parçacık yüzeylerinde aşırı bölgesel ısınmaya neden olur. SPS yüksek yatırım maliyeti gerektiren bir yöntemdir. Ayrıca sıcak presde bahsedilen kalıp maliyeti SPS'de de geçerlidir [6]. Elektrik alan destekli sinterleme yöntemlerinden bir diğeri flaş sinterleme yöntemidir. Bundan sonraki başlıklarda flaş sinterleme yöntemi ve flaş sinterlemenin kompozit malzeme üretiminde kullanımı ile ilgili detaylı araştırmalara yer verilmiştir.

3. Flaş Sinterleme

Seramikleri yoğunlaştırma, basınç desteği içermeyen salt sıcaklığa dayanan proseslerle oldukça zordur ve yüksek sıcaklıklar ile uzun sinterleme sürelerini (saatler) gerekli kılmaktadır. Raj ve Conrad tarafından 3% itriyum stabilize zirkonya (YSZ) ile yapılan ilk çalışmalar sırasında uygulanan düşük miktardaki (20 V/cm) elektrik alanı sinterleme sıcaklığında ve süresinde düşüş göstermiştir, ayrıca arttırılmış sinterleme hızı tane büyümesini sınırlamıştır [7]. Bu çalışmalar doğrultusunda, yakın zamanda Raj ve Conrad tarafından keşfedilen flaş sinterleme ile uygulanan yeterli büyüklükteki elektrik alanının numune üzerine doğrudan uygulanması sinterleme sıcaklığını birkaç yüz derece aşağıya ve sinterleme süresini saatler süren bir işlemde saniyelere düşürmüştür. Uygulanan elektrik alanı arttıkça %3 YSZ için sinterleme sıcaklığı 1500°C'lerden 850-900°C aralığına kadar düşmüştür. Bu proseste iki farklı davranış gözlenmektedir; ilk kısım düşük elektriksel alan uygulanan kısımdır ki sinterleme aşamalı olarak gerçekleşir (bu kısım elektrik alan destekli sinterleme olarak adlandırılır FAST), ikinci kısımda ise daha yüksek

elektrik alanı uygulanmaktadır ve sinterleme saniyeler içinde ani bir şekilde gerçekleşir, bu kısım da yukarıda tarif edilen flaş sinterlemeyi ifade etmektedir [8]. Method özetle numuneyi ısıtırken, doğru akım (DC) elektrik alanının iki adet elektrot vasıtasıyla seramik malzemeden geçirilmesi işlemine dayanır. Flaş sinterleme iyonik iletkenler, yarı iletkenler ve elektronik iletkenleri içeren geniş bir malzeme çeşitliliği üzerinde denenmiştir. Flaş sinterleme örnekleri bizlerle paylaşılan malzemelerden birkaçı; 3% ve 8% YSZ [8,9], MgO katkılı Alümina [10], Co_2MnO_4 [11], SrTiO_3 [12], BaTiO_3 [13], SiC dir [14]. Yüksek ergime sıcaklığına sahip bir kovalent yapı olan SiC ile yapılan çalışmada ağırlık %10 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3$ (1:1mol) katkısı SiC içerisine ilave edilmiş ve 100 V/cm elektrik alan uygulanmış, sonuç olarak 1170°C'de %88'lik yoğunluğa ulaşılmıştır [14]. Flaş sinterleme yöntemi ekonomik bir yöntemdir, sinterleme sıcaklığı ve sinterleme süresinde uygulanan elektrik alanının meydana getirdiği düşüş diğer sinterleme yöntemlerine kıyasla enerji tasarrufu sağlamaktadır.

Flaş sinterleme üzerine konuşulduğunda ilk olarak SPS ile karşılaştırma yapılmaktadır. Spark plazma sinterlemede sinterleme için itici gücün büyük kısmı, çok yüksek elektrik akımının iletken sistemden geçerek yarattığı Joule ısınmasıdır. Flaş sinterlemede ise elektriksel alan numuneye bağlanmış elektrotlar vasıtası ile doğrudan seramik malzemenin içinden geçer. Hem flaş sinterleme hem de SPS elektrik alan destekli sinterleme yöntemidir, fakat aralarında çok önemli bir fark vardır. Spark plazma sinterlemede kullanılan düşük voltajlara (birkaç volt) karşın, sistemden geçen elektrik akım yoğunluğu oldukça yüksektir (kiloamper), flaş sinterleme de ise kullanılan elektriksel alan ve akım değerleri SPS te kullanılanlardan çok daha düşüktür (volt-miliAmper) [6].

Flaş sinterleme sürecindeki kütle taşınım hızının artışıdaki mekanizma henüz aydınlatılabilmemiş değildir. Bazı araştırmacılar sinterleme mekanizmasını, taneler arası bölgesel Joule ısınmasına bağlamaktadır. Yaptığı çalışma ve hesaplamalarla Raj göstermiştir ki elektrik akımı geçişi sırasında seramik malzeme tarafından emilen güç nedeniyle yükselen sıcaklık miktarı malzemenin sinterlenmesi için yeterli değildir; uygulanan elektrik alandan kaynaklı Joule ısınması Stefan Boltzmann kanununa uymaktadır;

$$\frac{\Delta T}{T_0} = \frac{\Delta W}{4A\sigma T_0^4} \quad (3.1)$$

T_0 elektrik alan olmadan numune sıcaklığı, ΔW elektriksel enerji (Watt), A numune yüzey alanı, and σ ise sabittir. Bu denkleme göre Raj'ın deneysel çalışmalarından çıkan sonuç $\Delta T = 0.01T_0$ dır. Yani, akım kaynaklı sadece

1% sıcaklık artışı beklenmektedir ki bu sinterleme için yeterli olmayacaktır [15-18].

Akdoğan ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmalarda flaş sinterlemenin enerji dağılımlı x-ray kırınımı (EDXRD) ile yerinde karakterizasyonu yapılmıştır. %8YSZ iyonik seramiklerle yapılan çalışmalarda, sinterlenmenin vuku bulduğu geçici süreçte (güç emiliminin maksimum olduğu süreç) eş zamanlı olarak birim hücrenin ani bir şekilde genişlemesinin arttığı ve durağan sürece geçildiğinde (sabit akım-voltaj) birim hücre hacminin normal/eski boyutuna geçtiği gözlenmiştir. Tekrar Joule ısınmasına dönecek olursak rapor edilen %2.35'lik birim hücre hacim artışı için normal şartlarda olması gereken sıcaklık artışı termal genişleme katsayısı ile hesaplanmıştır ve deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında aradaki yüksek fark göstermiştir ki, flaş sinterleme (veya anormal birim hücre hacim artışı) sadece Joule ısınmaya dayandırılmaz [19]. Ayrıca, sinterleme mekanizması olarak, numuneden geçen elektrik akımının malzeme içerisindeki Frenkel noktasal kusurlarının yoğunluğunda meydana getirdiği değişimler önerilmiştir. Özellikle iyonik iletken seramikleri için konuşmak gerekirse, oksijen boşluklarının tane sınırlarına hareketi ile difüzyon süreci değişir. Yapılan EDXRD yerinde flaş sinterleme çalışmalarındaki veriler ile, 8%YSZ iyonik seramiğinin elektrik alan altındaki davranışı gözlemlendiğinde yarı doruk genişliğinin (FWHM) absorbe edilen güç miktarındaki ani artışla eş zamanlı olarak değişim gösterdiği gözlenmiştir ve bu sonuçlar sinterleme mekanizmasının noktasal kusurlarla bağlantısını desteklemektedir [20,21].

Seramik malzemelerle yapılan sinterleme çalışmaları sırasında, bazı malzemelerin uygulanan elektrik alan altında faz değişimine uğradıkları görülmüştür. Yapılan yerinde xrd çalışmalarında malzemenin absorbe ettiği elektriksel güçteki ani yükseliş, faz değişimi ile eş zamanlı meydana gelmektedir. Ozdemir, ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalarda TiB_2 seramik malzemenin birkaç saniye içinde hızla elektrik akım geçişi TiB_2 ve TiO_2 arasında reaksiyonu başlatmış, ve sonuç olarak $TiBO_3$ fazının ortaya çıkmasına sebebiyet vermiştir [16].

3.1. Kompozitlerin flaş sinterleme ile üretimi

Flaş sinterleme çalışmaları daha önce de değinildiği gibi birçok farklı malzeme grubunda denemiş ve başarılı sonuçlar alınmıştır. Bu çalışmalar arasında sinterleme katkısı kullanılarak yapılan çalışmalar da yaygındır. Kompozit malzemelerin üretimi ile ilgili çalışmalar ise nispeten daha yeni ve kısıtlı sayıdadır. Flaş sinterleme çalışmalarının birçoğu zirkonya ile yapılmıştır ve kompozit çalışmaları da bu malzeme grubunda daha da yoğunlaşmıştır. Fakat farklı oksit ve oksit dışı yapılar ile de çalışmalar mevcuttur.

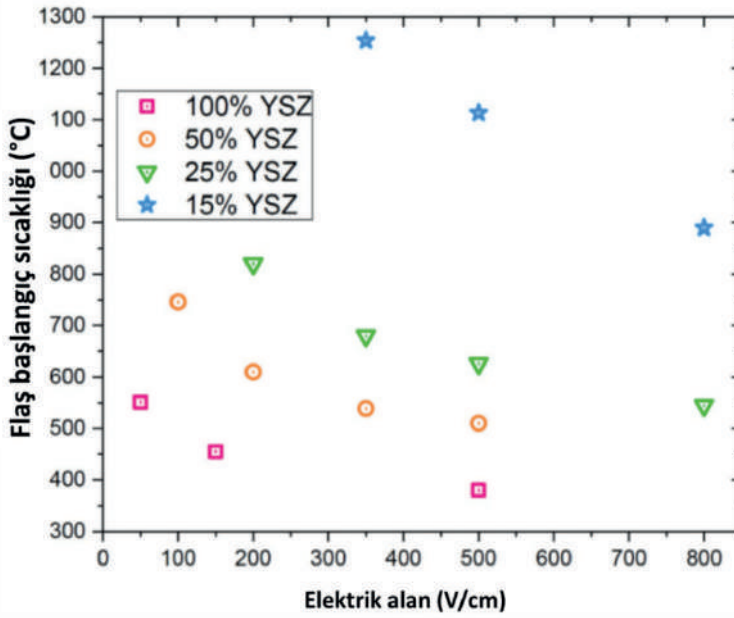
3.1.1. Zirkonya esaslı kompozit yapıların flaş sinterlenmesi

Flaş sinterleme elektrik akımının rol aldığı bir proses olduğundan elektrik alanı, elektrik akımı ve sinterleme sıcaklığı büyük ölçüde numunenin elektriksel davranışına bağlıdır. Bu durum da farklı elektriksel özelliklere sahip bileşenler içeren kompozitlerin üretimi için ilgiyi arttırmıştır. Al_2O_3 - ZrO_2 (veya YSZ) kompozitleri ile ilgili çalışmalar yüksek kırılma toklukları nedeniyle ilgi çekmektedir. Alüminanın zirkonyaya eklenmesi tane sınırı iletkenliğini artırarak tane büyümesinin önüne geçmektedir. Naik ve ark. tarafından bu kompozit malzemeyi iki elektrotlu sistemde DC elektrik alan altında yoğunlaştırma çalışmaları geleneksel sinterleme ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Çok yüksek ($1000 V cm^{-1}$ 'e kadar) elektrik alanlarda bile flaş sinterlemeye direnç gösteren saf alümina, itriya ile stabilize edilmiş zirkonya ile hacimce %50/50 iki fazlı bir karışımda birleştirildiğinde düşük elektrik alanlarda flaş sinterleme ile yoğunlaştırılabilmiştir. Tek fazlı 3YSZ 750 °C'de (fırın sıcaklığı) sinterlenirken, iki fazlı %50 hac. 3YSZ- Al_2O_3 seramiği 1060 °C'de $150 V cm^{-1}$ elektrik alanda neredeyse tam yoğunluğa ulaşmıştır. Geleneksel sinterlemede tane boyutunun sıcaklık ile arttığı gözlemlenirken, flaş sinterlemede uygulanan elektrik alanı arttıkça tane boyutu küçüldüğü görülmüştür. Aynı grubun bir diğer çalışmalarında düşük ve yüksek elektrik alan uygulamanın mikroyapıya etkileri incelenmiştir. Düşük elektrik alan uygulamalarında sinterleme hızı kademeli artarken (FAST), yüksek elektrik alan uygulanınca sinterleme ani (flaş) gerçekleşmiştir. Kompozit malzeme ise FAST modunu flaş sinterlemenin takip ettiği hibrit bir proses göstermiştir. Bu da daha yüksek tane büyümesine sebep olmuştur [22,23]. Bir diğer karşılaştırmalı (Ojaimi ve ark.) çalışmada hacmen %25 Al_2O_3 katkılı ZrO_2/Al_2O_3 kompozitler farklı elektrik alanlarında incelenmiştir. Flaş sinterlemede kullanılan sinterleme sıcaklığı ve süresi geleneksel yöntemle (1550°C) kıyasla düşmüştür. Numuneler genel olarak yüksek yoğunluklar gösterse de bazı bölgelerde erimeler ve yoğunluklarda homojensizlikler gözlenmiştir [24]. Yao ve ark. ötektik molar oranlı Al_2O_3 - ZrO_2 seramiklerini flaş sinterleme ile 1200 °C'de 2 dakikada hazırlamışlardır. Mikroskobik incelemede yapının iki bölgeye ayrıldığı gözlenmiştir; çok fazlı bölge ve ötektik bölge. Ötektik bölgede Al_2O_3 matrisine ZrO_2 fazının dağılımı görülmüştür. ZrO_2 ince katmalı çubuk benzeri bir morfoloji göstermiştir [25].

Literatürde inkübasyon süresi basitçe açıklamak gerekirse flaş sinterlemenin başlangıcı olarak kabul edilir. Bu süre uygulanan elektrik alan büyüklüğüne, fırın sıcaklığına ve malzemenin elektriksel davranışına göre değişiklik göstermektedir. Bichaud ve ark.'nın yaptığı çalışmada inkübasyon sürecini Al_2O_3 - ZrO_2 kompozitleri için incelemişlerdir. Uygulanan izotermal deneylerde tetragonal zirkonya ve alumina bileşimlerinde hacimce %0, 20,

40 ve 60 Al₂O₃ kullanılmıştır. Elektrik alan sabit tutulduğunda inkübasyon süreci numunenin iletkenliğine bağlı değişmiştir ve inkübasyon süresi t, alümina içeriği ile önemli ölçüde artmıştır. Şekil 3'de farklı katkı oranlarının flaş sıcaklığına etkisi verilmiştir [26,27].

Yukarıda özetlenen tüm çalışmalar DC alan altına uygulanmıştır. Al₂O₃-ZrO₂ kompozitin alternatif akım (AC) elektrik alan flaş sinterleme davranışı 800°C fırın sıcaklığında incelenmiştir. Yoğun numuneler 120 s içerisinde AC ile 60mAmm⁻² altında üretilmiştir. AC ile elde edilen numunelerin tane boyutu DC ile elde edilenlerden daha büyük olduğu saptanmıştır. AC ile üretilen numunelerin mikroyapısının daha homojen bir dağılım gösterdiği de raporlanmıştır [28].



Şekil 3. Elektrik alanın ve kompozit bileşiminin bir fonksiyonu olarak inkübasyon başlangıç fırın sıcaklığı (sabit ısıtma hızı ve sabit akım limiti) [27] (Creative Common CC BY).

α -Al₂O₃, MgAl₂O₄ spinel ve kübik %8 mol Y₂O₃ ile stabilize edilmiş ZrO₂'nin (8YSZ) eşit hacim fraksiyonlarından oluşan üçlü kompozitler de flaş sinterleme yolu ile üretilmiştir. 50-500 V/cm elektrik alan altında yapılan izotermal çalışmalarda flaş sinterleme 100 V/cm uygulandığında 1350°C'de gerçekleşmişken, 500 V/cm'de sıcaklık 1150°C'ye düşmüştür. Sinterleme sıcaklığının ve süresinin düşmesi ile tane büyümesi de engellenmiştir.

Alümina, spinel faz ile reaksiyona girerek yüksek alümina spinel katı çözeltisi oluşturmuştur [29]. Bir diğer çalışmada, Al_2O_3 , MgO ve 8YSZ içeren üç fazlı başlangıç malzemeleri ile reaktif flaş sinterleme çalışması yapılmıştır. 500 V/cm elektrik alan ile izotermal olarak yürütülen çalışmada akım limiti 60 mA/mm² olarak belirlenmiştir. Flaş davranışı için gereken minimum 8YSZ hacim yüzdesi iyi dağılmış toz için %30 ve topaklanmış toz için %20 olarak belirlenen çalışmada artan zirkonya miktarı ile flaş başlangıç sıcaklığının da düştüğü gözlenmiştir. 8YSZ oranı %30'dan %50'ye arttırıldığında sıcaklık 1014°C'den 817°C'ye düşmüştür. Reaktif flaş sinterleme sonrasında MgAl₂O₄-8YSZ kompozit malzeme elde edilmiştir. Mikroyapı ve faz dönüşümlerinin başlangıç malzemelerinin homojen karışımı ile doğrudan ilişkili olduğu belirtilmiş bunun sebebinin de yığılmış zirkonya partiküllerinin ısı dağılımına etkisi olarak açıklanmıştır [30]. Nikel oksit ve %8 mol. itriya ile stabilize edilmiş zirkonya (tipik olarak ağırlıkça %30-60 NiO) kompozitleri katı oksit yakıt hücrelerinde (SOFC) anot malzemeleri olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Geleneksel yöntemler ile 1400-1450 °C aralığında yoğunlaştırılan bu kompozitler flaş sinterleme ile nispeten yüksek yoğunluklara 820-945°C aralığında çıkarılmışlardır. Kompozisyonun flaş parametrelerinde farklılık oluşturacağının belirtildiği çalışmada ayrıca indirgeyici atmosferin de flaş başlangıç sıcaklığını düşürdüğü gözlenmiştir (metalik faz dönüşümü NiO-Ni) [31]. ZrO₂-karbon kompozitleri de flaş sinterleme ile çalışılmıştır. İndirgenmiş grafen oksit (rGO) ve 3YSZ kompoziti oluşturma amacı ile oda sıcaklığında 60 V/cm alan altında 20 sn flaş sinterlenmesi sonucunda %99,8 relatif yoğunluk elde edildiği raporlanmıştır. Mikroyapı incelemesi sonucunda 3YSZ matris içerisinde rGO dağılımının homojenliğinin elektriksel ve mekanik özelliklere olumlu sonuçları gözlenmiştir [32]. Diğer bir çalışmada 3YSZ/karbon nanotüp (CNT) kompoziti 25 V/cm elektrik alanı altında 100-300 mA/mm² akım yoğunluğu limitinde flaş sinterleme ile yoğunlaştırılmıştır. İzotermal sinterleme 700°C'de gerçekleşmiştir. CNT matris içerisinde homojen dağılım göstermiş ve akım yoğunluğu arttırıldıkça daha küçük tane boyutu gözlenmiştir. Akım yoğunluğunun değişimi kompozit malzemenin iyonik yoğunluğuna da etki etmiş ve yüksek akım yoğunluğu ile artış göstermiştir [33]. Silisyum karbür (SiC) viskerlar seramikleri güçlendirmek için seramik kompozitlerde yaygın olarak kullanılmaktadır, fakat hacimsel küçülme göstermedikleri için kompozitlerin yoğunlaştırılmasına engel gerilmelere yol açtığı gözlenmektedir. Farklı yöntemler ile çalışmalar literatürde mevcuttur. Flaş sinterleme çalışmasında karıştırılan malzemeler ön sinterleme (800°C) işlemine tabi tutulmuştur. Ayrıca karşılaştırma amacı ile numuneler 1400°C'de 2 saat geleneksel yöntem ile de sinterlenmiştir. Farklı elektrik

alanlarında yapılan çalışmalar sonucunda 100 V/cm alan ve 80 mA/mm² akım yoğunluğunda 1000°C'de tam yoğunluğa ulaşılmış ve SiC viskerlar ile ZrO₂ matrisi arasında iyi bir bağlanma arayüzeyi olduğu raporlanmıştır [34]. Hidroksiapatit (HAP) yüksek biyoaktiviteye sahip bir malzeme olmasına karşın yapay kemik üretimi için kullanımı, düşük dayanımı ve kırılma tokluğu nedeniyle zorlaşmaktadır. İkinci fazların yapıya eklenmesi ile malzemenin dayanımının artırılması planlanmaktadır. Bu motivasyonla, HAP-3YSZ (hacim.%50) kompozitleri 1050°C de 250 V/cm ve 30 mAmm⁻² koşullarında flaş sinterlenerek %99,6 relatif yoğunluğa çıkarılmıştır. Akım yoğunluğunun artırılmasının HAP'ın bozunmasına neden olduğu da ayrıca raporlanmıştır [35].

3.1.2. Diğer yapılar ile çalışmalar

Al₂O₃'ün düşük iletkenliği nedeniyle Al₂O₃/rGO kompozitleri 250-400 V/cm alanlarda flaş sinterleme ile yoğunlaştırılmışlardır. rGO yapıya elektrik alan iletimini tetiklemek amacı ile katılmıştır. Akım yoğunluğu arttırıldıkça numune yoğunlukları arttırılmıştır fakat belirli bir sınır akım limiti (33,33 Acm²) üzerinde numunede kırılma gözlenmiştir. 800°C 300 V/cm elektrik alanı ile tam yoğunluğa yaklaşılmıştır [36]. 500 V/cm elektrik alan altında 900°C de Al₂O₃ ve TiO₂ flaş sinterleme deneylerinde yoğunlaşmanın yanı sıra faz dönüşümleri de yerinde XRD çalışması ile gözlenmiştir. Al₂O₃·TiO₂ bileşimine sahip bir spinel yapı olan alüminyum-titanat oluşumu flaş sinterleme ile hızlandırılmıştır [37]. Ötektik bileşime sahip Al₂O₃-Y₃Al₅O₁₂ (YAG) kompozitleri de reaktif flaş sinterleme ile üretilmiştir. 550 V/cm elektrik alan altında 1250°C'de Al₂O₃ ve Y₂O₃ arasındaki reaksiyon oluşmuştur [38]. 8YSZ, MgO, ve Al₂O₃ fazları ile yapılan flaş sinterlemede tek fazlı spinel yapı (MgAl₂O₄) proses sürecinde MgO ve Al₂O₃ reaksiyonu ile oluşmuştur, 8YSZ ise yapıya flaş sinterleme için gerekli elektriksel iletkenliği sağlamıştır. Çalışma sonucunda geleneksel yöntemle kıyasla daha küçük tane boyutu elde edilmiştir [39].

%10 CN içeren (CeO₂)_{0,8}(Sm₂O₃)_{0,2} (SDC) -CN kompozitleri alternatif akım altında flaş sinterlenmiştir. 1A akım limitinde 850°C'de kompozit malzemede %20.2 büzülme meydana gelmiştir [40]. NiO- Ce_{0,9}Gd_{0,1}O_{1,95} (GDC) kompozitleri katı oksit yakıt hücrelerinde anot malzemesi olarak kullanım potansiyeline sahip olduğu düşünülmektedir. Bir diğer çalışmada ağırlıkça %50 NiO içerikli GDC 50 V/cm elektrik alan ile 260 mA/mm² akım limitinde 200°C yüksek yoğunluğa flaş sinterleme ile getirilmiştir. Yüksek akım yoğunluklarının kullanımının düzensiz katılaşma mikroyapısı oluşturduğu belirtilmiştir [41]. Sm₂O₃ katkılı CeO₂ yapısına grafit (ağ.%5) eklenmesi ile elde edilecek olan kompozitler ile bir diğer flaş sinterleme

deneyinde 120 Vcm^{-1} lık elektrik alanının uygulanmasının, 578°C 'de 10 dk içinde tam yoğunlaştırmaya ulaşıldığı raporlanmıştır. Yine aynı çalışmada, yapıdaki grafit sayesinde flaş başlangıç sıcaklığı 25°C 'lere kadar düştüğü denemeler de mevcuttur[42]. $(\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}) (\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.8})\text{O}_3$ (LSCF) elektroseramik ve $\text{Gd}_{0.1}\text{Ce}_{0.9}\text{O}_2$ (GDC) elektrolit olarak kullanılmaktadır. Bu iki malzemenin farklı oranlarda karışımı ile oluşturulan kompozit malzemeler flaş sinterleme ile çalışılmıştır. Çok geniş skalada değişen parametreler ile yapılan çalışmada 0.56 A/mm^2 akım limiti, 20 V/cm elektrik alan ile tam yoğunluk elde edilmiştir. Kompozit içeriğindeki iletken LSCF fazı hızlı ve sürekli iletkenlik artışına neden olmuştur. GDC fazı ise sinterleme mekanizması için katyonların difüzyonuna fırsat veren sıcaklığın daha alt limitlerde meydana gelmesini sağlamıştır (Joule etkisini düşürerek) [43].

Genel olarak kompozitler bilindiği gibi bileşenlerin özelliklerinin bir kombinasyonudur. Flaş sinterleme yönteminde yukarıda verilen çalışma örneklerine bakıldığında kompozit malzemeyi oluşturan bileşenlerden birinin iletkenliği ön plana çıkmaktadır. Flaş sinterleme düşük sinterleme sıcaklıkları ve kısa süreler vadeden bir yöntem olması nedeniyle numunelerin mikroyapısına ve dolayısı ile mekanik ve elektriksel özelliklerine etkisi açıktır. Flaş olayının parametre seçimine ve sinterleme sıcaklığına en büyük etkiye de şüphesiz malzeme iletkenliği sebep olmaktadır. Yüksek dirence sahip malzemelere eklenen iletken malzemeler ile flaş sinterleme deneyleri başlamıştır ve farklı kompozit malzemelerde başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Fakat unutulmaması gerekir ki flaş sinterleme ile elde edilecek olumlu sonuçların yanında malzemenin kullanım alanı sebebiyle asıl önceliği olan fiziksel ve kimyasal özelliklerden de taviz verilmemelidir.

Kaynakça

1. Rahaman, M. N. (2017). Ceramic processing and sintering (Vol. 1). CRC press.
2. German, R. M., Messing, G. L., & Cornwall, R. G. (2020). Sintering technology. CRC Press.
3. Kang, S. J. L. (2004). Sintering: densification, grain growth and microstructure. Elsevier.
4. Fukushima, M., & Gyekenyesi, A. (2017). Mechanical Properties and Performance of Engineering Ceramics and Composites XI, Volume 37, Issue 2 (No. 2). John Wiley & Sons.
5. Somiya, S. (2013). Handbook of advanced ceramics: materials, applications, processing, and properties. Academic press.
6. Guillon, O., Gonzalez-Julian, J., Dargatz, B., Kessel, T., Schiering, G., Räthel, J., & Herrmann, M. (2014). Field-Assisted Sintering Technology/Spark Plasma Sintering: Mechanisms, Materials, and Technology Developments. *Advanced Engineering Materials*, 16(7), 830-849.
7. Yang, D., Raj, R., & Conrad, H. 2010. "Enhanced sintering rate of zirconia (3YTZP) through the effect of a weak dc electric field on grain growth", *Journal of the American Ceramic Society*, 93(10), 2935-2937.
8. Cologna, M., Rashkova, B., & Raj, R. 2010. "Flash sintering of nanograin zirconia in < 5 s at 850oC", *Journal of the American Ceramic Society*, 93(11), 3556-3559.
9. Cologna, M., Prette, A. L., & Raj, R. 2011. "Flashesintering of cubic yttrium-stabilized zirconia at 750° C for possible use in SOFC manufacturing", *Journal of the American Ceramic Society*, 94(2), 316-319.
10. Cologna, M., Francis, J. S., & Raj, R. 2011. "Field assisted and flash sintering of alumina and its relationship to conductivity and MgO-doping", *Journal of the European Ceramic Society*, 31(15), 2827-2837.
11. Prette, A. L., Cologna, M., Sglavo, V., & Raj, R. 2011. "Flash-sintering of Co₂MnO₄ spinel for solid oxide fuel cell applications", *Journal of Power Sources*, 196(4), 2061-2065.
12. Karakuscu, A., Cologna, M., Yarotski, D., Won, J., Francis, J. S., Raj, R., & Uberuaga, B. P. 2012. "Defect structure of flashsintered strontium titanate", *Journal of the American Ceramic Society*, 95(8), 2531-2536.
13. M'Peko, J. C., Francis, J. S., & Raj, R. 2014. "Field-assisted sintering of undoped BaTiO₃: Microstructure evolution and dielectric permittivity", *Journal of the European Ceramic Society*, 34(15), 3655-3660.
14. Zapata-Solvas, E., Bonilla, S., Wilshaw, P. R., & Todd, R. I. 2013. "Preliminary investigation of flash sintering of SiC", *Journal of the European Ceramic Society*, 33(13), 2811-2816.

15. Jha, S. K., Lebrun, J. M., & Raj, R. 2016. "Phase transformation in the alumina–titania system during flash sintering experiments", *Journal of the European Ceramic Society*, 36(3), 733-739.
16. Özdemir, T. E., Akdoğan, E. K., Şavklıyıldız, İ., Biçer, H., Örnek, M., Zhong, Z., & Tsakalakos, T. 2017. "Electric field effect on chemical and phase equilibria in nano-TiB₂-TiO₂-TiBO₃ system at < 650° C: an in situ time-resolved energy dispersive x-ray diffraction study with an ultrahigh energy synchrotron probe", *Journal of Materials Research*, 32(2), 482-494.
17. PerezMaqueda, L. A., GilGonzalez, E., Perejon, A., Lebrun, J. M., SanchezJimenez, P. E., & Raj, R. 2017. "Flash sintering of highly insulating nanostructured phasepure BiFeO₃", *Journal of the American Ceramic Society*, 100(8), 3365-3369.
18. Yoon, B., Yadav, D., Ghose, S., & Raj, R. 2019. "Reactive flash sintering: MgO and α Al₂O₃ transform and sinter into singlephase polycrystals of MgAl₂O₄", *Journal of the American Ceramic Society*, 102(5), 2294-2303.
19. Akdoğan, E. K., Şavklıyıldız, İ., Biçer, H., Paxton, W., Toksoy, F., Zhong, Z., & Tsakalakos, T. (2013). Anomalous lattice expansion in yttria stabilized zirconia under simultaneous applied electric and thermal fields: A time-resolved in situ energy dispersive x-ray diffractometry study with an ultrahigh energy synchrotron probe. *Journal of Applied Physics*, 113(23), 233503.
20. Avila, V., Yoon, B., Neto, R. R. I., Silva, R. S., Ghose, S., Raj, R., & Jesus, L. M. 2020. "Reactive flash sintering of the complex oxide Li_{0.5}La_{0.5}TiO₃ starting from an amorphous precursor powder", *Scripta Materialia*, 176, 78-82.
21. Avila, V., & Raj, R. 2019. "Reactive flash sintering of powders of four constituents into a single phase of a complex oxide in a few seconds below 700° C", *Journal of the American Ceramic Society*, 102(11), 6443-6448.
22. Naik, K. S., Sglavo, V. M., & Raj, R. (2014). Flash sintering as a nucleation phenomenon and a model thereof. *Journal of the European Ceramic Society*, 34(15), 4063-4067.
23. Naik, K. S., Sglavo, V. M., & Raj, R. (2014). Field assisted sintering of ceramic constituted by alumina and yttria stabilized zirconia. *Journal of the European Ceramic Society*, 34(10), 2435-2442.
24. Ojaimi, C. L., Ferreira, J. A., Chinelatto, A. L., Chinelatto, A. S. A., & Pallone, E. M. D. J. A. (2020). Microstructural analysis of ZrO₂/Al₂O₃ composite: Flash and conventional sintering. *Ceramics International*, 46(2), 2473-2480.

25. Yao, S., Liu, D., Liu, J., & An, L. (2021). Ultrafast preparation of Al₂O₃-ZrO₂ multiphase ceramics with eutectic morphology via flash sintering. *Ceramics International*, 47(22), 31555-31560.
26. Bichaud, E., Chaix, J. M., Carry, C., Kleitz, M., & Steil, M. C. (2015). Flash sintering incubation in Al₂O₃/TZP composites. *Journal of the European Ceramic Society*, 35(9), 2587-2592.
27. Biesuz, M., Ometto, A., & Sglavo, V. M. (2021). Flash sintering of YSZ/Al₂O₃ composites: Effect of processing and testing conditions. *Materials*, 14(4), 1031.
28. Yao, S., Liu, Y., Liu, D., Zhao, K., & Liu, J. (2022). Flash sintering of Al₂O₃-ZrO₂ ceramics under alternating current electric field. *Ceramics International*, 48(24), 36764-36772.
29. Kok, D., Jha, S. K., Raj, R., & Mecartney, M. L. (2017). Flash sintering of a three-phase alumina, spinel, and yttria-stabilized zirconia composite. *Journal of the American Ceramic Society*, 100(7), 3262-3268.
30. Yoon, B., Avila, V., Kathiria, R., & Jesus, L. M. (2020). Effects of powder dispersion on reactive flash sintering of 8 mol% yttria-stabilized zirconia and MgAl₂O₄ composites. *Scripta Materialia*, 189, 117-121.
31. Bhandari, S., Mishra, T. P., Bram, M., Guillon, O., & Yadav, D. (2022). Flash sintering behaviour of 8YSZ-NiO composites. *Ceramics International*, 48(22), 33236-33244.
32. Xiao, W., Ni, N., Fan, X., Zhao, X., Liu, Y., & Xiao, P. (2021). Ambient flash sintering of reduced graphene oxide/zirconia composites: Role of reduced graphene oxide. *Journal of Materials Science & Technology*, 60, 70-76.
33. Yang, Y., Zhao, P., & Ma, T. (2022). Effect of current density on the densification of 3% mol yttria-stabilized zirconia/carbon nanotube by flash sintering. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 33(25), 19901-19909.
34. Liu, D., Gao, Y., Liu, J., Li, K., Liu, F., Wang, Y., & An, L. (2016). SiC whisker reinforced ZrO₂ composites prepared by flash-sintering. *Journal of the European Ceramic Society*, 36(8), 2051-2055.
35. Cao, Y., Li, C., Xia, Y., Ren, K., & Zhu, S. (2022). Study on the fabrication and mechanical properties of HAp-3YSZ composites by flash sintering. *Ceramics International*, 48(11), 16300-16305.
36. Su, X., Jiao, Z., An, G., Fu, M., Tian, Q., & Sun, X. (2021). Flash sintering of alumina/reduced graphene oxide composites. *Ceramics International*, 47(19), 27267-27273.
37. Jha, S. K., Lebrun, J. M., & Raj, R. (2016). Phase transformation in the alumina-titania system during flash sintering experiments. *Journal of the European Ceramic Society*, 36(3), 733-739.

38. Zhang, H., Wang, Y., Liu, J., Xu, X., Chen, L., & Liu, D. (2019). Reaction assisted flash sintering of Al₂O₃YAG ceramic composites with eutectic composition. *Ceramics International*, 45(10), 13551-13555.
39. Yoon, B., Yadav, D., Ghose, S., & Raj, R. (2019). Reactive flash sintering: MgO and α -Al₂O₃ transform and sinter into single-phase polycrystals of MgAl₂O₄. *Journal of the American Ceramic Society*, 102(5), 2294-2303.
40. Muccillo, R., S. Ferlauto, A., & NS Muccillo, E. (2019). Flash sintering samaria-doped ceria-carbon nanotube composites. *Ceramics*, 2(1), 64-73.
41. Usuba, J. B., Araújo, A. J., Gonçalves, E. D., Macedo, D. A., Salvo, C., & Viswanathan, M. R. (2020). Flash sintering of one-step synthesized NiO-Ce_{0.9}Gd_{0.1}O_{1.95} (NiO-GDC) composite. *Materials Research Express*, 6(12), 125535.
42. Guan, L., Li, J., Song, X., Bao, J., & Jiang, T. (2019). Graphite assisted flash sintering of Sm₂O₃ doped CeO₂ ceramics at the onset temperature of 25° C. *Scripta Materialia*, 159, 72-75.
43. Gaur, A., & Sglavo, V. M. (2015). Flash sintering of (La, Sr)(Co, Fe)O₃-Gd-doped CeO₂ composite. *Journal of the American Ceramic Society*, 98(6), 1747-1752.

AISI 1020 Çeliğinin Yüzeyinde Ferro Bor- (1, 2.5 ve 5) Silisyum Karbür Metal Matrisli Kompozitlerin TIG Yüzey Alaşımlama Yöntemi ile Oluşturulması ve Özelliklerinin İncelenmesi

Serdar Pazarlıoğlu¹

Yasemin Geyin²

Hasan Gökçe³

Özet

Bu çalışmada, AISI 1020 çeliği yüzeyine 100, 110 ve 120 Amper akımda 20 Volt ve 0.1 mm/s hızda TIG yüzey alaşımlama yöntemi kullanılarak ferro bor-(1, 2.5 ve 5)silisyum karbür metal matrisli kompozitleri oluşturulmuş ve özellikleri incelenmiştir. En iyi sertlik 1076 ± 342 HV ile 110 amper ve FeB-1SiC' e aittir. Aşınma deneylerinden artan yük ile sürtünme katsayısı ve spesifik aşınma miktarı artmıştır.

Giriş

Malzeme mühendisliği uygulamalarında, düşük karbonlu çelikler, iyi kaynaklanabilirlikleri, süneklikleri ve nispeten düşük maliyetleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak düşük sertlikleri ve zayıf aşınma özellikleri uygulamalarını kısıtlamaktadır. Bu nedenle, bitmek tükenmek bilmeyen talebi karşılamak için bu malzemelerin yüzey sertliğini ve aşınma özelliklerini geliştirmeye ilgi duyulmuştur [1]. Bünyesine borür, karbür ve silisit gibi sert fazların oluşuma imkan sağlayan malzemelerin eklenerek oluşturulan metal matrisli kompozitlerle (MMK), düşük karbonlu çeliklerden birisi olan AISI 1020 çeliğinin yüzey özelliklerinin iyileştirilebilmesi mümkündür [2]. Bu amaçla elektro deşarj kaplama (EDC), termo-reaktif difüzyon (TRD),

1 Dr. Öğr. Üyesi, Marmara Üniversitesi, spazarlioglu@marmara.edu.tr, 0000-0002-7870-8418

2 Öğrenci, Marmara Üniversitesi, mail adresi, 0009-0002-7793-4672

3 Dr, İstanbul Teknik Üniversitesi, gokceh@itu.edu.tr, 0000-0001-7892-5642

kimyasal buhar biriktirme (CVD) ve plazma buhar biriktirme (PVD) gibi yöntemler kullanılmaktadır [3]. Bu uygulamaların dışında plazma transfer ark (PTA), lazer, tozaltı, elektroslag ve tungsten inert gaz (TIG) gibi kaynak esaslı alaşımlama yöntemleri ile de mümkündür. TIG yüzey alaşımlama uygun maliyetli bir yöntem olup, arzu edilen bir bileşime sahip bir alaşım tozunun ve alt tabaka malzemesinin aynı anda eritildiği ve daha sonra metalürjik olarak bağlı yoğun bir kaplama oluşturmak üzere hızla katılaştırıldığı bir işlemdir. Bu işlemle yapılan alaşımlama işleminde katılma oranı çok yüksektir. Ayrıca, TIG tekniği ile elde edilen alaşımlanmış yüzey, çeşitli geleneksel altlık malzemeleri üzerinde sentezlenmek üzere yüksek sertlik ve aşınma direncine sahip, hızla katılmış ince mikro yapılar üretme potansiyeline sahiptir [4]. AISI 1020 çeliğinin yüzey özelliklerinin borlama ile geliştirilmesi mümkündür ve genellikle 850-1050°C sıcaklıklarda ve 1-12 saat süreyle gerçekleştirilir. Borlama işlemi difüzyon mekanizmasına bağlı bir işlem olduğu için sıcaklıkla beraber yüzeyde oluşan borür fazları büyümektedir. Borlama neticesinde yüzeyde bor içeren tabaka meydana gelir. Ortaya çıkan bu tabaka içinde ya Fe_2B ya da Fe_2B+FeB fazları birlikte bulunabilir. Ancak, yapıda FeB fazı gevrek ve iç gerilmelere sebep olduğu için istenmemektedir. FeB ve Fe_2B fazları basma ve çekme gerilmeleri uyguladığı için malzeme yüzeyinde çatlaklara sebep olmaktadır. Bu nedenle tek faz Fe_2B yapısı istenmektedir [5]. Bir MMK oluşturmak için erimiş metal yüzeye seramik parçacıklarının eklenmesi, sünek ve tok matris ile seramik parçacıkların yüksek sertliği ve basınç dayanımının birleşik bir avantajına sahiptir. MMK'lerde partikül takviyesi olarak çeşitli sert seramik malzemeler etkili bir şekilde kullanılmasına rağmen, SiC , yüksek sertliği, yüksek erime sıcaklığı, yüksek ısı iletkenliği, yüksek sıcaklıkta kararlılığı ve metalik karşılığına karşı düşük sürtünme katsayısı nedeniyle önde gelen seçeneklerden biridir. SiC ilavesi ile TIG alaşımlama bölgesinde karbür ve silisit gibi sert fazların oluşturulması da mümkündür [6].

Bu çalışmada ferro bor tozlarına ağırlıkça %1, %2,5 ve %5 silisyum karbür ile oluşan farklı bileşimlerde toz karışımları hazırlanarak AISI 1020 çeliği yüzeyine TIG kaynağı ile 100A,110A ve 120A, 20V ve 1 mm/s' lik ilerleme hızlarında olmak üzere yüzey alaşımlama işlemi uygulanmıştır. TIG yüzey alaşımlama işlemi sonrası optik mikroskop incelemeleri, taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri, X-ışınları faz analizleri (XRD), sertlik ölçümleri, ball-on-disc aşınma cihazı kullanılarak aşınma özellikleri incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Aşınma testleri Zirkonya aşındırıcı bilye kullanılarak 5N, 10N, 15N yüklerde 250 metre mesafede 0.1 m/s hızda gerçekleştirilmiştir. Zirkonya bilye ve altlık malzemesi olarak kullanılan 1020 çeliğinin aşınma izleri optik mikroskop ile incelenmiş, aşınma davranışları ise spesifik aşınma oranlarının bulunması ile belirlenmiştir.

2. Deneysel İşlemler

Bu çalışmada AISI 1020 çeliği altlık malzemesinin yüzeyine ferrobör (FeB) ve ortalama tane boyutları 5 mikron olan silisyum karbür (SiC) tozları kullanılarak farklı bileşimlerde olmak üzere hazırlanmış tozlar kullanılarak, TIG kaynağı ile yüzey alaşımına işlemi gerçekleştirilmiştir. Altlık malzemesi olarak kullanılan 1020 çeliğinin kimyasal bileşimi **Tablo 1**'de görüldüğü üzere olup, 60x30x5 mm boyutlarında olacak şekilde hazırlanmıştır. Yüzey alaşımına işlemleri öncesi 1020 çeliğinin yüzeyi mekanik ve ultrasonik olarak temizlenmiştir.

Tablo 1 Altlık malzemesi olarak kullanılan 1020 çeliğinin kimyasal bileşimi

Altlık Malzeme	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Fe
AISI 1020	0,11	0,03	0,56	0,007	0,005	0,07	0,03	Kalan

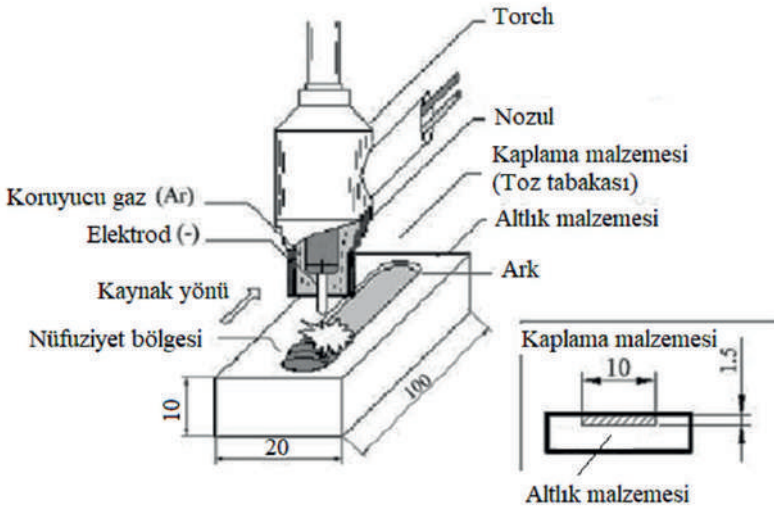
Ferrobör Aveks İç ve Dış Tic. Anonim Şti. (İmes, Ümraniye) firmasından küçük kayaçlar halinde satın alınmış olup, Herzog marka bilyalı değirmende toz haline getirilmiş ve ortalama tane boyutu 90 μm 'nin altında olacak şekilde Restch marka paslanmaz çelikten imal edilen elek ile öğütülmüştür. SiC tozları 5 μm 'luk ortalama tane boyutunda olmak üzere Sigma Aldrich firmasından temin edilmiştir. Öğütme işlemleri sona erdikten sonra, **Tablo 2**'de görülen kimyasal bileşim oranlarına bağlı olarak TIG yüzey alaşımında kullanılan toz karışımları hazırlanmıştır.

Tablo 2 TIG yüzey alaşımında kullanılan karışımlar ve kimyasal bileşimleri

GRUP	FeB (%ağırlıkça)	SiC (%ağırlıkça)
Karışım 1	99	1
Karışım 2	97,5	2,5
Karışım 3	95	5

TIG yüzey alaşımına işlemleri **Tablo 3**'de belirtilen parametrelere ve **Şekil 1**'de görüldüğü üzere gerçekleştirilmiştir.

Parametre	Değer		
Elektrot	W-2 pct ThO ₂		
Elektrot çapı	2 mm		
Kaynak açısı	70°		
Voltaj	20 V		
Akım	100 A	110 A	120 A
Isı girdisi	1.20 kJ/mm	1.32 kJ/mm	1.44 kJ/mm
Koruyucu gaz	Ar (%99.9 saflıkta)		
Koruyucu gaz akış debisi	3 l/dakika		
Kaynak hızı	60 mm/dak.		



Şekil 1 Alaşım işlemi için şematik gösterim

TİG yüzey alaşım işlemi ısı girdisi Formül 1'e göre hesaplanmıştır.

$$Q = \frac{\eta \times U \times I}{V \times 1000} \quad (1)$$

Burada; Q: Isı girdisi (kJ/mm), η : katsayısı (0.6), U : Voltaj (V), I : Akım (A), V : Kaynak hızı (mm/dakika)

TİG yüzey alaşım işlemi sonrası oluşturulan karışımlara bağlı olarak altık malzemesi ile alaşım tabakası arasındaki ara yüzey bölgesi, altık malzemesi ve alaşım tabakasında meydana gelen mikroyapısal değişimlerin belirlenmesinde optik mikroskop ve FEI Sirion XL30

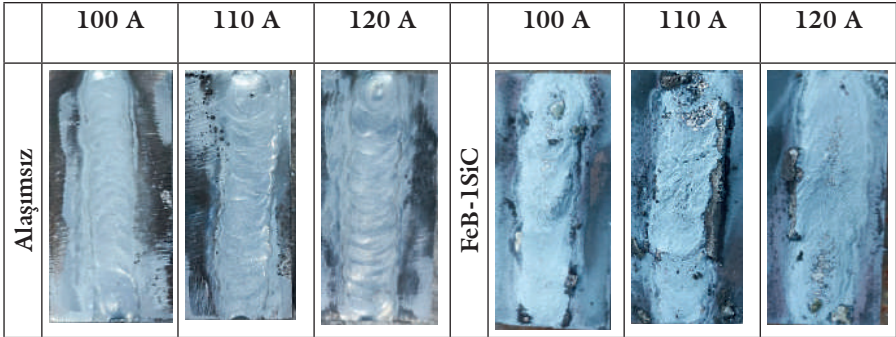
marka SEM cihazı, alaşımlama bölgesinde hazırlanan karışım oranlarına bağlı olarak meydana gelen fazların türü 10-90° lik 2θ aralığında Philips X'Pert marka XRD cihazında 0.02° lik ilerleme hızı ile belirlenmiştir. TİG alaşımlama işlemleri sonrası farklı toz karışım oranlarının altlık malzemesinin yüzey özelliklerine etkilerini anlayabilmek için sertlik ve aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Sertlik testleri gösterilen Future Tech FM-300 marka mikrosertlik cihazında gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümleri yalnızca alaşımlama bölgesinden ve alaşımlama bölgesinden altlık malzemesine olacak şekilde 200 gram yük altında 10 saniye süre ile alındı. Aşınma testleri ASTM C99-3 standartına göre üretilmiş aşınma test cihazında ball-on disk yöntemi kullanılarak zirkonya (ZrO₂) aşındırıcı bilye ile 5N, 10N, 15N yüklerde 250 metre mesafede 0.1 m/s hızda gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyi sonuçları TİG kaynağı ile alaşımlandırılmış AISI 1020 çeliğinde meydana gelen spesifik aşınma oranları **Formül 2** hesaplanması ile tespit edildi. Spesifik aşınma oranının bulunmasında aşınan hacim oranı Deniz Harp Okulu' nda bulunan optik profilometre ile ölçüldü.

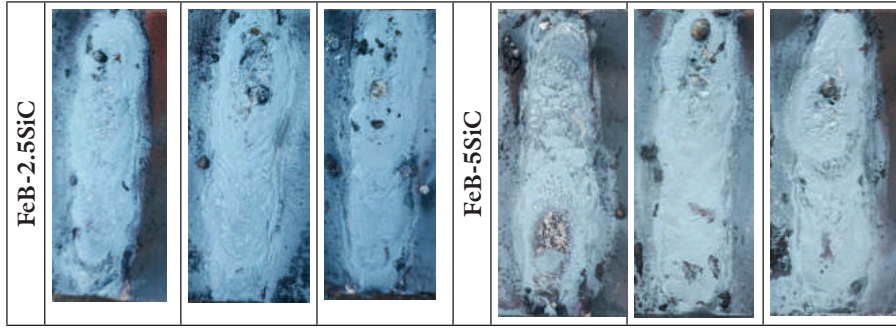
$$W = V/FxD \quad (2)$$

W: Spesifik aşınma miktarı (mm³/Nm), V: Aşınan hacim (mm³), F: Uygulanan yük (N), D: Yol (m).

3. Sonuçlar ve Tartışma

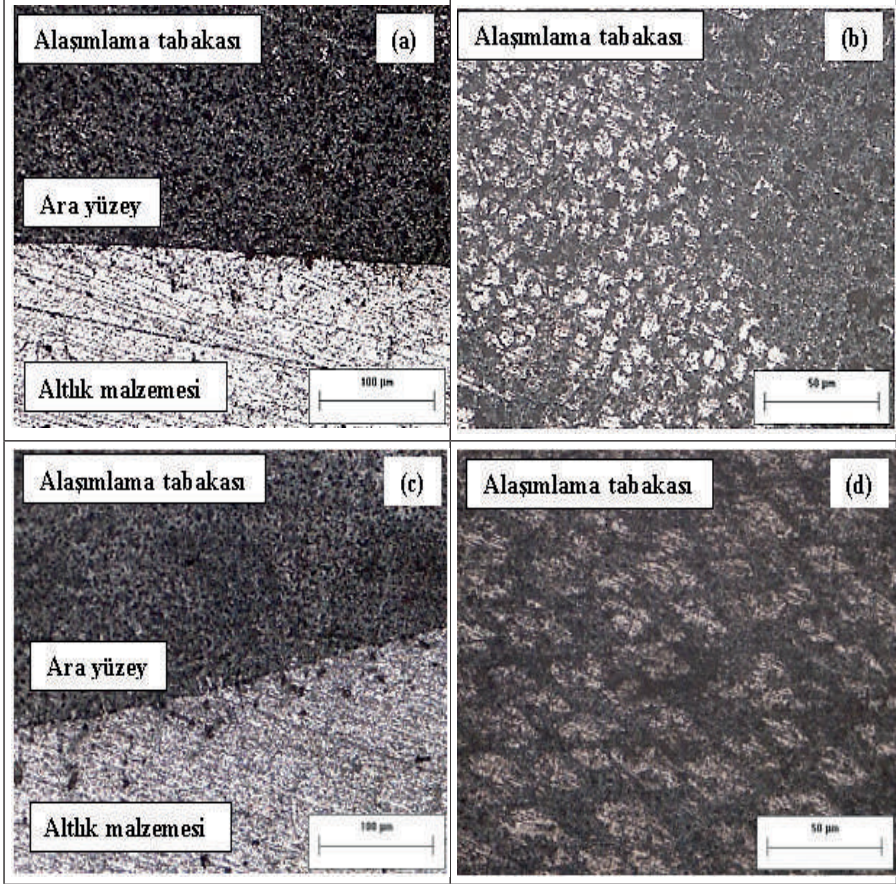
Şekil 2' de alaşımsız ve FeB-SiC ile alaşımlandırılmış AISI 1020 çeliğinin alaşımlama işlemleri sonrası makro görüntüleri görülmektedir. Bu şekillerden görüleceği üzere çatlak ve/veya gözeneksiz olmak üzere alaşımlama tabakalarının elde edilmiştir.

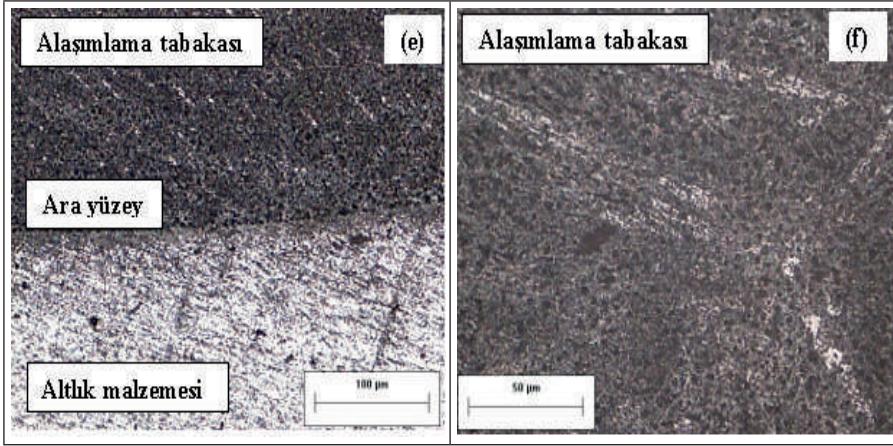




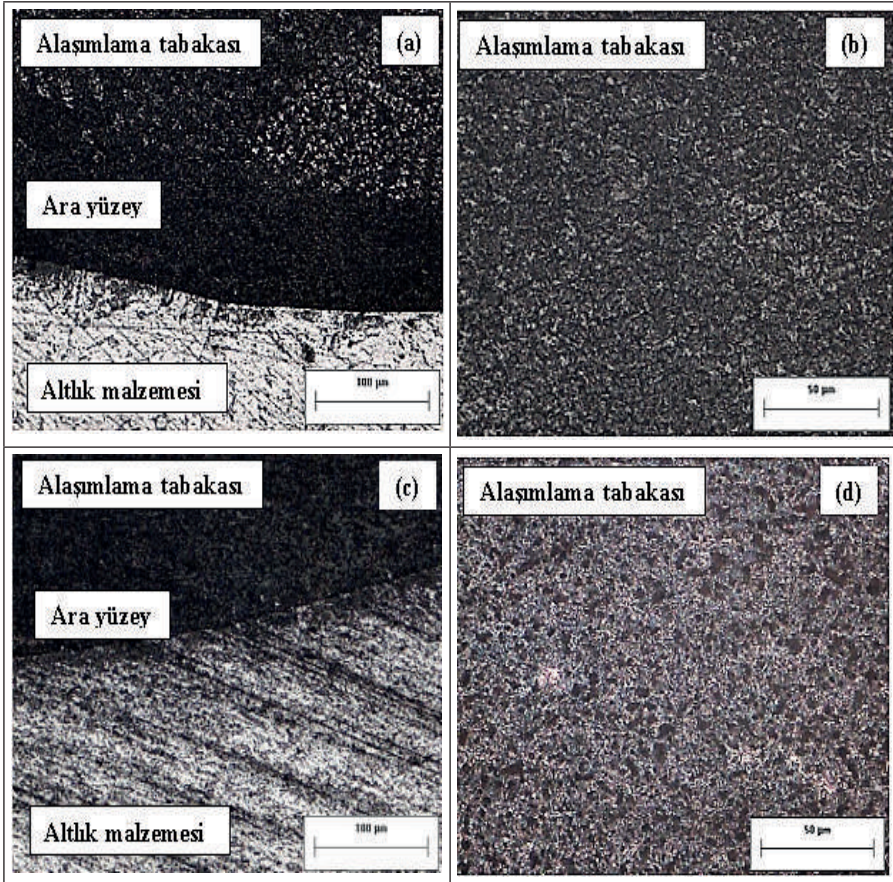
Şekil 3-5’ de sırasıyla ağırlıkça %1, 2.5 ve 5 oranlarında olmak üzere SiC ilaveleri ile oluşturulmuş ve 100, 110 ve 120A’ lik akımlarda gerçekleştirilmiş olan FeB-SiC karışımlarına ait alaşımlama tabakaları ve ara yüzey bölgelerine ait optik mikroyapı resimleri görülmektedir. Isı girdisi ve ilerleme hızı ve alaşımlamada kullanılan toz bileşimine bağlı olarak alaşımlama bölgesinin mikroyapısı ve mekanik özellikleri değişir. Bunun iki nedeni vardır: Birincisi; yüzeyde biriktirmeye çalışılan bileşenler ve ısı girdisindeki değişimden dolayı alaşımlama tabakasında farklı fazların meydana gelmesidir. İkincisi ise; farklı üretim hızları ve alaşımlamada kullanılan bileşenlerin farklı ergime sıcaklıklarına sahip olması sonucu katılaşma hızlarının farklılaşmasına neden olmasıdır [7]. FeB-SiC kompozitlerinde artan SiC oranı ve ısı girdisi ile birlikte alaşımlama bölgesinin daha kaba taneli ve/veya iğnemişi forma dönüştüğü, ara yüzey bölgesinin ise daraldığı belirlendi. Buytoz ve Ulutan yapmış oldukları çalışmada altlık malzemesi olarak kullandıkları AISI 304 paslanmaz çeliğindeki Fe ile alaşımlamada kullandıkları SiC’ ün ergime sıcaklıkları arasındaki farkın yüksek olması nedeniyle alaşımlama tabakasındaki katılaşmanın dendritik şekilli olduğunu bildirmişlerdir [8]. Bu çalışmada kullanılan FeB’ un Fe’ ye oranla daha yüksek ergime sıcaklığına sahip olması nedeniyle alaşımlama bölgesinde dendritik katılaşma gözlemlenmemiştir. Yüksek ısı girdisi, altlık malzemesinde bulunan demirin aşırı seyrelmesine ve SiC’ ün bir kısmının süblimleşmesine yol açtığından dolayı [9]. Şekil 6’ da görüldüğü üzere alaşımlama tabakası içerisinde α -Fe’ in baskın faz olmasına neden olmuştur. SiC partiküllerinin süblimleşme davranışı Ulutan ve diğerlerinin AISI 4140 çeliğinin SiC ile alaşımlandırılması için kullanmış oldukları 2.91 kJ/mm’ lik ısı girdisi içinde doğrulanmıştır [10]. Kılıç ve diğerleri ise artan ısı girdisi nedeniyle SiC’ ün süblimleşmemiş kısmının Si ve C elementlerine çözülmüş ve C elementinin bileşik oluşturmadan alaşımlama tabakası içerisinde yer yer grafit olarak hapsediğini bildirmiştir [11]. Ancak bu çalışmada Şekil 6 (a)’ da görüldüğü üzere; diğer çalışmalara göre daha

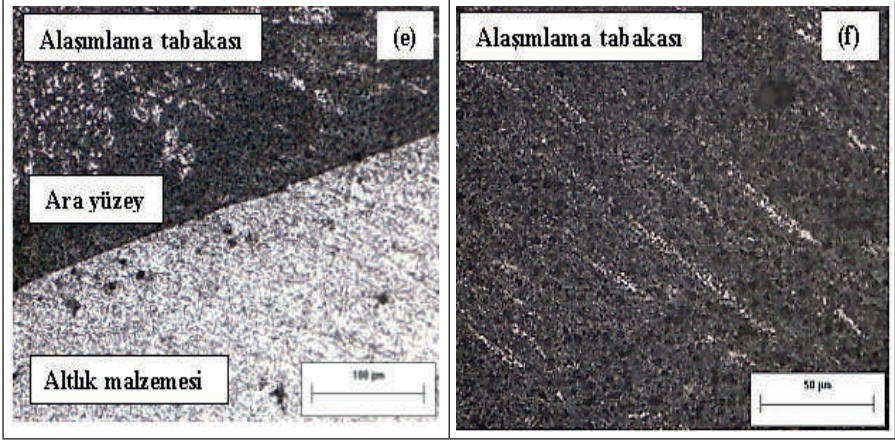
düşük ısı girdisi değerlerinde çalışılmış olan 100 Amperlik akımda SiC partiküllerinin süblimleşmesi esnasında Fe_2Si fazının oluşumuna neden olduğu belirlendi. Ancak **Şekil 4.6 (b)**' de görüleceği üzere artan ısı girdisi alaşımlama bölgesinde yer yer çatlak ve 120 Amperlik akımda alaşımlama bölgesi içerisinde $FeB-5SiC$ alaşımlama tabakasında $FeSi_2$ ile Fe_3C fazlarının oluşumuna neden olmuştur. Bu da SiC' ün süblimleşmesi esnasında ayrılan Si ve C' nin FeB veya altlık malzemesi içerisinde bulunan Fe ile reaksiyona girmelerinden dolayı olabileceği kanaatine varılmıştır.



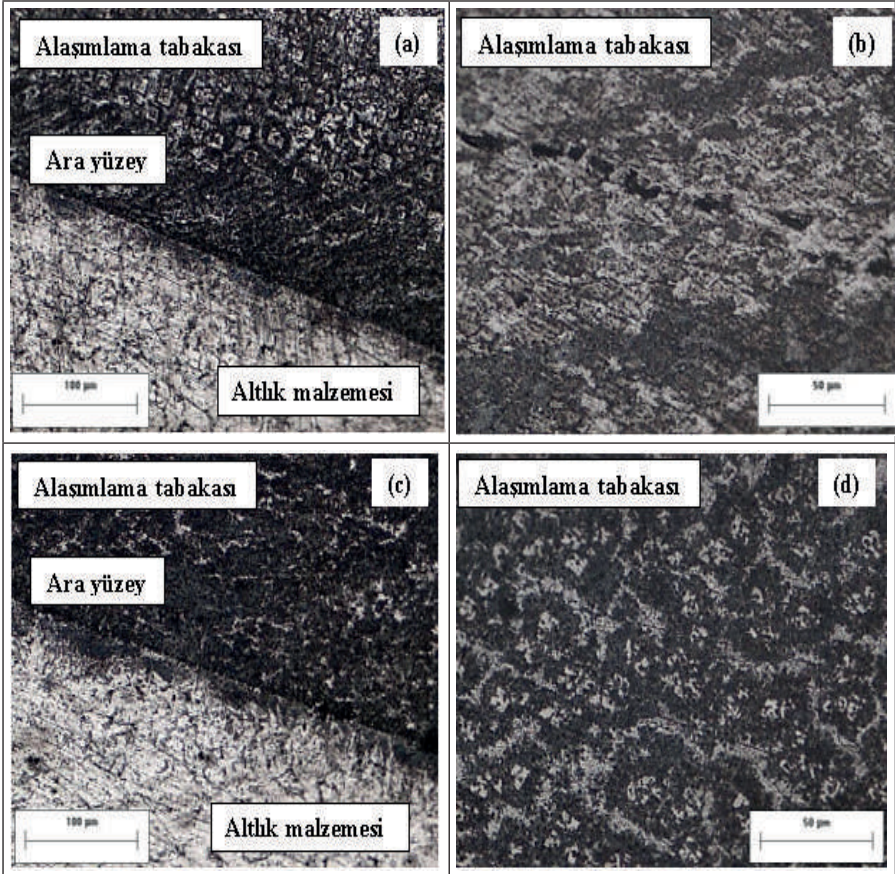


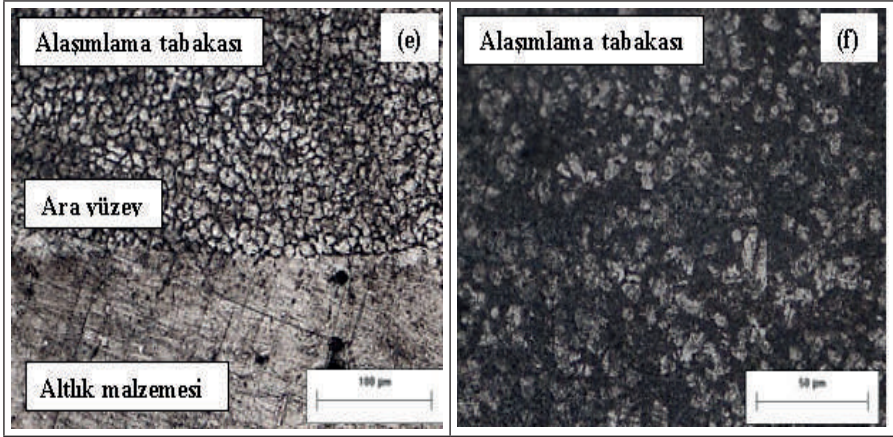
Şekil 3(a) 100A, (c) 110A ve (e) 120A' de alaşımlandırılmış FeB-1SiC alaşımlarının alaşımlama tabakası-ara yüzey-altık malzemesi bölgelerine, (b) 100 A, (d) 110A ve (f) 120A' de alaşımlandırılmış FeB-1SiC alaşımlarının alaşımlama tabakasına ait optik mikroyapı görüntüleri



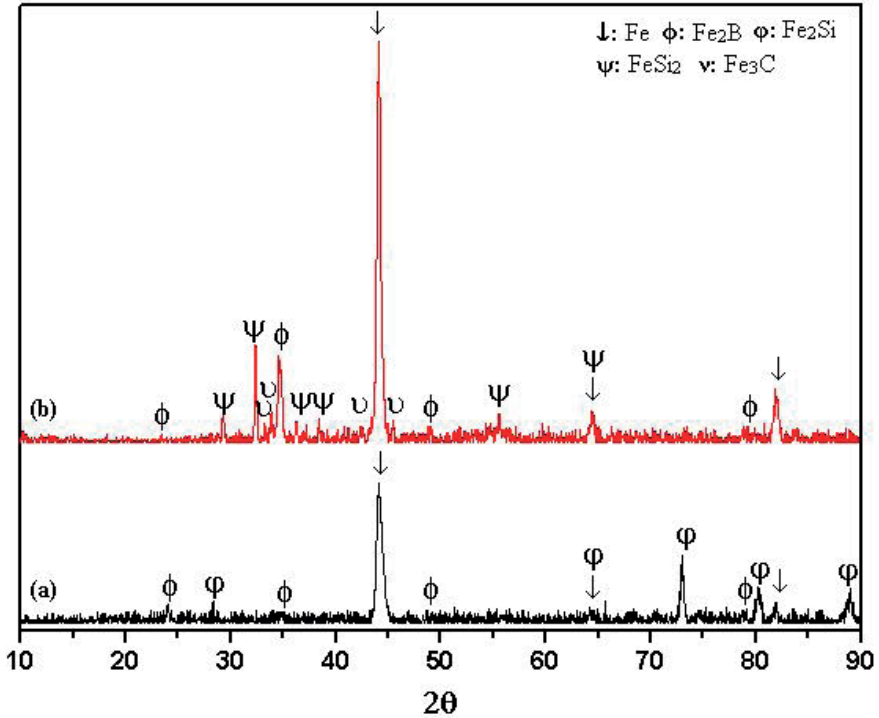


Şekil 4 (a) 100A, (c) 110A ve (e) 120A' de alaşımlandırılmış FeB-2.5SiC alaşımlının alaşımlama tabakası-ara yüzey-altık malzemesi bölgelerine, (b) 100 A, (d) 110A ve (f) 120A' de alaşımlandırılmış FeB-2.5SiC alaşımlının alaşımlama tabakasına ait optik mikroyapı görüntüleri



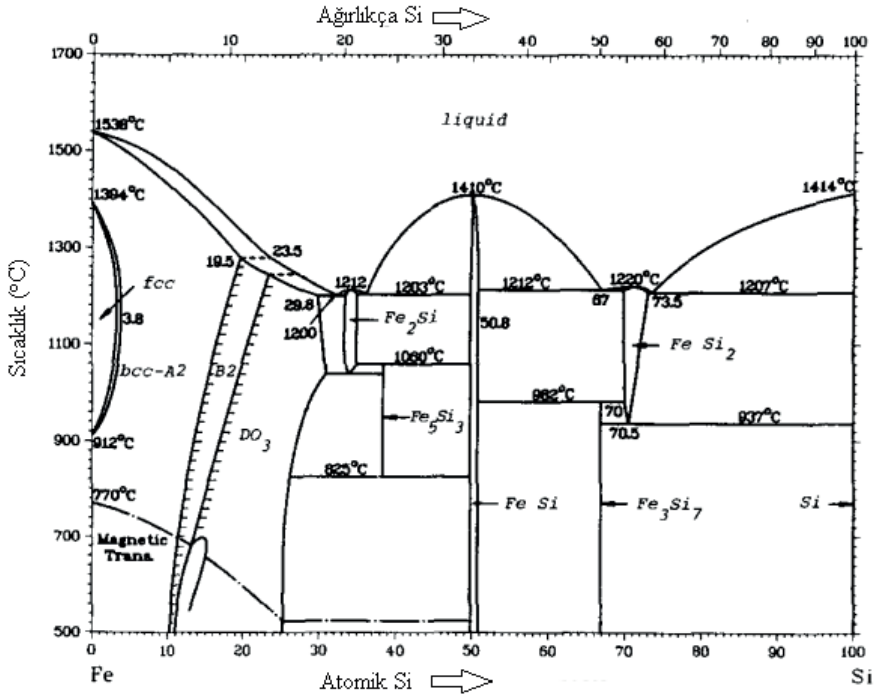


Şekil 5 (a) 100A, (c) 110A ve (e) 120A' de alaşımlandırılmış FeB-5SiC alaşımının alaşımlama tabakası-ara yüzey-altlık malzemesi bölgelerine, (b) 100 A, (d) 110A ve (f) 120A' de alaşımlandırılmış FeB-5SiC alaşımının alaşımlama tabakasına ait optik mikroyapı görüntüleri



Şekil 6 (a) 110 amperde gerçekleştirilen FeB-1SiC (b) 120 amperde gerçekleştirilen FeB-1SiC alaşımlama tabakalarına ait XRD analizleri

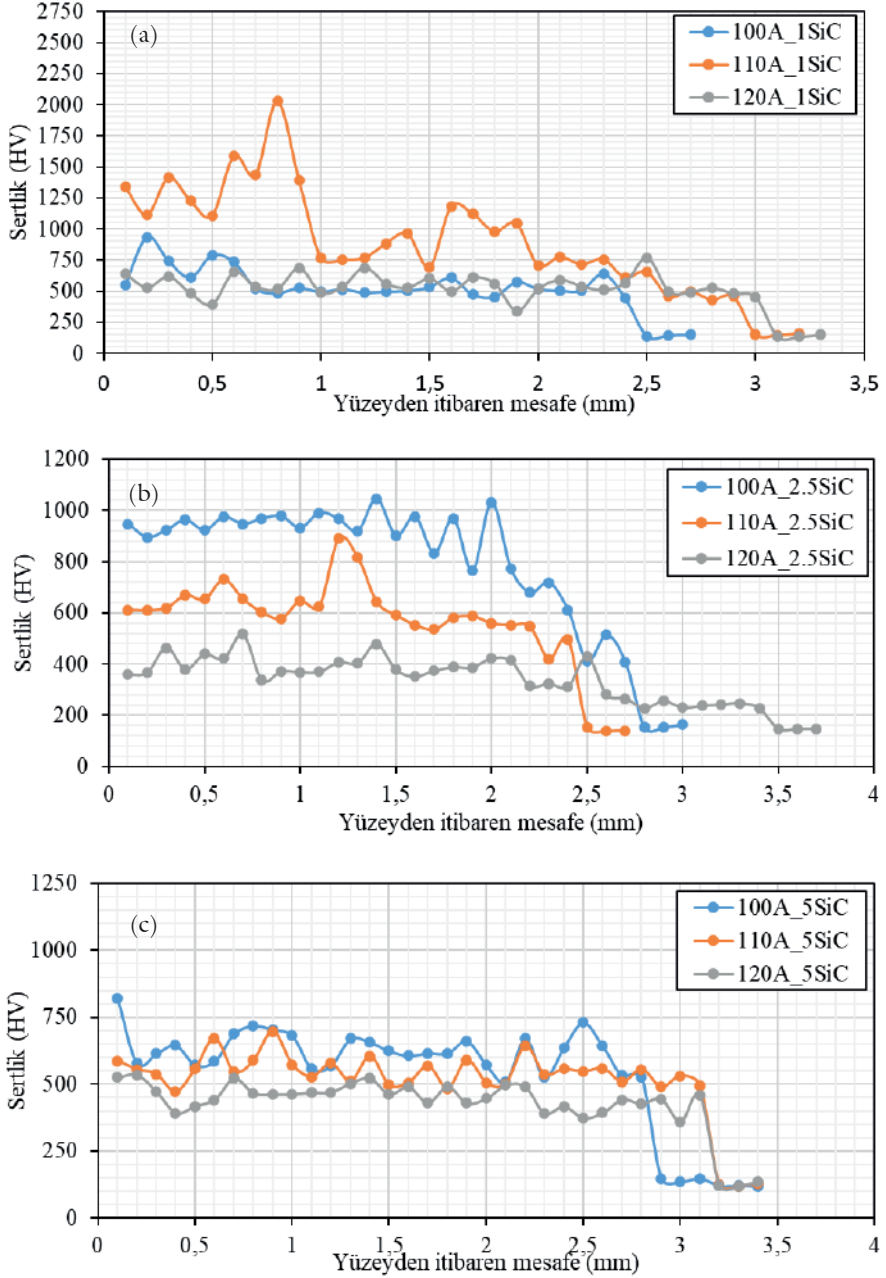
Şekil 6 FeB-SiC alaşımlama tabakasında en yüksek (1076 ± 342 HV) ve en düşük (454 ± 45 HV) sertlik değerin elde edildiği (a) 110 amperde gerçekleştirilen FeB-1SiC ve (b) 120 amperde gerçekleştirilen FeB-5SiC alaşımlama tabakalarına ait XRD analizlerini göstermektedir. **Şekil 6 (a)**' da görüleceği üzere; 110 amperde gerçekleştirilen FeB-1SiC alaşımlama tabakası α -Fe, Fe_2B ve Fe_2Si fazlarından ve **Şekil 6 (b)**' de görüldüğü üzere 120 amperde gerçekleştirilen FeB-5SiC alaşımlama tabakası α -Fe, Fe_2B , $FeSi_2$ ve Fe_3C fazlarından oluşmaktadır. **Şekil 7**' de görüldüğü üzere; Fe-Si ikili sistemi üç düzensiz çözeltili fazı, sıvı, α (A2) ve γ (A1), iki sıralı bcc fazı, α' FeSi (B2) ve α'' Fe₃Si (D03) ve Fe_2Si , Fe_5Si_3 , $FeSi$, $FeSi_2$ ve Fe_3Si_7 olmak üzere 5 farklı demir silisit fazı meydana gelmektedir [12]. Fe_2Si , $FeSi$ ve $FeSi_2$ uyumlu bir şekilde erir ve küçük bir homojenlik aralığı sunar. Fe_3Si_7 fazı $FeSi$ ve $FeSi_2$ fazlarından ötektoid dönüşüm sonucu meydana gelmektedir ve Fe_2Si fazı $1212^\circ C$ ' de, $FeSi_2$ fazı ise sıvı faz içerisinde $1220^\circ C$ ' de katılaşmaktadır [13]. Fe_2B fazı, Fe-Si-B üçlü sisteminde meydana gelmekte olan metastabil fazlardan birisidir ve $1166^\circ C$ sıcaklıkta sıvı fazın BCC Fe ve Fe_2B fazlarına dönüşmüş olduğu ötektik reaksiyon sonucu meydana gelmektedir ve Fe_2B fazındaki Fe içerisinde B' nin çözünürlük oranı $0.176'$ dir [14]. SiC ve Fe-Si eriyiği arasındaki faz ilişkisi Chipman ve diğerleri tarafından açıklanmış olup hem SiC hem de grafit ile dengede olan sıvı bileşimin $1200^\circ C$ ' de Fe-33.2 mol% Si olduğu ve sıcaklığın $1690^\circ C$ ' ye yükselmesi durumunda Si içeriğinin Fe-37.7 mol% Si' ye yükseldiği belirtilmiştir [15]. FeB-5SiC alaşım tabakası içerisinde tespit edilen Fe_3C fazı, Han, K., ve diğerlerinin tıpkı T/M yöntemi ile incelemiş oldukları $1690^\circ C$ sıcaklıktaki gibi, TIG kaynak banyosunun $1670^\circ C$ olması nedeniyle grafit formundaki C' nin Fe ile reaksiyona girmesi sonucu oluştuğu kanaatine varılmıştır [16].



Şekil 7 Fe-Si ikili sistemine ait faz diyagramı

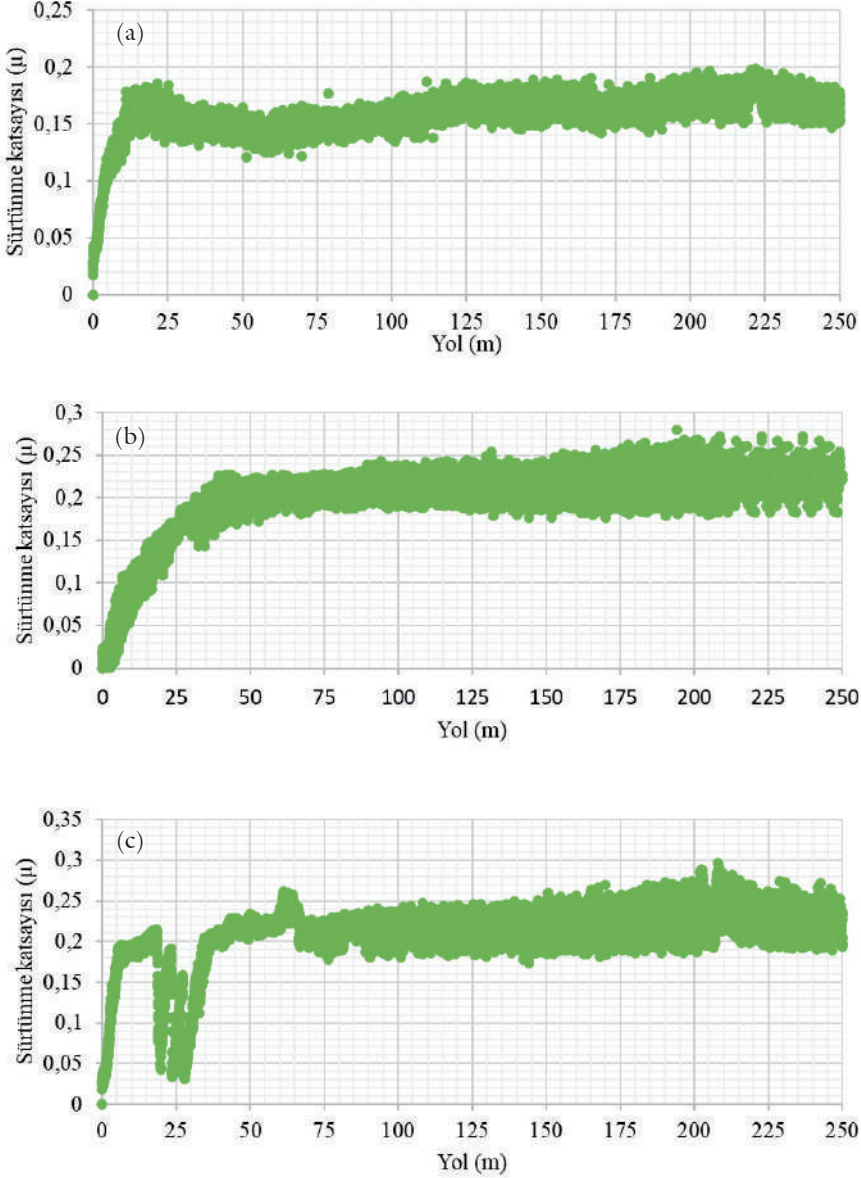
Oluşan kaplama katlarının derinliklerinin farklı oluşu ve ara bölgede metallerarası bileşiklerin oluşup oluşmama durumuna göre mikrosertlik değerleri birbirinden az çok farklı değerler vermektedir. Sert yüzey kaplamalarının sertliği büyük ölçüde birincil sert fazların oranına ve mikroyapıya bağlı olup, karbür/borür içerikli fazların varlığı alaşımlama tabakasının sertliğinin artmasına katkıda bulunmaktadır [17]. Altlık malzemesi olarak kullanılan AISI 1020 çeliğinin sertliği 174 ± 8 HV' dir. [18]. Şekil 8' de görüldüğü üzere FeB-SiC kompozit sistemlerinde en yüksek ortalama sertlik değerinin elde edilmesinde Fe₂Si fazının en düşük ortalama sertlik değerinin elde edilmesinde ise FeSi₂ ve Fe₃C fazlarının oluşmasının etkili olduğu belirlenmiştir. Tek taneli olarak üretilen Fe₂Si 1489 HV [19], FeSi₂ ise 571 HV' lık sertliğe sahiptir [20]. Ancak, Fe-Si esaslı alaşımlarda kullanılan imalat yöntemlerine ve soğuma hızlarındaki hızlanma nedeniyle gerçekleştirilen sertlik ölçümlerinde bu değerlere oluşmadıkları belirtilmiştir. Örneğin, Baker ve diğerlerinin belirttiği üzere orta karbonlu çelik altlık malzemesi yüzeyine gerçekleştirilen lazer kaynağı ile SiC kullanılarak alaşımlama işlemi esnasında SiC' ün ayrıştığı ve alaşımlama tabakasına çökelen Fe₂Si fazının 190HV' den 600HV' ye yükselmesinde

de görülmüştür [21]. Fe_3C fazının Fe-C-B [22] ve Fe-Si-C [23] üçlü sistemlerinde meydana geldiği belirtilmiş olan bir intermetalik bileşiktir ve 920 HV'lik sertlik değerine sahiptir.

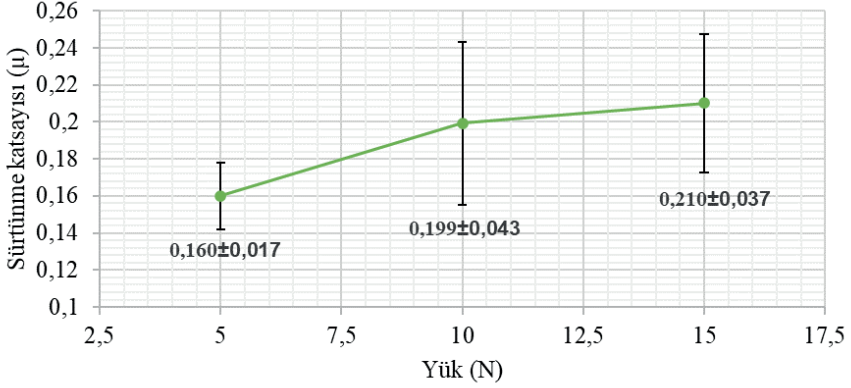


Şekil 8 (a) $Fe-B-1\%SiC$ (b) $Fe-B-2.5\%SiC$ ve (c) $Fe-B-5\%SiC$ alaşımlama tabakalarının 100,110 ve 120 A ya göre sertlik dağılımları

Şekil 9 250 metre mesafe boyunca 5N, 10 N ve 15 N yük altında 0.1 m/s hız ile gerçekleştirilen aşınma deneyinde ölçülmüş sürtünme katsayısı grafiklerini ve Şekil 10 sürtünme katsayısı değerlerinin yüke bağlı olarak değişimlerini göstermektedir.

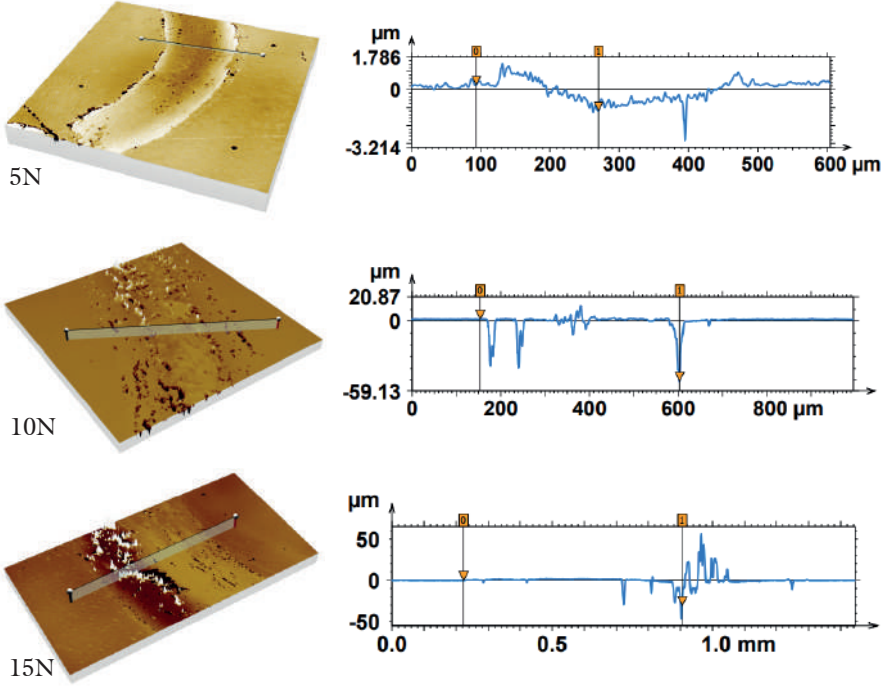


Şekil 9 FeB-SiC alaşımlama tabakası (a) 5N, (b) 10 N ve (c) 15 N yük altındaki sürtünme katsayısı-yol grafikleri

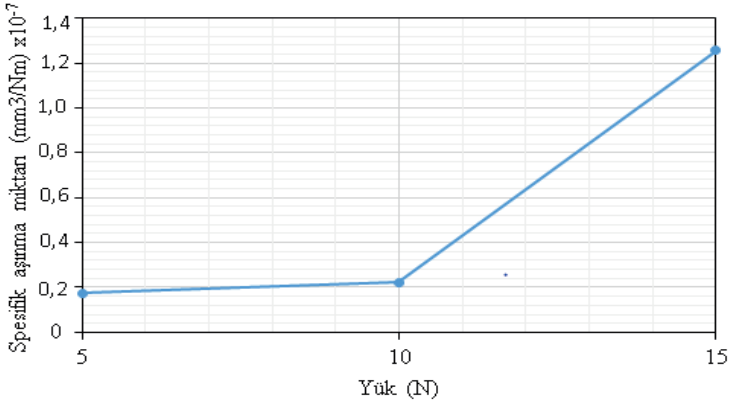


Şekil 10 FeB-SiC alaşımlama tabakası (a) 5N, (b) 10 N ve (c) 15 N yük altındaki sürtünme katsayısı değerlerinin uygulanan yüke bağlı olarak değişimi

Şekil 10' da görüldüğü üzere sürtünme katsayısı değerleri artan yük ile artış göstermiştir. Rai ve diğerleri tarafından da belirtildiği üzere, yükteki artış ile sürtünme katsayısı artış göstermektedir [24]. Bu çalışmada maksimum $0.210 \pm 0.037 \mu'$ luk sürtünme katsayısı değeri ölçülmüştür. Ancak, yüzeyi TIG yüzey alaşımlama yöntemi ile Fe-Nb-B [25], Fe-TiB₂ [26] ve TiB₂-TiO₂ [27] ile alaşımlandırılmış AISI 1020 çeliği için sırasıyla 0.8μ , 0.78μ ve $0.65\mu'$ luk sürtünme katsayısı değerlerinin elde edildiği belirtilmiştir. Şekil 11' de optik profilometre ile aşınan hacimlere ait görüntüleri görülmektedir. Artan yük ile alaşımlama tabakasından aşınan hacimsel kayıplar sırasıyla $1594433 \mu^3$, $484288 \mu^3$ ve $777649 \mu^3$ olarak hesaplanmıştır. Belirtilen bu değerlerden görüleceği üzere, aşınan hacim değerleri artan yük ile artmıştır. Şekil 12' de spesifik aşınma miktarının yola bağlı olarak değişimi görülmektedir. 5N yükte spesifik aşınma miktarı 1.738×10^{-7} , 10N yükte 2.235×10^{-7} ve 15N yükte ise 1.254×10^{-6} ya çıkmıştır. 5N yükten %100 artış spesifik aşınma miktarında %128 artışa neden olurken; yükteki %300' lük artış için spesifik aşınma miktarı %721 olarak hesaplanmıştır.



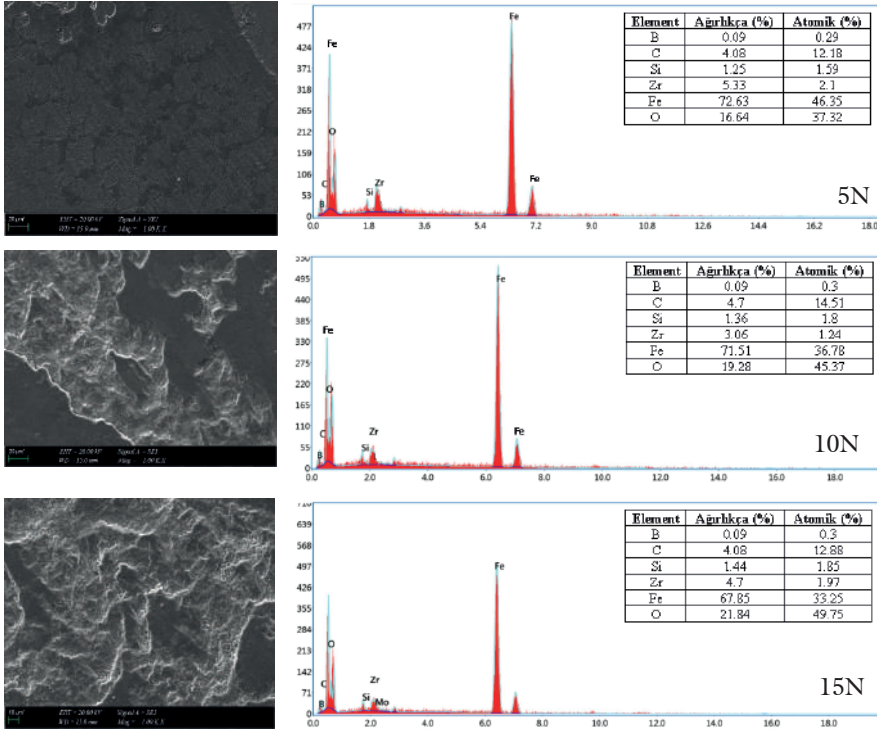
Şekil 11 Optik profilometre ile belirlenmiş olan aşınma hacimlerine ait görüntüler



Şekil 12 Spesifik aşınma miktarının yüke bağlı olarak değişimi

Şekil 13'de aşınma izlerinden alınmış SEM ve EDS analizleri görülmektedir. Alaşım tabakasının aşınmış yüzeyinde adhezif aşınmanın baskın olduğu ancak az miktarda abrazyif aşınmanın da olduğu görülmektedir. EDS analizi sonucunda aşınmış yüzeyde oksitlerin varlığı tespit edilmiştir. Fe-B sert yüzey alaşımının aşınmış yüzeyinde, ana aşınma mekanizması

adeziv ve oksidatif aşınmadır. Ayrıca küçük bir abrasif aşınma olduğu da söylenebilir.



Şekil 13 Aşınma izlerinden alınmış SEM ve EDS analizleri

Sonuçlar

Bu çalışma neticesinde, metal matrisli seramik takviyeli FeB-SiC karışımlarının TIG yüzey alaşımlama yöntemi ile AISI 1020 çeliği yüzeyinde çatlaksız ve/veya gözeneksiz olarak oluşturulabildiği belirlenmiştir. Alaşımlama tabakasında kullanılan SiC takviye malzemesine bağlı olarak farklı α -Fe, Fe₂Si, Fe₂B, FeSi₂ ve Fe₃C fazlarının meydana geldiği belirlendi. Oluşturulan MMK alaşımlama tabakalarında en yüksek ortalama sertlik değeri 1076 ± 342 HV ile 110 amper ve FeB-1SiC' de ulaşıldı. Bulunan bu değerin altlık malzemesi olarak kullanılan AISI 1020 çeliğinden yaklaşık 9 kat daha fazla olduğu tespit edildi. Artan yük ile sürtünme katsayısı ve spesifik aşınma miktarlarının artış gösterdiği tespit edildi.

Kaynakça

- [1] Muvvala Gopinath, Pavan Thota, Ashish Kumar Nath, Role of molten pool thermo cycle in laser surface alloying of AISI 1020 steel with in-situ synthesized TiN, *Surface and Coatings Technology*, 362(25), 2019, 150-166.
- [2] Hipólito Carvajal Fals, Luciano Augusto Lourençato, Mario Sánchez Orozco, Maria Julia Xavier Belém, Carlos Roberto Camello Lima, Slurry erosion resistance of thermally sprayed Nb₂O₅ and Nb₂O₅ + WC₁₂Co composite coatings deposited on AISI 1020 carbon steel, *Ceramics International*, 46, 2020, 27670-27678.
- [3] P.D. Machkale, B.M. Dabade, Experimental investigation of tungsten and copper carbide coating on AISI1020 steel using electro discharge coating process, *Materials Today: Proceedings*, 26, 2020, 2915-2920.
- [4] Tanju Teker, Selçuk Karata, S. Osman Yılmaz, Microstructure and Wear Properties of AISI 1020 Steel Surface Modified by HARDOX 450 and FeB Powder Mixture, *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 50(1), 2014, 94-103.
- [5] Bünyamin Yamanel, Osman Bican, S. Uğur Bayça, Investigation of Microstructure and Hardness Behaviors of AISI 1020 Steel Surface Hardened with Local Boronizing Agent, *International Journal of Engineering Research and Development*, 15(1), 2023, 164-171.
- [6] Wear characteristic of TiC coated AISI1020 mild steel fabricated by TIG cladding method, *Materials Today: Proceedings*, 26, 2020, 3288-3291.
- [7] Mustafa Ulutan, M. Mustafa Yıldırım, Soner Buytoz, TIG Yöntemiyle Yüzeyi Sertleştirilen AISI 4140 Çeliğinin Mikroyapı İncelemesi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22(1), 2009, 95-107.
- [8] Soner Buytoz, Mustafa Ulutan, Insitu synthesis of SiC reinforced MMC surface on AISI304 stainless steel by TIG surface alloying, *Surface & Coatings Technology*, 200, 2006, 3698-3704.
- [9] Soner Buytoz, Microstructural properties of SiC based hardfacing on low alloy steel, *Surface & Coatings Technology*, 200, 2006, 3734-3742.
- [10] Mustafa Ulutan, M. Mustafa Yıldırım, Soner Buytoz, Osman N. Çelik, Microstructure and Wear Behavior of TIG Surface-Alloyed AISI 4140 Steel, *Tribology Transactions*, 54, 2011, 67-79.
- [11] Musa Kilic, Anil Imak, and Ihsan Kirik, Surface Modification of AISI 304 Stainless Steel with NiBSi-SiC Composite by TIG Method, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30, 2021, 1411-1419.
- [12] Ikuo Ohnuma, Shinya ABE, Shota Shimenouchi, Toshihiro Omori, Ryosuke Kainuma, Kiyohito Ishida, Experimental and Thermodynamic Studies of the Fe-Si Binary System, *ISIJ International*, 52(4), 2012, 540-548.

- [13] Jacques Lacaze and Bo Sundman, An Assessment of the Fe-C-Si System, *Metallurgical Transactions A*, 22, 1991, 2211-2223.
- [14] Marco G. Poletti, Livio Battezzati, Assessment of the ternary Fe-Si-B phase diagram, *Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry*, 43, 2013, 40-47.
- [15] T Yoshikawa, S Kawanishi and T Tanaka, Fundamental study for solvent growth of silicon carbide utilizing Fe-Si melt, *Journal of Physics: Conference Series*, 165, 2009, 012022.
- [16] K. Han, M. Saito, J. Xia, I. Ohnuma, R. Kainuma, Experimental determination of phase diagram involving silicides in the Fe-Si binary system, *Journal of Alloys and Compounds*, 919, 2022, 165810.
- [17] Bülent Kılınc, Engin Kocaman, Şaduman Şen, Uğur Şen, Effect of vanadium content on the microstructure and wear behavior of $\text{Fe}_{(13-x)}\text{V}_x\text{B}_7$ ($x=0-5$) based hard surface alloy layers, *Materials Characterization*, 179, 2021, 111324.
- [18] Diana Maritza Marulanda Cardona, Jitraporn Wongsangam, Hernando Jimenez, Terence G. Langdon, Effects on hardness and microstructure of AISI 1020 low-carbon steel processed by high-pressure torsion, *Journal of Materials Research and Technology*, 6(4), 2017, 355-360.
- [19] Samuel Humphry-Baker, Jessica Marshall, Structure and Properties of High-Hardness Silicide Coatings on Cemented Carbides for High Temperature Applications, *Coatings*, 8, 2018, 247.
- [20] V. Milekhine, M.I. Onsøien, J.K. Solberga, T. Skaland, Mechanical properties of FeSi , FeSi_2 and Mg_2Si , *Intermetallics*, 10, 2002, 743-750.
- [21] P. Muñoz-Escalona, S. Mridha and T.N. Baker, Effect of Silicon Carbide Particle Size on Microstructure and Properties of a Coating Layer on Steel Produced by TIG Technique, *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2(4), 2016, 451-460.
- [22] Jonathan Lentz, Arne Röttger, Werner Theisen, Hardness and modulus of Fe_2B , $\text{Fe}_3(\text{C},\text{B})$, and $\text{Fe}_{23}(\text{C},\text{B})_6$ borides and carboborides in the Fe-C-B system, *Materials Characterization*, 135, 2018, 192-202.
- [23] G. Morard, D. Antonangeli, M.A. Baron, A. Pakhomova, A.N. Clark, M. Mezou, G. Fiqu, The Fe-Si-C system at extreme P-T conditions: A possible core crystallization pathway for reduced planets, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 322(1), 2022, 129-142.
- [24] V.K Rai, R. Srivastava, S.K Nath, S Ray, Wear in cast titanium carbide reinforced ferrous composites under dry sliding, *Wear*, 123(2), 1999, 265-271.
- [25] B. Kilinc, M. Durmaz, E. Abakay, U. Sen, S. Sen, Wear Behavior of The Surface Alloyed AISI 1020 Steel with Fe-Nb-B by TIG Welding Technique, *AIP Conference Proceedings* 1653, 2015, 020058.

- [26] Sujeet Kumar, Anil Kumar Das, Wear resistance and hardness properties of TiB_2 -Fe coating developed on AISI 1020 steel by tungsten inert gas (TIG) cladding, *Ceramics International*, 48, 2022, 30052-30065.
- [27] Sujeet Kumar and Anil Kumar Das, Evaluation of mechanical properties of TiB_2 - TiO_2 ceramic composite coating on AISI 1020 mild steel by TIG cladding, *Eng. Res. Express*, 4, 2022, 015034.

Nanotechnology and Architecture: Applications and Potential of Nanocomposites

Doğu Ramazanoğlu¹

Abstract

The book chapter provides an overview of the use of nanocomposites in architecture. It starts with an introduction that explains how architecture has always reflected the technological advances of its time and how nanocomposites have emerged as a promising field for advancing the capabilities of the architecture. The chapter then provides an overview of nanocomposites, including their properties and manufacturing methods. The properties of nanocomposites are highly dependent on the type of filler and matrix material used, as well as the manufacturing process. The chapter then delves into the specific applications of nanocomposites in architecture, including structural, energy-efficient, and aesthetic applications. The use of nanocomposites in these applications can lead to reduced material usage, increased design flexibility, improved structural performance, and improved energy efficiency. Through case studies, the chapter examines successful examples of the use of nanocomposites in architecture and discusses their advantages and limitations. Finally, the chapter explores the potential future applications of nanocomposites in architecture and discusses the challenges and opportunities for research and development in this exciting field. The book chapter aims to provide architects, researchers, and engineers with a comprehensive overview of the potential of nanocomposites in architecture, exploring new avenues for building design and creating more sustainable, efficient, and visually appealing structures.

1. Introduction

Architecture has always reflected the technological advances of its time. From the development of the arch in ancient Rome to the use of reinforced concrete in the early 20th century, each new material and technique has

¹ Dr. Doğu Ramazanoğlu, Duzce University, doguramazanoglu@duzce.edu.tr, ORCID ID:0000-0002-6356-5792

allowed architects to push the boundaries of what is possible in building design (Fig. 1)¹. In recent years, nanotechnology has emerged as one of the most promising fields for advancing the capabilities of architecture. Specifically, nanocomposites, a class of materials consisting of a nanoscale filler dispersed in a matrix material, have opened exciting possibilities for improving buildings' performance, sustainability, and aesthetics.



Figure 1. Hera II in Paestum, constructed around 460 B.C.E during the Classical period, is a notable illustration of post and lintel architecture made of tufa and measuring 24.26 x 59.98 meters.¹

Nanocomposites have unique properties that make them ideal for use in architectural applications. For example, their small size and high surface area-to-volume ratio give them remarkable strength, stiffness, and other desirable mechanical properties^{2,3}. They also offer a high degree of tunability, meaning that their properties can be tailored to specific applications. These features make nanocomposites attractive for a wide range of structural, energy-efficient, and aesthetic applications in architecture⁴.

The potential of nanocomposites in architecture has already been demonstrated in several successful applications, ranging from energy-efficient windows to fire-resistant coatings⁵. However, there is still much

to be learned about the properties and behavior of these materials, as well as their optimal methods of manufacture and implementation³. This book chapter aims to provide an overview of the current state of the art in the use of nanocomposites in architecture, with a particular focus on their potential applications and future directions for research.

In the following sections, we will define nanocomposites and explore their properties and manufacturing methods. We will then delve into their specific applications in architecture, including structural, energy-efficient, and aesthetic applications. Through case studies, we will examine successful examples of the use of nanocomposites in architecture and discuss their advantages and limitations. Finally, we will explore the potential future applications of nanocomposites in architecture and discuss the challenges and opportunities for research and development in this exciting field.

Overall, this book chapter seeks to provide architects, researchers, and engineers with a comprehensive overview of the potential of nanocomposites in architecture. By understanding the unique properties and advantages of these materials, we can explore new avenues for building design and create more sustainable, efficient, and visually appealing structures.

2. Overview of Nanocomposites

Nanocomposites are a class of materials that have gained considerable attention in recent years due to their unique properties and potential for a wide range of applications. They are composed of two or more materials, with at least one of them being a nanoscale filler dispersed in a matrix material^{5,6}. The filler can be in the form of particles, fibers, or tubes, and can range in size from a few nanometers to a few hundred nanometers (Fig. 2)⁷.

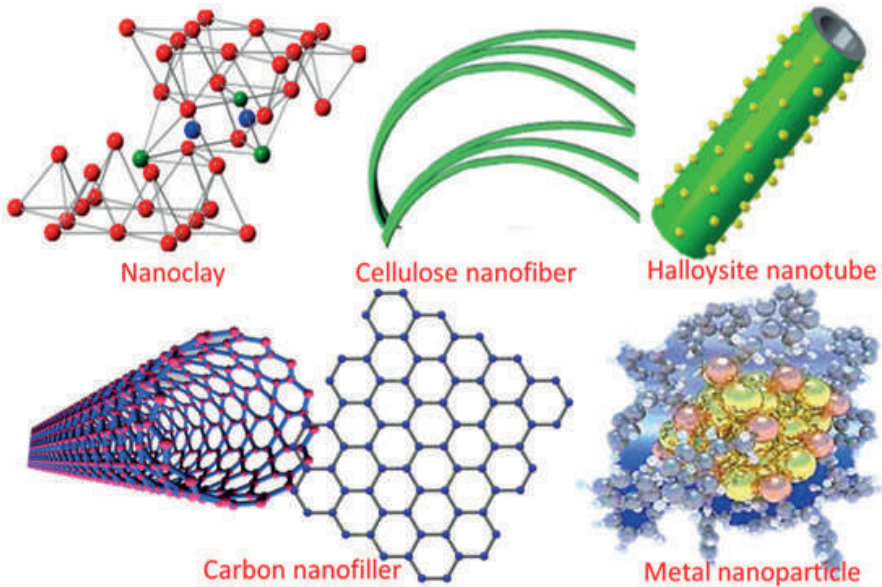


Figure 2. Nanofillers⁷

The properties of nanocomposites are highly dependent on the type of filler and matrix material used, as well as the manufacturing process. Generally, nanocomposites exhibit enhanced mechanical, thermal, and electrical properties compared to their bulk counterparts. This is due to the high surface area-to-volume ratio of the nanoscale filler, which allows for stronger interactions between the filler and matrix material⁸. In addition, nanocomposites can exhibit improved barrier properties, such as gas permeability, due to the small size of the filler particles⁹.

The manufacturing methods of nanocomposites can vary depending on the type of filler and matrix material used¹⁰. One common method is solution-based synthesis, which involves dissolving both the filler and matrix material in a solvent (Fig. 3)^{11,12} and then allowing them to react and form a composite material¹¹. Another method is melting blending, where the filler is added to the matrix material during the melting process^{13,14}. Other methods include in-situ polymerization and electrospinning¹⁵.

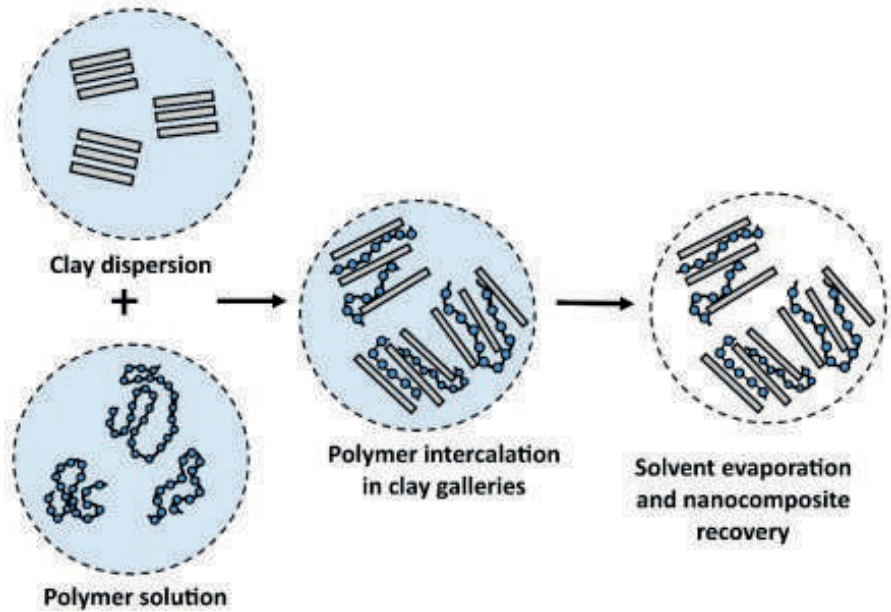


Figure 3. Polymer clay nanocomposites prepared by solution mixing^{11,12}.

The choice of manufacturing method can have a significant impact on the properties of the resulting nanocomposite. For example, solution-based synthesis can result in better dispersion of the filler particles, while melt blending can result in larger agglomerates. In-situ polymerization can allow for better control of the final composition and structure of the nanocomposite, while electrospinning can produce nanofibers with high aspect ratios.

In conclusion, nanocomposites are a promising class of materials with unique properties and potential applications in a wide range of fields, including architecture. The properties of nanocomposites are highly dependent on the type of filler and matrix material used, as well as the manufacturing method. Understanding the properties and manufacturing methods of nanocomposites is essential for exploring their potential applications in architecture and other fields.

3. Nanocomposites in Architectural Applications

Nanocomposites have shown tremendous potential for a wide range of architectural applications. They offer unique combinations of properties, such as high strength and low weight, that make them ideal for use in structural, energy-efficient, and aesthetic applications¹⁶.

One major area of interest for nanocomposites in architecture is in structural applications. Nanocomposites can be used to create lightweight, high-strength materials that can be used in a variety of building components, such as beams, columns, and walls. The use of nanocomposites in structural applications can lead to reduced material usage, increased design flexibility, and improved structural performance (Fig. 4)¹⁷. In addition, the high strength-to-weight ratio of nanocomposites can help to reduce the overall weight of a building, leading to lower construction costs and improved energy efficiency.

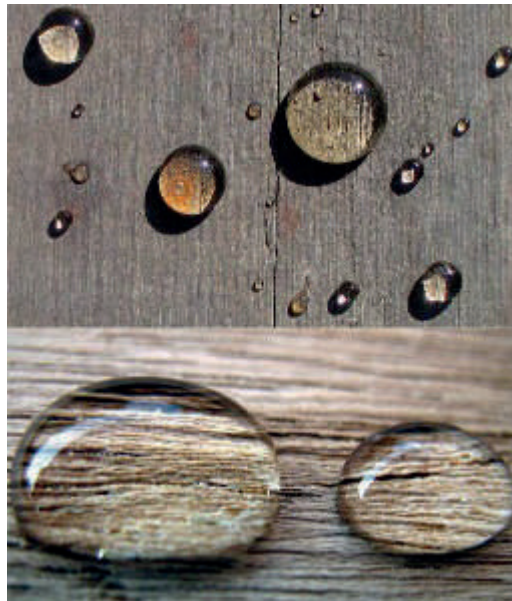


Figure 4. Hidrophobic wood¹⁷.

Energy-efficient applications of nanocomposites are also of great interest in architecture. Nanocomposites can be used to create materials with improved insulation properties, reducing the energy required to heat and cool buildings. For example, nanocomposites can be used to create insulating materials that are thinner and lighter than traditional insulation materials, while still providing the same or better insulation properties. Nanocomposites can also be used in the creation of energy-efficient windows (Fig. 5)¹⁷, which can help to reduce heat loss in the winter and heat gain in the summer.

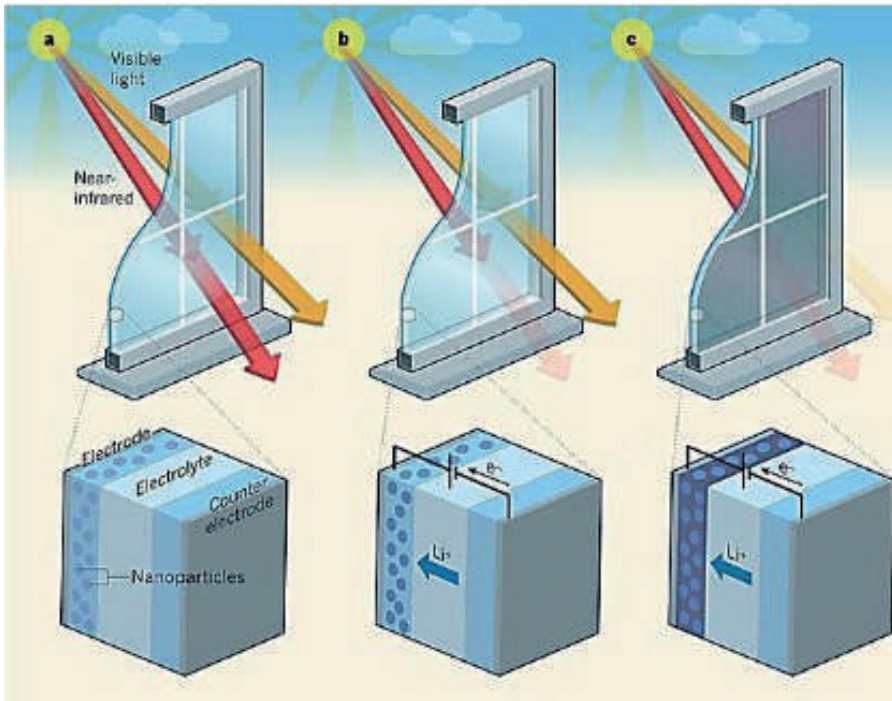


Fig. 5 Electro-chromic windows¹⁷.

Finally, nanocomposites can be used in aesthetic applications in architecture. Nanocomposites can be used to create unique and visually striking building materials, such as transparent facades, iridescent coatings, and light-reflecting surfaces. These materials can be used to create buildings that are both functional and visually stunning, adding to the overall aesthetic appeal of a building (Fig. 6)¹⁷.



Figure 6. Transparent wall and concrete¹⁷.

In conclusion, nanocomposites have the potential to revolutionize the way we design and construct buildings. Their unique properties make them ideal for use in structural, energy-efficient, and aesthetic applications. As research in nanocomposites continues, we can expect to see an increasing number of applications in architecture and other fields.

4. Case Studies of Nanocomposites in Architecture

Nanocomposites are becoming increasingly popular in the field of architecture due to their unique properties and benefits. These materials offer a high-performance solution for modern construction projects, providing superior strength, durability, and other favorable characteristics. This article will explore some case studies of successful applications of nanocomposites in architecture, along with their advantages and disadvantages.

One example of a successful application of nanocomposites in architecture is the Tianjin Eco-City Sports Center in China (Fig.7)^{17,18,19}. The building's exterior façade is made of a nanocomposite material that provides excellent insulation, weather resistance, and fire resistance. The nanocomposite also has a high strength-to-weight ratio, which helped to reduce the weight of the building, resulting in lower construction costs.



Figure 7. Tianjin Olympic Centre Stadium¹⁹.

Another notable example is the Al Bahar Towers in Abu Dhabi, UAE (Fig. 8)²⁰. The building's façade is made of a responsive shading system, which consists of a series of triangular panels made of nanocomposite material. The panels open and close automatically in response to the sun's position, providing shading to the interior spaces and reducing energy consumption for cooling.

The advantages of nanocomposites in architecture include their exceptional strength and durability, resistance to environmental factors, and lightweight^{21,22}. These properties make them ideal for use in high-rise buildings and structures that require superior performance. Nanocomposites also offers the ability to create unique and innovative designs, as they can be easily molded into complex shapes and forms.



Figure 8. Al Bahar Towers Responsive Facade / Aedas²⁰.

However, there are also potential disadvantages to using nanocomposites in architecture^{21,22}. The materials can be costly, which can add to the overall cost of construction. Additionally, some nanocomposites may require specialized installation techniques, which can increase the complexity of construction and prolong the project timeline. There may also be concerns about the long-term environmental impact of these materials, particularly in terms of their recycling and disposal.

In conclusion, nanocomposites offer an innovative and high-performance solution for modern architecture projects. Successful applications of these materials can be seen in buildings such as the Tianjin Eco-City Sports Center and Al Bahar Towers. However, there are both advantages and disadvantages to consider when choosing to use nanocomposites in construction. It is important for architects, designers, and construction professionals to carefully evaluate the suitability of these materials for each project and weigh the benefits against the potential costs and challenges.

5. Potential Future Applications of Nanocomposites in Architecture

Nanocomposites have demonstrated great potential for applications in architecture, and as research in this field continues, new innovations and emerging trends are being developed. In this paper, we will discuss potential future applications of nanocomposites in architecture, emerging trends and innovations, and potential challenges and limitations.

One potential future application of nanocomposites in architecture is the development of self-healing materials²³. These materials can repair damage to themselves, making them highly desirable for use in structures that are difficult to access for repair. Researchers are exploring the use of nanocomposites for self-healing applications (Fig. 9)^{23,24}, such as the incorporation of nanoparticles that can react with certain chemicals to form new bonds and repair damage.

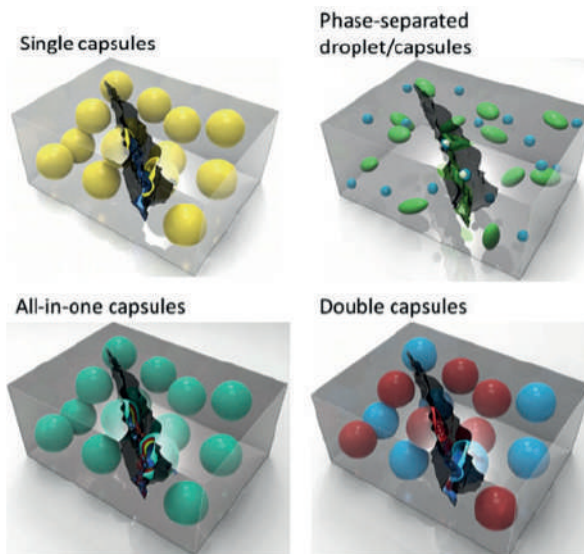


Figure 9. Four different types of capsule-based self-healing composites^{23,24}.

Another potential application of nanocomposites in architecture is in the development of energy-efficient materials²⁵. Nanocomposites can be designed to have specific properties, such as high thermal insulation, which can help reduce energy consumption in buildings. Research is currently underway to develop nanocomposites that can regulate temperature, capture and store energy, and convert sunlight into electricity.

Emerging trends and innovations in nanocomposites for architecture include the use of 3D printing and advanced manufacturing techniques²⁶. Nanocomposites can be printed in complex geometries and shapes, allowing for the creation of highly customized structures. Additionally, new materials are being developed that can be programmed to respond to environmental stimuli, such as temperature or humidity, to adapt to changing conditions.

However, there are also potential challenges and limitations to the use of nanocomposites in architecture. One major challenge is the cost of these materials, which can be significantly higher than traditional building materials. Another challenge is the potential environmental impact of nanocomposites, as their long-term effects on the environment are not yet fully understood.

In conclusion, nanocomposites offer great potential for future applications in architecture, including self-healing materials and energy-efficient designs. Emerging trends and innovations in nanocomposites, such as 3D printing and responsive materials, will continue to drive advancements in this field. However, challenges such as cost and environmental impact must be carefully considered and addressed as nanocomposites are further developed and integrated into the built environment.

6. Conclusion

In conclusion, nanocomposites have emerged as a promising class of materials for advancing the capabilities of architecture, offering unique properties such as strength, stiffness, and tunability, as well as improved barrier and insulation properties. Their potential applications in architecture range from structural components to energy-efficient materials and aesthetic coatings. The choice of nanocomposite filler and matrix material, as well as the manufacturing method used, can significantly impact their properties and behavior. Therefore, continued research and development are necessary to fully understand the potential of nanocomposites in architecture and to explore new avenues for building design, leading to more sustainable, efficient, and visually appealing structures.

References

1. Khan Academy. (n.d.). Roman architecture (article) | Ancient Rome | Khan Academy. Retrieved May 10, 2023, from <https://www.khanacademy.org/humanities/ancient-art-civilizations/roman/x7e914f5b:beginner-guides-to-roman-architecture/a/roman-architecture>
2. Lasenko, I., Sanchaniya, J. V., Kanukuntla, S. P., Ladani, Y., Viluma-Gudmona, A., Kononova, O., Lusic, V., et al. (2023). The Mechanical Properties of Nanocomposites Reinforced with PA6 Electrospun Nanofibers. *Polymers*, 15(3), 673. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/polym15030673>
3. Idumah, C. I., & Obele, C. M. (2021). Understanding interfacial influence on properties of polymer nanocomposites. *Surfaces and Interfaces*, 22, 100879. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100879>
4. Armentano, I., Gigli, M., Morena, E., Argentati, C., Torre, L., & Martino, S. (2018). Recent Advances in Nanocomposites Based on Aliphatic Polyesters: Design, Synthesis, and Applications in Regenerative Medicine. *Applied Sciences*, 8(9), 1452. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/app8091452>
5. Idumah, C. I., Hassan, A., Ogbu, J., Ndem, J. U., & Nwuzor, I. C. (2019). Recently emerging advancements in halloysite nanotubes polymer nanocomposites. *Composite Interfaces*, 26(9), 751-824. <https://doi.org/10.1080/09276440.2018.1534475>
6. Romero-Fierro, D., Bustamante-Torres, M., Bravo-Plascencia, F., Esquivel-Lozano, A., Ruiz, J.-C., & Bucio, E. (2022). Recent Trends in Magnetic Polymer Nanocomposites for Aerospace Applications: A Review. *Polymers*, 14(19), 4084. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/polym14194084>
7. Kausar, A. (2021). Green Nanocomposites for Energy Storage. *Journal of Composites Science*, 5(8), 202. <https://doi.org/10.3390/jcs5080202>
8. Nilagiri Balasubramanian, K. B., & Ramesh, T. (2018). Role, effect, and influences of micro and nano-fillers on various properties of polymer matrix composites for microelectronics: A review. *Polymers for Advanced Technologies*, 29(6), 1568–1585. Portico. <https://doi.org/10.1002/pat.4280>
9. Wolf, C., Angellier-Coussy, H., Gontard, N., Doghieri, F., & Guillard, V. (2018). How the shape of fillers affects the barrier properties of polymer/non-porous particles nanocomposites: A review. *Journal of Membrane Science*, 556, 393-418. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.03.085>
10. Bustamante-Torres, M., Romero-Fierro, D., Arcentales-Vera, B., Pardo, S., & Bucio, E. (2021). Interaction between Filler and Polymeric Matrix in Nanocomposites: Magnetic Approach and Applications. *Polymers*,

- 13(17), 2998. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/polym13172998>
11. Mtibe, A., Mokhothu, T. H., John, M. J., Mokhena, T. C., & Mochane, M. J. (2018). Fabrication and Characterization of Various Engineered Nanomaterials. *Handbook of Nanomaterials for Industrial Applications*, 151–171. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-813351-4.00009-2>
 12. Hernández-Hernández, K. A., Illescas, J., Díaz-Nava, M. C., Muro-Urisa, C. R., Martínez-Gallegos, S., & Ortega-Aguilar, R. E. (2016). Polymer-clay nanocomposites and composites: Structures, characteristics, and their applications in the removal of organic compounds of environmental interest. *Medicinal Chemistry*, 6, 201-210.
 13. Rane, A. V., Kanny, K., Abitha, V. K., & Thomas, S. (2018). Methods for Synthesis of Nanoparticles and Fabrication of Nanocomposites. *Synthesis of Inorganic Nanomaterials*, 121–139. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-101975-7.00005-1>
 14. Utracki, L. A. (2004). *Clay-containing polymeric nanocomposites (Vol. 1)*. iSmithers Rapra Publishing.
 15. Chen, D., Miao, Y. E., & Liu, T. (2013). Electrically conductive polyaniline/polyimide nanofiber membranes prepared via a combination of electrospinning and subsequent in situ polymerization growth. *ACS applied materials & interfaces*, 5(4), 1206-1212.
 16. Silvestre, J., Silvestre, N., & de Brito, J. (2016). Polymer nanocomposites for structural applications: Recent trends and new perspectives. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 23(11), 1263–1277. <https://doi.org/10.1080/15376494.2015.1068406>
 17. Mohamed, H. A. (2020). Applications of Nanomaterials in Architectural Design. *Resourceedings*, 2(1), 197–206. <https://doi.org/10.21625/resourceedings.v2i1.740>
 18. Li, Y., Commenges, H., Bordignon, F., Bonhomme, C., & Deroubaix, J.-F. (2019). The Tianjin Eco-City model in the academic literature on urban sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 213, 59–74. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.018>
 19. Sportsmatik. (n.d.). Tianjin Olympic Centre Stadium: History, Capacity, Events & Significance. Retrieved May 11, 2023, from <https://sportsmatik.com/sports-corner/sports-venue/tianjin-olympic-centre-stadium>.
 20. ArchDaily. (2012, August 29). Al Bahar Towers Responsive Facade / Aedas. Retrieved May 11, 2023, from <https://www.archdaily.com/270592/al-bahar-towers-responsive-facade-aedas>.
 21. Liu, S., Qin, S., Jiang, Y., Song, P., & Wang, H. (2021). Light-weight high-performance carbon-polymer nanocomposites for electromagnetic interference shielding. *Composites Part A: Applied Sci-*

- ence and Manufacturing, 145, 106376. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106376>
22. Arslan Selçuk, S., & Ayçam, İ. (2018). Nanotechnology in Built Environment: Pros and Cons of Nanomaterial Usage in Architecture. *Proceedings of 3rd International Sustainable Buildings Symposium (ISBS 2017)*, 269–281. https://doi.org/10.1007/978-3-319-63709-9_21
 23. Wang, Y., Pham, D. T., & Ji, C. (2017). *Nanocomposites for Extrinsic Self-healing Polymer Materials*. Springer Series on Polymer and Composite Materials, 243–279. https://doi.org/10.1007/978-3-319-50424-7_9
 24. Zhu, D. Y., Rong, M. Z., & Zhang, M. Q. (2015). Self-healing polymeric materials based on microencapsulated healing agents: From design to preparation. *Progress in Polymer Science*, 49–50, 175–220. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2015.07.002>
 25. Hussain, A., & Arif Kamal, M. (2015). Energy Efficient Sustainable Building Materials: An Overview. *Key Engineering Materials*, 650, 38–50. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.650.38>
 26. Azlin, M., Ilyas, R., Zuhri, M., Sapuan, S., Harussani, M., Sharma, S., Nordin, A., et al. (2022). 3D Printing and Shaping Polymers, Composites, and Nanocomposites: A Review. *Polymers*, 14(1), 180. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/polym14010180>

Farklı Mühendislik Yaklaşımlarıyla Kompozit Malzemeler- II

*Composite Materials with Different
Engineering Approaches- II*

Editör: Dr. Öğr. Üyesi Yalçın Boztoprak