

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA ARAŞTIRMA YÖNTEMLERİ VE YENİLİKÇİ UYGULAMALAR



EDİTÖR
PROF. DR. MURAT MAKARACI



9 786258 513141

DOI:10.5281/zenodo.18032843

Makine Mühendisliği Alanında Araştırma Yöntemleri ve Yenilikçi Uygulamalar

Editör

Prof. Dr. Murat Makaracı

İmtiyaz Sahibi
Platanus Publishing®

Editör
Prof. Dr. Murat Makaracı

Kapak & Mizanpaj & Sosyal Medya
Platanus Yayın Grubu

Birinci Basım
Aralık, 2025

Yayımcı Sertifika No
45813

ISBN
978-625-8513-14-1

©copyright
Bu kitabın yayım hakkı Platanus Publishing'e aittir. Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin alınmadan hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Adres: Natoyolu Cad. Fahri Korutürk Mah. 157/B, 06480, Mamak,
Ankara, Türkiye.

Telefon: +90 312 390 1 118
web: www.platanuspublishing.com
e-mail: platanuskita@gmail.com



Platanus Publishing®

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1	5
----------------------	----------

Kendi Kendini Onaran Malzemeler: Otomotiv Uygulamaları ve Yenilikler

Mehtap Ağırgan

BÖLÜM 2	27
----------------------	-----------

Derin Çekme İşleminde Limit Çekme Oranının Önemi ve Optimizasyonu

Cebeli Özek

BÖLÜM 3	49
----------------------	-----------

Parçacık Takviyeli Alüminyum Kompozitler: Sıvı Tabanlı Üretim Yöntemlerinden Yarı-Katı Proseslere

Nilhan Ürkmez Taşkın & M. Emin Yurci

BÖLÜM 1

Kendi Kendini Onaran Malzemeler: Otomotiv Uygulamaları ve Yenilikler

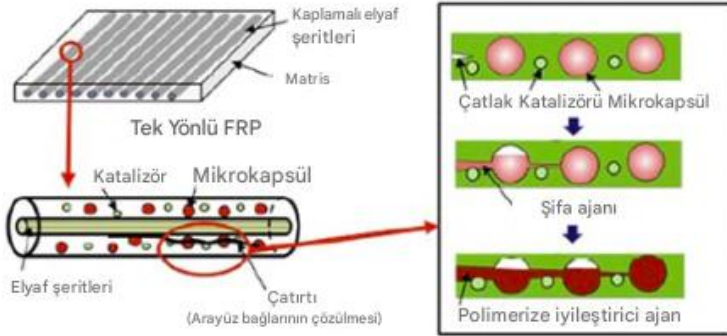
Mehtap Ağırgan¹

¹ Dr. Öğretim Üyesi, Kırklareli Üniversitesi Lüleburgaz MYO
ORCID: 0000-0002-1381-8624

1. GİRİŞ

İnşaat, ulaşım ve elektronik gibi çeşitli endüstrilerde, araştırma ve geliştirmenin temel hedeflerinden biri daha dayanıklı ve sürdürülebilir yeni malzemeler yaratmaktır. Bu malzemeler, içlerinde oluşan hasarı veya kırıkları onarma yeteneğine sahiptir. Canlıların, zarar veya yaralanmaya tepki olarak kendilerini onarabildikleri doğal iyileşme yetenekleri, kendi kendini onaran malzemelerin geliştirilmesine ilham kaynağı olmuştur. Metaller, seramikler, polimerler ve bunların kompozitleri gibi malzemeler normal çalışmaları sırasında mekanik, termal, ultraviyole (UV) radyasyon, kimyasal veya bu faktörlerin bir kombinasyonu olarak hasar görürler (Vahabi H, Sonnier R, Ferry L, 2015). Malzemelerdeki hasarlar sadece yapıların bozulmasına neden olmakla kalmaz, aynı zamanda mekanik, termal ve elektriksel özelliklerini de değiştirebilir (Blaiszik BJ, Kramer SLB, Olugebefola SC, Moore JS, Sottos NR, 2010). Bu nedenle mühendisler, hasar verildiğinde otonom veya otonom olmayan bir şekilde işlevlerini iyileştirme ve yenileme yeteneğine sahip yeni malzemeler tasarlamaya çalışmaktadır. İlk kez 1970 yılında Malinskii ve ark. Polivinil alkol örneklerinde çatlağın kendi kendini iyileştirme özelliğini araştırmışlardır. (Malinskii YM, Prokopenko VV, Ivanova NA, Kargin VA, 1970). Bundan sonra kendi kendini iyileştiren malzemeler ilgi çekici bir konu haline gelmiş ve çapraz bağlı polimer sistemlerde (1981) ve termoplastikte (1980) kendi kendini onarma üzerine binlerce araştırma başlamıştır (Wool,1980; Wool, ve O'connor,1981). 1994 yılında Dry, çimento matrislerindeki çatlağı onarmak için kendi kendini iyileştirme özelliklerini kullanmıştır (Dry,1994). 2001 yılında White ve ark. akıllı iyileştirilebilir malzemelerde yeni bir çağın açılmasına öncülük etmişlerdir (White, ve diğerleri, 2001). Bu tür malzemelerin en müthiş özelliklerinden biri, dış mekanik yükler tarafından hasara uğratıldığında işlevlerini yenileme kapasitesidir (Mobaraki, Ghaffari ve Mozafari, 2020). Kendi kendini iyileştiren kompozit malzemeler, hasardan sonra yük aktarma yeteneklerini önemli ölçüde geri kazanma yeteneğine sahiptir ve bu malzemelerin, yüksek aktif izleme veya harici onarım maliyetleri olmadan güvenliğe önemli ölçüde katkıda bulunmaları beklenmektedir. Kendi kendini onaran malzemeler, aşınma ve yıpranma, dış kuvvetler veya çevresel faktörlerden kaynaklanan hasarı otonom olarak onarma yetenekleri nedeniyle son yirmi yıldır kapsamlı bir şekilde incelenmektedir. Kendi kendini onaran malzemeler kavramı 1998'de, hasardan sonra bir polimer ağının mekanik özelliklerini geri kazandırmak için geri dönüşümlü kovalent bağların kullanımını öneren Ikehara ve Takahashi tarafından ortaya atıldı (Chaudhary, Dikshit, Kumar, Sonia, Pathak, Saxena, Salmaan, 2023; Srivastava, Usha, Al-Alawachi, Kansal, Aravinda, Arora, 2024). Polimer matrisli kompozit elyaf yapılarının, darbe yüklemesi, gerilmeler ve ekolojik bozulma tarafından üretilen delaminasyon çatlağı olduğu varsayılmaktadır (O'Brien, 1994;

Heslehurst, 1997). Katmanlar arasındaki delaminasyon çatlağı, geliştirilen polimerik kompozitlerin sıkıştırma mukavemeti ve yorulma ömrü gibi mekanik özelliklerini ciddi şekilde azaltmıştır (Ashby MF, Gibson, Wegst, Olive, 1995; Williams, Dreyer, Bielawski CW. (2008); Trask RS, Williams HR, Bond IP. (2007). Ayrıca, yapıştırılan kompozit malzemeler delaminasyon hasar etkisine sahip olduğundan, bu malzemelerin çekme dayanımı ve yorulma ömrü azalır. Polimer kompozitte delaminasyon çatlaklarının başlamasını ve gelişmesini yok etmek için sertleştirilmiş reçine, termoplastik serpiştirme ve 3D dokuma ve iğneleme ile güçlendirme dahil olmak üzere çeşitli teknikler mevcuttur. Bu teknikler, katmanlara ayrılma çatlaklarının başlamasına karşı koymak için kullanılsada, bileşen arızalanana kadar çatlakların büyümesi onarılmadan kalır. Kendini iyileştirmede otonom onarım tekniği, düşük viskoziteli iyileştirici bir sıvı ajan ve katalizör içeren küçük kapların polimer matris içine dağılması yoluyla elde edilen delaminasyon hasarı sorununa bir çözümdür (Keller, Blaiszik, White, Sottos., 2007; Wu, Meure, Solomon, 2008). Kademeli olarak, kendi kendini iyileştirme süreci, kapların kırılmasına ve ardından kaplardan iyileştirici sıvının çatlağa boşaltılmasına yol açan delaminasyon çatlağının büyümesinde başlar. İyileştirici ajanın bu depolanmış sıvısı, hasarı çözmek için bir polimer kapsül görevi görür. Şekil 1 kendi kendini iyileştirme sürecinin ilkesini göstermektedir. Polimerizasyon işlemi, katalizörün iyileştirici ajan ile reaksiyona girmesiyle çatlağın içinde yapılır ve daha sonra kompozit malzemenin mukavemetini geri kazanmak için kullanılır. İyileştirici ajan ve katalizörün uygun seçimi ve dağılımına bağlı olarak, malzeme özelliklerinin onarımı ve geri kazanımı sağlanır (Kessler, 2007). Kendi kendini iyileştirme sürecinin performanslarının esas olarak, 240°C ila 280°C arasındaki yüksek ortam sıcaklığı koşullarında iyileştirici ajanın aktivasyonuna bağlı olduğuna dikkat çekilmektedir (Wang, Pham, Zhang, Li, Ji, Liu, ve diğerleri, 2016).



Şekil 1. Kendini Kademeli İyileştirme Süreci (Kessler, 2007).

Genel olarak, kendi kendini iyileştirme sürecinde, iyileştirici maddenin sıvısını depolamak için küçük boyutlu kapsüller kullanıldı. Bu tür bir kapsülün boyutu tipik olarak 10- 500 μm 'dir ve yaklaşık %2 ila %20 oranında polimer matrisine dağılmıştır (Mauldin, Kessler, 2010). Bu tür bir kapsül, kendi kendini iyileştiren kompozitin üretimi sırasında oluşan kuvveti kaldırarak kadar sağlamdır ve ayrıca kompozitte üretildikten sonra kırığı onarmak için çekirdek iyileştirici ajanı serbest bırakmak üzere kırılmalıdır. Tüm bu uygulamalarda çevredeki polimer malzemeye iyi yapışma özellikleri gereklidir. Ancak kapsül yönteminin kendi kendini iyileştirme sürecindeki uygulamalarında, mukavemeti geri kazandırmak ve çatlakları onarmak için az miktarda kendi kendini iyileştiren sıvının depolanması ve bunların tek kullanımlık olması gibi bazı dezavantajları vardır (Brown, White, and Sottos, 2005; Chipara, Chipara, Shansky, Zaleski, 2009). Polimerik kompozitlerdeki hasarı onarmak için daha fazla miktarda iyileştirici sıvıyı depolamak ve taşımak için içi boş fiberlerin uygulanması gündeme gelmiştir (Xiao, Yuan, Rong, Zhang, 2009; Keller, White, and Sottos, 2007; Andreeva, Shchukin, 2008; Kumar, Stephenson, Murray, 2006; Sauvant-Moynot, Gonzales, Kittel, 2008). İçi boş lifler, daha fazla miktarda iyileştirici ajan depolamak için kullanılan ve polimer matris içine dağılmış uzun damarlardır.

1.1. Kendi Kendini İyileştiren Polimer Prensibi ve Mekanizması

Kendi kendini iyileştirme, insan müdahalesi olmadan herhangi bir işlevsiz cihazı veya sistemi algılama ve kendisini normal durumuna geri döndürmek için gerekli ayarlamaları yapma yeteneğine sahip bir yöntem olarak tanımlanmaktadır. Kendi kendini iyileştirme yönteminin, malzemenin mekanik veya işlevsel performansını geri kazanmaya yardımcı olan ürünlerdeki veya sistemlerdeki mikro çatlakları tespit etmesi ve onarması beklenmektedir. Kendi kendini onaran malzemeler, içsel özellikler veya gömülü iyileştirme ajanları aracılığıyla hasarı otonom olarak onarmak üzere tasarlanmıştır. Bu mekanizmaları anlamak, otomotiv uygulamalarını ve etkinliklerini değerlendirmek için çok önemlidir.

1.1.1 İçsel Kendiliğinden İyileşme

İçsel kendi kendine iyileşen malzemeler, harici müdahale olmadan otonom onarımı mümkün kılan doğal özelliklere sahiptir. Bu malzemeler genellikle geri dönüşümlü kimyasal bağlara veya polimer zincir hareketliliğine dayanır.

- **Geri Dönüşümlü Kovalent Bağlar:** Bazı polimerler, ısı veya ışık gibi uyarılara yanıt olarak kırılabilen ve yeniden oluşabilen bağlarla tasarlanmıştır. Örneğin, Diels-Alder reaksiyonları, malzeme ısıtıldığında iyileşmeyi kolaylaştırabilir ve bağların yeniden oluşmasına ve çatlakların kapanmasına olanak tanır.

- **Supramoleküler Polimerler:** Bu malzemeler, hidrojen bağı, iyonik etkileşimler veya π - π istiflemesi gibi kovalent olmayan etkileşimler kullanır. Bir çatlak oluştuğunda, bu etkileşimler polimer zincirlerinin yeniden hizalanmasını ve hasarı otonom olarak iyileştirmesini sağlar.

1.1.2 Dışsal Kendiliğinden İyileşme

Dışsal kendi kendine iyileşen malzemeler, malzemeye gömülü mikro kapsüller, damar ağları veya içi boş lifler içinde iyileştirici ajanlar içerir. Malzemeye verilen hasar, bu ajanların salınmasını tetikleyerek iyileşme sürecini başlatır.

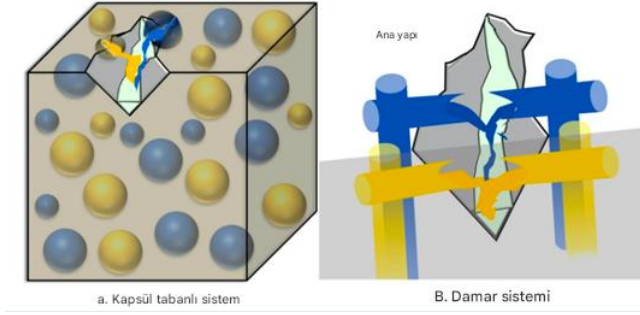
- **Mikro kapsüller:** Bu minik kapsüller, çatlakların oluşumu üzerine salınan bir iyileştirici ajan içerir. İyileştirici ajan daha sonra çatlağı kapatmak için malzeme içindeki bir katalizörle etkileşime girer.

- **Damar Ağları:** Bu ağlar, iyileştirici ajanlarla dolu birbirine bağlı kanallardan oluşur. Bir çatlak bir kanalla kesiştiğinde, iyileştirici ajan salınır ve çatlağa akarak iyileşme sürecini başlatır.

- **İçi Boş Lifler:** Damar ağlarına benzer şekilde, bu lifler hasar üzerine salınan ve çatlakların onarılmasını ve malzemenin bütünlüğünün geri kazanılmasını sağlayan iyileştirici ajanlar içerir.

Dışsal mekanizmada, kendi kendini iyileştirme yaklaşımı, kapsüllenmiş veya vasküler ağda olabilen, kasıtlı olarak eklenen bir dışsal iyileştirici maddenin varlığı yoluylaadır. Hasar meydana geldikçe, bileşen, kapsül veya vasküler ağ parçalanma ve iyileştirici maddeleri hasarlı bölgelere salma eğilimindedir. Ayrıca, iyileştirici maddeler ve katalizörler dört farklı şekilde izole edilebilir: kapsül katalizörü, çok kanallı, gizli işlevsellik ve faz ayrılmış. Mikro kapsül çapı ve yüzey morfolojisi, kapsülün yırtılma davranışını etkiler ve iyileştirici madde serbest bırakılır (Dhanasekaran, Reddy ve Kumar, 2018)).

Ancak, kapsüllenmiş yöntemin belirli dezavantajları vardır, çünkü sadece bir kez iyileşmeye izin verir, kapsül kırılır ve iyileştirici madde serbest bırakılır. Öte yandan, vasküler kendi kendini iyileştirme sistemleri, iyileştirici maddelerin ve katalizörlerin kılcal damarlar veya içi boş kanallar şeklinde ağlarda tutulduğu çoklu iyileşme reaksiyonları sunar. Restoratif madde, ince nano boyutlu veya mikro boyutlu bir vasküler tüp ağından pompalanan bir ağ damarına veya içi boş kanala gömülür ve daha sonra iyileştirici madde mikro çatlakların ortaya çıkması üzerine serbest bırakılır. Yıllar süren keşifler boyunca, kendi kendini iyileştiren vasküler sistemler 2B'den 3B birbirine bağlı ağlara geliştirildi, bu da kendi kendini iyileştiren maddenin akışkanlığını ve kompozitin mekanik özelliklerini artırır. Özellikle, vasküler kendi kendini iyileştirme yöntemi, bir iyileştirici maddeye ihtiyaç olarak tanımlanan, ancak farklı yaklaşımlarla, kapsül tabanlı yöntemle benzer. Gömülü ve vasküler yöntemler için iyileşme mekanizmaları Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. (a) Mikro kapsül ve (b) Vasküler ağ yoluyla dışsal mekanizma. (NikMdNoordinKahar, Osman, Alosime, Arsat, Mohammad Azman, Syamsir, Itam, Abdul Hamid, 2021)

Birçok araştırmacı kapsüllenmiş ve vasküler kendi kendine iyileşmenin gelişimini araştırmıştır. Fernando ve diğerleri (2019), poli(üre-formaldehit-melamin) mikro kapsüllerinde epoksi ester reçinesi kullanarak bir epoksi kendi kendine iyileşen kaplama geliştirdiler. Doldurulmuş mikro kapsüller, üç katmanlı bir epoksi kaplama sistemine dahil edilmiştir. Mikro kapsülleri içeren kaplama sistemi, mekanik bir kusur tarafından zorlandığında önemli bir kendi kendine iyileşme etkisi gösterdi ve daha yüksek konsantrasyondaki (%15 ağırlık) mikro kapsüller, daha iyi korozyon önleyici performansla daha iyi kendi kendine iyileşme koruması sağlamaktadır (Cotting, Koebsch, Aoki, 2019).

Bunun dışında, içsel kendi kendini iyileştiren polimer malzemeler, (i) difüzyon ve polimerizasyon kontrol adımlarının olmaması nedeniyle işlevlerin hızlı kendi kendini iyileştirmesi ve (ii) moleküler ölçekte hassas geri dönüşümlü dinamik bağları nedeniyle düşük hacimli kusurları/çatlakları onarmada adaptasyon gibi çeşitli avantajlara sahiptir. İçsel kendi kendini iyileştirme, matris polimerinin moleküler etkileşimlerinin içsel geri dönüşümlülüğü yoluyla elde edilebilir ve bu da iyileştirici etkenlerin entegrasyonu ve uyumluluğu gibi karmaşık sorunlardan kaçınır. İçsel iyileştirme özelliklerine sahip malzemeler, elektriksel veya foto uyaranlar, ısı veya basınç veya maddelerin bir araya getirildiğinde tepkimesi gibi dış uyaranlar tarafından tetiklenir ve iyileşmelerini sağlar. İçsel kendi kendini iyileştirme için, moleküler mekanizmalar fiziksel etkileşimlerden ve/veya kimyasal etkileşimlerden meydana gelebilir. İyileşme süreci, moleküler düzeyde dinamik bağ etkileşimlerinin uyarlanması veya difüzyon ile etkileşimin formüle edilmesiyle elde edilir.

Dışsal mekanizmayla karşılaştırıldığında, içsel kendi kendini iyileştirme mekanizması hasarı onarmak için harici bir etkene ihtiyaç duymaz. Bu süreç, çok sayıda hasar veya iyileşmeden sonra çoklu ve tekrarlanabilir kendi kendini onarmaya olanak tanır. Bunun dışında, içsel kendi kendini iyileştiren polimer malzemeler, (i) difüzyon ve polimerizasyon kontrol adımlarının olmaması nedeniyle işlevlerin hızlı kendi kendini iyileştirmesi ve (ii) moleküler ölçekte hassas geri dönüşümlü dinamik bağları nedeniyle düşük hacimli

kusurları/çatlakları onarmada adaptasyon gibi çeşitli avantajlara sahiptir. İçsel kendi kendini iyileştirme, matris polimerinin moleküler etkileşimlerinin içsel geri dönüşümlülüğü yoluyla elde edilebilir ve bu da iyileştirici etkenlerin entegrasyonu ve uyumluluğu gibi karmaşık sorunlardan kaçınır. İçsel iyileştirme özelliklerine sahip malzemeler, elektriksel veya foto uyaranlar, ısı veya basınç veya maddelerin bir araya getirildiğinde tepkimesi gibi dış uyaranlar tarafından tetiklenir ve iyileşmelerini sağlar. İçsel kendi kendini iyileştirme için, moleküler mekanizmalar fiziksel etkileşimlerden ve/veya kimyasal etkileşimlerden meydana gelebilir. İyileşme süreci, moleküler düzeyden dinamik bağ etkileşimlerinin uyarlanması veya polimer zincirlerinin difüzyonu ve dolanması arasındaki etkileşimin formüle edilmesiyle elde edilir (Xu, Ding, Chen, Tan, Chen, Fu, 2020). Kimyasal bağ etkileşimine dayalı kendi kendini iyileştirme, kovalent ve kovalent olmayan bağ etkileşimleri olarak daha da sınıflandırılabilir.

2. KENDİ KENDİNİ İYİLEŞTİREN MALZEMELER

Kendi kendini iyileştirme özelliğine sahip malzemeler, malzemeyi orijinal özelliklerine geri döndürme yeteneğine sahiptir. Kendi kendini iyileştiren malzemeler polimerler, metaller, seramikler ve bunların kompozitleri olabilir. Kendi kendini iyileştiren malzemelerdeki dikkate değer ilerlemenin nedeni, malzemelerin güvenilirliğini, dayanıklılığını ve ömrünü iyileştirme olasılığıdır (Wool, 2008).

2.1. Polimerler

Polimer malzemeler, uygun işlenebilirlik, hafiflik ve her türlü atmosferik koşulda kimyasal kararlılık gibi avantajlarından dolayı mühendislik alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Polimerler çatlak şeklinde hasara karşı hassas olduğundan, birçok mühendislik araştırması kendi kendini iyileştirme özelliklerine sahip yeni polimer ve polimer kompozit tasarımına odaklanmıştır. Polimerik yapılar üzerindeki görünür veya saptanabilir hasarları onarmak için çok sayıda teknik geliştirilmiştir, ancak önemli ve pratik yaklaşımlar dışsal ve içsel kendi kendini iyileştirmedir.

Dışsal kendi kendini iyileştirme tekniği, damarların polimerik matrise eklenmesi için mikro kapsüller veya içi boş lifler içinde kendi kendini iyileştiren ajanların dahil edilmesine dayanır. Mikro kapsülasyon yaklaşımında, çatlak oluştuğunda ve kırılğan kapsülleri yok ettiğinde, düşük viskoziteli iyileştirici ajan hasar bölgesinde kapsülünür, çatlakları doldurur ve iyileştirir (Yuan, Yin, Rong, Zhang, 2008). Ek olarak, kapsüller iki şekle sahip olabilir: küresel ve silindirik; %83- %92 oranında sıvı iyileştirici ajan içeriğini ve üre-formaldehit polimerlerinden oluşan kapsülleri doldurabilme özelliğine sahiptirler (Van Tittelboom, De Belie, 2013; Brown, Kessler, Sottos, White, 2003; Murphy, Wudl, 2010). Bu yöntem sıklıkla spesifik çekirdek materyal türleri için uygundur ve mikro kapsülleme tekniğini seçmek için kapsül boyutu, kapsüllerin matris ile birleşme direnci ve kapsülleme etkinliği gibi farklı parametrelerin dikkate

alınması gerekir (Zhu, Rong, Zhang, 2015). İçi boş elyaf yaklaşımı, bir başka dışsal kendi kendini iyileştirme yöntemidir ve kılcal damarlara veya içi boş kanallara bir iyileştirici madde yerleştirmek olarak tanımlanır. Polimerik malzemelerde bütünleşik iyileştirici madde depolama kapasitesine sahip liflerin kullanılması, kompozitin mekanik özelliklerini etkileyip artırmanın yanı sıra hasarların kendi kendine onarılmasına da olanak sağlamıştır. Liflerle güçlendirilmiş bir polimerik kompozitin mekanik özellikleri, polimerin sertliğine, kompozit ve lifler arasındaki bağa, lif hacim fraksiyonuna ve kanal dağılımına ve tekdüzeliğine bağlıdır. İyileştirilmiş iyileştirme performansı için viskozite, yüzey ıslanabilirliği ve kimyasal reaktivite gibi bazı özelliklerin dikkate alınması gerekir (Su, Chen, 2017). Otonom olarak kendi kendini iyileştiren bir malzeme üretmenin en etkili yollarından biri, gizli bir kendi kendini iyileştirme işlevine sahip olan ve çoğunlukla bir dış uyaran tarafından tetiklenen modifiye edilmiş malzeme bazlı polimerdir (Zwaag, 2008).

Bir polimer sisteminde, yeniden büyüme, kopan polimer zincirlerini yeniden birleştiren mekanizmalar yoluyla elde edilir. Polimerik malzemelerdeki başarısızlık yüzeylerinin füzyon türleri iki ana gruba ayrılabilir: supramoleküler kimyayı içerenler ve moleküler kovalent bağları içeren reaksiyonlardır (Garcia, 2014).

Düşük moleküler ağırlıklı polimerler yüksek mobilitateye sahip olacağından, kendi kendini iyileştirme özelliğine sahiptirler, ancak tüm polimerler bu yapıya sahip değildir. Bu tür bir örnek, düşük moleküler ancak çok düşük kendi kendini iyileştirme özelliğine sahip modifiye edilmemiş polistirendir (Scheiner, Dickens, Okol, 2016). Supramoleküler etkileşimler ağların kovalent bağlardan daha hızlı yeniden şekillenmesini sağlar. Supramoleküler etkileşimler, her ikisi de doğası gereği yönlü olmasına rağmen kovalent bağlardan çok daha hassastır (Espinosa ve Diğerleri, 2015).

2.2. Metaller

Metalik malzemelerde, atomik bağ çok güçlü olan metalik bağlardır, bu nedenle ortam sıcaklıklarında difüzyon işlemi çok yavaştır. Difüzyon, kendi kendini iyileştiren ajanların hasarlı bölgelere taşınmasında kilit bir rol oynadığından, kendi kendini iyileştiren metaller alanı, kendi kendini iyileştiren polimerlere göre daha az gelişmiştir. Metalik malzemeler daha yüksek sıcaklıkta (erime noktasına yakın) kendi kendini iyileştirme özelliğine sahip olmalarına rağmen, mekanik özellikler oldukça düşük değerlere düşmekte ve bunun sonucunda malzemeler uygulama potansiyellerini yitirmektedir. Bu nedenle, oda sıcaklığına yakın yerlerde kendi kendini tamir edebilen kendi kendini iyileştiren metaller tasarlamak için yeni yöntemler bulunmalıdır (Van Dijk, Zwaag, 2018).

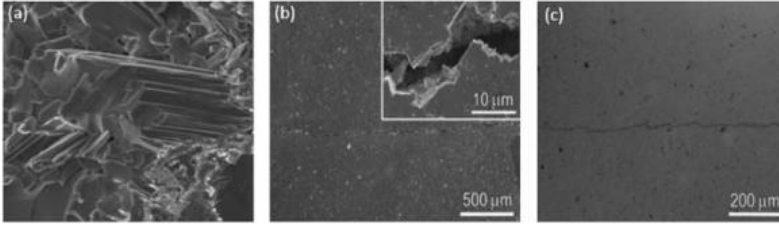
Metallerde otonom iyileşme diğer malzemelere benzer ve herhangi bir dış uyarana ihtiyaç duymaz. Kendi kendini iyileştiren metallerin hasar oluşumundan sorumlu güçleri ortadan kaldırması gerekir. Malzemelerde otonom kendi kendini

iyileştirme, oda sıcaklığında gerçekleşebilir, ancak harici mekanik kuvvetlerin ortadan kaldırılması gerekir. Kaldıran kuvvetler, hasar bölgesi boyunca meydana gelen yeniden oluşuma neden oldu ve iyileştirici ajan, mikro yapıda bağımsız bir faz olarak belirgin değil, aşırı doymuş durumda bir alaşım elementi olarak var olmaktadır (Diba ve diğerleri, 2018). Otonom iyileşen metaller için anahtar parametre sıcaklıktır, çünkü bunun difüzyonel süreçler yoluyla atomların hareketliliği üzerinde doğrudan bir etkisi vardır. Ayrıca diğer önemli parametre standart iyileşme süresinin boyutudur (Smithells, 1992). Örneğin, Cu içeren alüminyum alaşımları (en düşük ve en yüksek iyileştirme sıcaklığında herhangi bir dış kuvvet olmaksızın 1 gün kalarak) sırasıyla 1,5 ve 7 nm kusurları iyileştirebilir. Ayrıca, Cu içeren alüminyum gibi durumdaki Au içeren çelikler, 35 nm'den 50 µm'ye kadar hasarı iyileştirebilir. Metalik alaşımlarda kendi kendini iyileştirme üç farklı stratejiye ayrılır: çökeltme tabanlı iyileştirme, şekil hafızalı alaşım bazlı iyileştirme ve iyileştirme için düşük erime sıcaklıklı alaşım kullanmaktır (Alaneme, Bodunrin, 2017). Yağışa dayalı iyileşme, çözünen atomların çözünürlüğünü azaltmak için sıcaklığın düşürülmesi olarak tanımlanır. 2009 yılında Van Der Zwaag, boşlukları ve mikro çatlakları doldurmak amacıyla bu yöntemi ilk kez araştırdı (Zwaag, Van Dijk, Jonkers, Mookhoek, Sloof, 2009). Sonuç olarak, göç atomları nedeniyle boşlukların kendi kendini iyileştirdiğini gördüler. Bu yöntem iki adım içerir. İlk olarak, alaşımın sıcaklığı tek fazlı bölgeye kadar arttırılır. İkincisi, alaşımın yüksek sıcaklıktan hızla soğuması, ekstra çözünen atomların dağılması için çok az zaman ile sonuçlanacaktır. Hızlı soğumanın sonucu olarak alaşım aşırı doymunluk veya meta stabil hale gelir. Öte yandan, sistemin toplam enerjisi artar ve fazla enerjisini azaltması gerekir. Bu nedenle, yaşlanma sırasında, çatlaklar içinde, aşırı doymuş çözünenlerin çökmesiyle dengeye dönüş gerçekleşir. Genel olarak, bu yöntem nanometre ölçeğinde gerçekleşir ve ne yazık ki büyük çatlakları iyileştiremez (Ghosh, 2009). Kendi kendini iyileştirme özelliklerini elde etmek için alaşımları tasarlayanın başka bir yöntemi, takviye olarak hafızalı alaşımı şekillendirmek için kullanılır. Bu yöntem, metalik bir matrise nano şekil hafızalı alaşım ve şekil hafızalı alaşım tellerin eklenmesini içerir. Bu nokta, nano şekil hafızalı alaşım eklemenin şu anda modelleme aşamasında olduğu ve kendi kendini iyileştirme yeteneğinin henüz deneysel olarak kanıtlanmadığı dikkate alınmalıdır çünkü bu teknik 2016 yılında Grabowski tarafından önerilmiştir (Kilicli, Yan, Salowitz, Rohatgi, 2018).

2.3. Kendi kendini iyileştiren seramikler ve beton

Seramik malzemeler kovalent veya iyonik yapıya sahiptir, bu nedenle onları onarmak için çok yüksek yerel sıcaklıklar zorunludur. Örneğin, SiC/Al₆Si₂O₁₃ kompoziti, difüzyonlu kütle aktarımı yüksek aktivasyon enerjilerine ihtiyaç duyduğundan 1300 °C gerektirir (Ando, Chu, Tsuji, Hirasawa, Kobayashi, Sato, 2002). (Chen ve diğ.) çalışmasında, SiC ile güçlendirilmiş kullanılan alümina/silikon karbür seramik kompozitler (Al₂O₃/hacimce %30 SiC) 100 µm'den uzun çatlakları tamamen iyileştirebilir (Chen ve diğerleri 2017). Ayrıca

seramik malzemelerde difüzyon, gerilim gevşeme süreçleri ve visko elastik akış süreçleri camı geçiş sıcaklığının etkisi altındadır, dolayısıyla önemli ölçüde daha düşük aktivasyon sıcaklıklarında başlatılabilirler. Mikro çatlakları iyileştirme yöntemlerinden biri, matris malzemesine ayrı iyileştirici parçacıkların (sıvı bir iyileştirici madde içeren mikro kapsüller) dahil edilmesidir. Bu yaklaşım, oksit seramiklerin mekanik bütünlüğünün yeniden sağlanması için önerilmiştir (Ando, Kim, Chu, Saito, Takahashi, 2004; Osada, Nakao, Takahashi, Ando, 2009). Seramik malzemeleri iyileştirmek için başka bir yaklaşım, çatlağın özel bir oksidatif dolgu kullanmaktır. Bu yöntem ilk kez Song ve arkadaşları tarafından 2008'de uygulanmıştır (Song, Pei, Sloof, Li, De Hosson, Zwaag, 2008). Ti_3AlC_2 'nin $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ oksitleyici ortamda çatlak iyileştirme yeteneğini araştırdılar. Sonuç olarak, çatlamış numuneyi $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 2 saat havada oksitleyerek bir çatlağı (B7 mm uzunluğunda ve $5\text{ }\mu\text{m}$ genişliğinde) iyileştirebildiler (Şekil 3).



Şekil 3. (a) %62 at.% O, 31 at.% Al ve 7 at.% Ti'den oluşan iyileşmiş bir örneğin kırılma kesiti. İnce oksit parçacıkları ile doldurulmuş çatlağın çatlakların ilerlemesini engelleyebileceği açıktır. (b ve c) Zikzak çatlak (B7 mm uzunluğunda ve $5\text{ }\mu\text{m}$ genişliğinde) iyileşmeden önce ve ince oksit parçacıkları ve iyileşmiş hasar alanı ile doldurulduğunda. (Song, Pei, Sloof, Li, De Hosson, and Zwaag, 2008)

İlk olarak, çatlak genişliğini $60\text{ }\mu\text{m}$ 'nin altındaki değerlerde kontrol etmek için tasarlanmış çimentolu kompozitler kullanılmıştır. İkinci yöntem, bakterilerin betonda hareketsiz hale getirildiği ve suyun taze çatlaklara sızması durumunda harekete geçirileceği, biyolojik olarak ilham alınan bir yaklaşımdır (Zwaag, 2008). Çatlağın boyutu, betonun yaşı ve çatlağı, sıcaklık, basınç ve iyileşme süresi, su ve havanın varlığı, dozaj, kapsüllerin boyutu ve dağılımı, iyileştirici madde ve viskozitesi, beton malzeme bileşimi gibi çeşitli faktörler, genleştirici ajanlar ve mineral katkılar, Ca^{2+} iyonları konsantrasyonu ve iyileşme mekanizması kendi kendini iyileştirme sürecinin etkinliği üzerinde doğrudan etkilere sahiptir (Meharie, Kaluli, Abiero-Gariy, Kumar, 2017).

2.4. Kendi Kendini İyileştiren Kompozit Malzemeler

Kendi kendini iyileştiren kompozit malzemeler, özellikle Otomotiv, havacılık veya medikal uygulamalarda maliyetleri düşürür ve parça güvenliğini artırır. Son birkaç yılda, çeşitli amaçlar için çeşitli otonomik kendi kendini iyileştiren kompozit materyaller kullanılmıştır. Otonomik kendi kendini iyileştiren

kompozit malzemeler başka bir dış uyarana ihtiyaç duymazlar çünkü hasarın kendisi iyileşme sürecini tetikler (Hager, Van der Zwaag, 2016).

Önemli otonom kendi kendini iyileştiren kompozit malzemelerden biri karbon nano-kompozittir (karbon nano tüpler ve grafen). Karbon nano yapıların yüksek yüzey-hacim oranı gibi benzersiz özelliklerinden dolayı, bu kompozit malzemeler kendi kendini iyileştirme özelliklerini etkileyebilir. Örneğin, Zhang ve ark. çok duvarlı karbon nano tüplerle modifiye edilmiş bir dizi kendi kendini iyileştiren iletken üretti (Zhang, Liu, Pan, Li, Gai, 2018). Mekanik ve elektriksel kendi kendini iyileştirme verimliliğinin %94'ten fazla olduğunu ve çok duvarlı karbon nano tüplerin ağırlık yüzdesinin ve bütül metakrilat/lauril metakrilat molar oranının mekanik özellikler ve kendi kendini iyileştirme performansı üzerinde doğrudan etkileri olduğunu bulmuşlardır (Ponnamma, Sadasivuni, Cabibihan, Al-Maadeed, (2017). Ayrıca, karbon nano tüpler tek cidarlı (tek tabakalı karbon atomları rulo halinde) ve çok cidarlı (birden çok cidarlı) tasarlanabilir. Polimerleri güçlendirmek için karbon nano tüpler kullanıldığında, kompozit daha yüksek Young modülüne, kuvvete, sertliğe ve şekil hafıza oranına sahiptir (Aissa, ve diğerleri 2012). Çeşitli uygulamalar için kullanılan başka bir karbon formu grafendir. Örneğin grafen, polimer kompozitlerin elektriksel ve mekanik özelliklerini artırmak amacıyla kullanılmaktadır ve ısı iletkenliği ve enerji absorbe etme özelliğinden dolayı kendi kendini iyileştirme özelliğine sahiptir.

Termal dalgalanma ve hasarın boyutu grafenin kendi kendini iyileştirme yeteneği üzerinde doğrudan etkisi olan önemli parametrelerdir. Örneğin, poliüretan bazlı kompozit grafen, modifiye grafen ve indirgenmiş grafen oksit ekleyerek, kendi kendine iyileştirici davranış elde edilmektedir. Bazen grafen oksit, oda sıcaklığında hızlı iyileşme kapasitesine sahip nano kompozit bazlı termo-tersinir bir elastomerin sentezlenmesi için bir çapraz bağlayıcı olarak kullanılmıştır (Wang, ve diğerleri 2013). Çalışmada, bozulmadan uzayabilirliğini yaklaşık 1 dakikada %50 iyileştiren bir nano kompozit tasarlamışlardır ve herhangi bir dış uyarı olmadan yaklaşık 1 saat içinde tamamen eski haline dönebilmektedir. 2017'de başka bir çalışmada, Pan ve çalışma arkadaşı mükemmel kendi kendini iyileştirme performansına (%90'dan fazla) sahip fabrikasyon katyonik poliakrilamid/grafen oksit hidrojenlerini sentezledi. Bu hidrojel, yüksek uzama (%800 %1700), yüksek gerilme mukavemeti (2,1 MPa), yüksek sertlik (Young modülü: B1,1 MPa) ve yüksek yorulma direncine sahiptir (Pan, Liu, Chen, Zhang, Guo, 2017). Başka bir otonom kendi kendini iyileştiren malzeme grubu hidrojenlerdir. Bu hidrofobik polimerler, ilaç dağıtımı, biyo sensörler ve doku mühendisliğindeki hücreler için matrisler gibi biyomedikal uygulamalar için başlıca adaylar olarak kullanılma potansiyeline sahiptir. Hidrojenler büyük miktarlarda su veya biyolojik sıvıları emebildikleri ve biyomedikal ve farmasötik uygulamalar için yararlı oldukları için, kendi kendini iyileştirme özelliklerine sahip hidrojenler üzerinde çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Taylor, 2016). Ek olarak, otonom olarak kendi kendini iyileştiren hidrojel

gereksinimi, hasara hızlı yanıt verme, kendi kendini iyileştirme sonrasında mekanik özelliklerini koruma ve farklı boyutlardaki (mikro ve makro ölçek) hasara yanıt verme yeteneği olarak kategorize edilebilir (Brochu, Craig, Reichert, 2011). Kendi kendini iyileştiren hidrojellerle ilgili araştırma iki ana yöntemi içerir: dinamik kovalent reaksiyonlar ve kovalent olmayan reaksiyonlar. Genellikle, otomatik olmayan hidrojinin bağları kovalenttir ancak otonom kendi kendini iyileştiren hidrojeller için hidrojen bağı, iyonik bağ, hidrofobik bağ ve supramoleküler etkileşimler gibi kovalent olmayan etkileşimler kullanılır. Hidrojeller zayıf mekanik özellikler sergilerler ve zayıf ve kırılğan oldukları için mekanik özelliklerini iyileştirmek için hidrojellere nano partiküller yüklenebilir. Örneğin, grafen oksit eklenmesi, hidrojellere yalnızca kendi kendini iyileştirme özellikleri kazandırmakla kalmaz, aynı zamanda hidrojellerin mekanik özelliklerini de geliştirir. Örneğin, 2018'de Kumar ve ark., poliakrilamid sodyum karboksimetilselüloza dayalı yeni hibrit hidrojelleri sentezledi. Hidrojelleri grafen oksit ve/veya selüloz nanokristalleri ile güçlendirdiler ve hidrojellerde grafen oksit içeriğinin etkisi incelendi. Bu dörtlü hidrojeller, kendi kendini iyileştirme özelliklerine ve şekil kurtarma davranışına sahiptir (Kumar, Rao, Han, 2018). Chen ve ark., fotoluminesans karboksimetil selüloz bazlı hidrojellerin kendi kendini iyileştirme ve gerilebilirlik yetenekleri kullanılmış ve herhangi bir dış uyaran olmaksızın oda sıcaklığında iyileşme oranı %95 olmuştur. Ayrıca hidrojellerin sentezlenmesi kolaydır, bu nedenle biyomedikal uygulamalarda kullanılabilirler (Chen, ve diğerleri, 2017). 2018'deki başka bir çalışmada Wu ve ark., hibrit hidrojelleri imal etmek için poli(N,N-dimetil akrilamid)-TiO₂-Arap zıncı kullandı. Bu yeni hidrojeller kendi kendini iyileştirme yeteneği gösterdi ve iyileştirme etkinliği sıcaklıklarla arttı (37 C %17.6 ve 50 C %61.5%). Bu fenomenin nedeni, sıcaklığın artması ve buna bağlı olarak uzun polimer zincirlerinin karşılıklı difüzyonunun artmasıydı (Şekil 3, mekanik hasarlı poli(N,N-dimetil akrilamid)-TiO₂-zıncı arap jellerinin (A) ve kendi kendini iyileştirdikten sonra (B) kendi kendini iyileştirme özelliklerini göstermektedir.

3. KENDİLİĞİNDEN İYİLEŞEN MALZEMELERİN KARAKTERİZASYONU

Kendiliğinden iyileşen malzemelerin karakterizasyonu, iyileşme mekanizmalarını anlamak ve performanslarını optimize etmek için önemlidir. Kendiliğinden iyileşen malzemeleri karakterize etmek için kullanılabilecek mekanik test, spektroskopik analiz, görüntüleme teknikleri ve termal analiz gibi çeşitli teknikler ve yöntemler vardır. Mekanik test, kendiliğinden iyileşen malzemelerin mekanik özelliklerini karakterize etmek için önemli bir yöntemdir. Malzemeyi çeşitli mekanik yüklere maruz bırakmayı ve bu yüklere verdiği tepkiyi ölçmeyi içerir. Kendiliğinden iyileşen bir malzemenin mekanik özellikleri arasında mukavemet, sertlik, süneklik, tokluk ve yorulma direnci bulunur. Popüler kendiliğinden iyileşen malzemelerden bazıları tablo 1'de listelenmiştir.

Tablo.1 Mekanik özellikleriyle farklı tipte kendi kendini onaran malzemeler

Malzeme	Tersinir Kovalent Bağ	Mekanik Özellikler	İyileştirme Etkinliği	İyileşme Koşulları
Poliüretan	Diels-Alder	Yüksek çekme mukavemeti, esneklik	%70-80	Yüksek sıcaklık, UV ışığı
Epoksi reçine	Disülfür	Yüksek sertlik, mukavemet	%90-95	Isı, basınç
Poliimid	benim	Yüksek termal stabilite, kimyasal direnç	%60-70	Hafif ısı, basınç
Silikon elastomer	Siloksan	Yüksek elastikiyet, düşük modül	%80-90	UV ışığı, ısı
Akrilik polimer	Boronik ester	İyi yapışma, dayanıklılık	%50-60	Hafif pH değişikliği
Termoplastik poliüretan	Diels-Alder	İyi esneklik, düşük sürtünme	%70-80	Yüksek sıcaklık

Araştırmacılar, bu özellikleri iyileşmeden önce ve sonra test ederek iyileşme mekanizmasının etkinliğini değerlendirebilir ve malzemenin performansını optimize edebilirler. Kendiliğinden iyileşen malzemeler için kullanılan en yaygın mekanik testler çekme testi, basınç testi ve kesme testidir. Çekme testi, bir malzeme örneğine tek eksenli bir yük uygulanmasını ve ortaya çıkan deformasyon ve stresin ölçülmesini içerir.

Basınç testi, malzemeye basınç yükü uygulanmasını içerirken, kesme testi, malzemeye zıt yönlerde teğetsel yük uygulanmasını içerir. Bu standart mekanik testlere ek olarak, çizik testi ve mikro girinti gibi özel teknikler de kendi kendini onaran malzemelerin iyileşme özelliklerini karakterize etmek için kullanılabilir. Çizik testi, malzemenin yüzeyini çizmek için keskin bir uç kullanmayı ve çizğin zaman içindeki iyileşmesini ölçmeyi içerir. Mikro girinti, malzemenin yüzeyine küçük bir kuvvet uygulamayı ve ortaya çıkan girinti derinliğini ölçmeyi içerir; bu, malzemenin sertliği ve elastikiyeti hakkında bilgi sağlayabilir. Mekanik test, kendi kendini onaran malzemelerin dayanıklılığını ve yorulma direncini araştırmak için de kullanılabilir. Araştırmacılar, malzemeyi döngüsel yüklemeye tabi tutarak, tekrarlanan mekanik strese dayanma yeteneğini değerlendirebilir ve iyileşme mekanizmasının birden fazla döngü üzerindeki etkinliğini değerlendirebilirler (Pulikkalparambil, Sanjay, Siengchin ve diğerleri 2020).

4. OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİNDE UYGULAMALAR

Otomotiv endüstrisinde kendi kendini onaran malzemelerin uygulanması yapısal bileşenleri, kaplamaları, lastikleri ve elektronikleri kapsar. Her uygulama, aracın dayanıklılığına, güvenliğine ve performansına katkıda bulunan benzersiz avantajlar sunar.

4.1. Yapısal Bileşenler

Bir aracın yapısal bütünlüğü, güvenlik ve performans için çok önemlidir. Kendi kendini onaran malzemeler, çeşitli yapısal bileşenlerin dayanıklılığını önemli ölçüde artırabilir.

4.1.1. Şasi ve Gövde Panelleri: Bu bileşenler, çatlaklara ve eziklere neden olabilecek strese, darbeye ve çevresel faktörlere maruz kalır. Kendi kendini onaran kompozitler, aracın yapısal bütünlüğünü ve görünümünü koruyarak küçük hasarları otonom olarak onarabilir. Örneğin, geri dönüşümlü kovalent bağlara sahip polimerler veya gömülü mikro kapsüller, ısıya veya diğer tetikleyicilere maruz kaldığında çatlakları iyileştirebilir (NikMdNoordinKahar, Osman, Alosime, Arsat, Mohammad Azman, Syamsir, Itam, Abdul Hamid, 2021).

Bir otomobilin, kauçuktan üretilen ve tehlikeli mekanik, termal ve kimyasal koşullara tabi tutulan, farklı boyut ve şekillerde yüzlerce parçası vardır. Frenler, contalar (motor, yakıt, elektrik ve far sistemleri için), hortumlar, elektrik bileşenleri, conta halkaları, havalandırma ve klima sistemi parçaları, kauçuk-metal bağlanmış parçalar, şasi, kaplamalar, egzoz askıları, buji körükleri, iç ve konsol paneli ve lastikler bunlardan bazılarıdır (Mark, Erman, Roland, 2013). Şekil 4, bir binek otomobilindeki yaygın kauçuk parçalarının şemasını göstermektedir.



Şekil 4. Bir binek araçta kullanılan kauçuk parçalar (Barrios, Verdejo, López-Manchado, Santana, 2023).

Contaların ana işlevi sıvının kaçmasını önlemek ve iki bölümü bir arada tutmaktır. Konumlarına ve temas ettikleri sıvıya bağlı olarak, bir veya başka bir kauçuk türünün kullanılmasını gerektirmektedirler. Genel olarak, motor ve yakıt sistemi için bu contalar, petrol türevi sıvılara (yağlar, benzin, vb.) karşı mükemmel kimyasal dirençleri ve iyi termal kararlılıkları ile karakterize edilen

bir tür NBR, floroelastomer ve/veya florosilikonlardan yapılmalıdır (Morton, 2013). Bu sistemler için hortumlar da organik çözücülere karşı direnç için aynı gereklilikleri karşılamalıdır.

Frenler ayrıca kauçuk kullanımını gerektirir. Kompozisyonu, mükemmel aşınma direnci sayesinde kauçukların öne çıktığı, çok sayıda metal, seramik ve polimerden oluşan bir kompozit malzemeden oluşur (Brydson, 1988). Frenler, sürüş sırasında güvenliği garanti ettikleri ve genellikle sürtünmeden kaynaklanan aşırı sıcaklıklara maruz kaldıkları için bir arabanın en önemli bileşenlerinden biridir. Kauçuk parçalar ayrıca şaside, özellikle şok emici contalar, titreşim bağlantıları ve hava yayları olarak kullanılır (German, 1999). Bu parçalar sürüş konforunu garanti eder ve yüksek esneklik gerektirmeleriyle karakterize edilir. Bu nedenle, bazıları NR ve kloropren (CR)'den yapılabilir, ancak diğerleri arasında SBR, NBR, EPDM'den de yapılabilirler (Morton, 2013).

4.1.2. Tamponlar: Çarpışmalar sırasında darbeyi emmek üzere tasarlanan tamponlar, küçük darbelerden kurtulmalarını sağlayan kendi kendini onaran malzemelerden faydalanabilir. Bu, değiştirme ihtiyacını azaltır ve araç güvenliğini artırır. Kendi kendini onaran tamponlar, darbe anında salınan, çatlakları kapatan ve yapısal bütünlüğü geri kazandıran polimerik bir iyileştirici madde içeren mikro kapsüllerden faydalanabilir.

4.2. Kaplamalar ve Boyalar

Otomotiv kaplamaları ve boyları sadece estetiği geliştirmekle kalmaz, aynı zamanda alttaki malzemeleri korozyondan, UV radyasyonundan ve aşınmadan da korur. Kendi kendini onaran teknolojiler bu koruyucu özellikleri önemli ölçüde iyileştirebilir.

1. Korozyon Önleyici Kaplamalar: Kendi kendini onaran kaplamalar, korozyon inhibitörleriyle dolu mikro kapsüller içerebilir. Kaplama hasar gördüğünde, bu inhibitörler serbest kalır, korozyonun yayılmasını önler ve metal bileşenlerin ömrünü uzatır. Bu, özellikle alt gövde ve süspansiyon parçaları gibi zorlu ortamlara maruz kalan bileşenler için faydalıdır.

2. Çizilmeye Dayanıklı Boyalar: Kendi kendini onaran boyalar, ısı aktivasyonu veya UV ışığına maruz kalma gibi mekanizmalar yoluyla küçük çizikleri onarabilir. Bu boyalar genellikle belirli uyarılara maruz kaldığında çizikleri yeniden hizalayabilen ve kapatabilen polimer zincirleri içerir ve aracın estetik çekiciliğini zamanla korur.

- **Esnek Devreler:** Kendi kendini onaran iletken malzemeler, araç elektroniğinde kullanılan esnek devrelerdeki kopmaları onarabilir. Bu, bilgi-eğlence, navigasyon ve gelişmiş sürücü destek sistemleri (ADAS) gibi elektronik sistemlerde işlevselliğin sürdürülmesi için önemlidir. Kendi kendini onaran devreler, elektrik yollarını onarmak için iletken maddeler salan iletken polimerler veya gömülü mikro kapsüller kullanabilir.

- **Sensörler:** Kendi kendini onaran malzemeler, lastik basıncını, motor koşullarını ve çevresel parametreleri izleme gibi çeşitli işlevler için kullanılan sensörlerin dayanıklılığını artırabilir. Bu malzemeler, sensör muhafazalarındaki veya dahili devrelerdeki hasarı otonom olarak onarabilir ve sürekli çalışma ve doğruluk sağlayabilir.

SONUÇ

Bu yenilikçi araştırma alanı yüksek vaatler gösterse de çatlak iyileşme kinetiğini ve iyileşme işlevselliğinin kararlılığını anlamada bazı pratik sınırlamalara sahiptir. Bu nedenle, kendi kendini onaran malzeme geliştiriminin temel zorluğu, çatlakların otonom tespiti ve ardından iyileşmesidir.

Biyomimetik yaklaşımlara dayalı yeni yenilikçi çözümler geliştirebilmek için, hasar tespitinin zorluklarının üstesinden gelmek ve otonom iyileşme fenomeni elde etmek nihai bir ihtiyaçtır. Otonom iyileşmenin yanı sıra, otonom olmayan süreçler de endüstriyel uygulamalar bulacaktır. Bu harika kendi kendini iyileştiren malzemeler alanının burada incelenen teknolojilerin ötesinde büyümeye devam edeceği ve günlük kullanımlarımız için kullanılabilir hale geleceği kesindir.

Gelecekte, arabalar hasarlı bileşenleri bulmak ve anında bir eylem planı uygulamak için kendilerini tarayabilir. Kimyasal ipuçlarıyla etkinleştirilen hafıza tepkilerine sahip kompozit malzemelerden, çarpışmalar veya hava koşullarına maruz kalma nedeniyle oluşan küçük yırtıkları kapatan akıllı kaplamalara kadar uzanmaktadır. Daha da ileride, karmaşık çok katmanlı nano kaplamalar için çalışmalar yapılacaktır. Bu kaplamalar, ilk etapta daha ciddi hasarların meydana gelmesini önlemeye yardımcı olabilir ve kendi kendini iyileştirme özelliklerine sahip otomobiller üzerinde bu araştırma yönü çok ümit vericidir. Yakın gelecekte otomotiv onarımında devrim yaratacaktır.

KAYNAKÇA

- Aïssa, B., Haddad, E., Jamroz, W., Hassani, S., Farahani, R. D., Merle, P. G., & Therriault, D. (2012). Micromechanical characterization of single-walled carbon nanotube reinforced ethylidene norbornene nanocomposites for self-healing applications. *Smart Materials and Structures*, 21(10), Article 105028. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/21/10/105028>
- Alaneme KK, Bodunrin MO. (2017). Self-healing using metallic material systemsa review. *Appl Mater Today*, 6:915.
- Ando K, Chu M-C, Tsuji K, Hirasawa T, Kobayashi Y, Sato S. (2002). Crack healing behaviour and high-temperature strength of mullite/SiC composite ceramics. *J Eur Ceram Soc*, 22(8):131319.
- Ando K, Kim B, Chu M, Saito S, Takahashi K. (2004). Crack-healing and mechanical behaviour of Al₂O₃/SiC composites at elevated temperature. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*. 27(7):53341.
- Andreeva DV, Shchukin DG. (2008). Smart self-repairing protective coatings. *Mater Today* 2008;11:2430.
- Ashby MF, Gibson LJ, Wegst U, Olive R. (1995). The mechanical properties of natural materials. I. Material property charts. *Proc R Soc Lond Ser A* 1995;450A:12340.
- Barrios S.U., Verdejo, R., López-Manchado, M.A, Santana, M.H. (2023). Self-Healing Elastomers: A sustainable solution for automotive applications, *European Polymer Journal*, Volume 190, 112023, ISSN 0014-3057, <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2023.112023> .
- Blaiszik BJ, Kramer SLB, Olugebefola SC, Moore JS, Sottos NR, White SR. Self-healing polymers and composites. *Annu Rev Mater Res* 2010; 40:179211.
- Brochu ABW, Craig SL, Reichert WM. (2011). Self-healing biomaterials. *J Biomed Mater Res Part A* 2011; 96(2):492506.
- Brown EN, Kessler MR, Sottos NR, White SR. (2003). In situ poly (urea-formaldehyde) micro-encapsulation of dicyclopentadiene. *J Microencapsul*, 20(6):71930.
- Brown EN, White SR, Sottos NR. (2005). Retardation and repair of fatigue cracks in a micro- capsule toughened epoxy Composite. Part II: In situ self-healing. *Compos Sci Technol* 2005; 65:247480.
- Brydson, J.A. (1988). *Rubbery materials and their compounds*, Elsevier Applied Science, London and New York.
- Chaudhary, N., Dikshit, M. K., Kumar, C. L., Sonia, P., Pathak, V. K., Saxena, K. K., ... & Salmaan, N. U. (2023). Sustainable mechanical properties evaluation

- for graphene reinforced Epoxy/Kevlar fiber using MD simulations. *Journal of Experimental Nanoscience*, 18(1), 2246662.
- Chen YM, et al. (2017). Self-healing and photoluminescent carboxymethyl cellulose-based hydrogels. *Eur Polym J*, 94:50110.
- Chipara MD, Chipara M, Shansky E, Zaleski JM. (2009). Self-healing of high elasticity block copolymers. *Polym Adv Technol* 2009; 20:42731.
- Cotting, F., Koebsch, A., Aoki, I.V. (2019). Epoxy self-healing coating by encapsulated epoxy ester resin in poly (urea-formaldehyde- melamine) microcapsules. *Front. Mater.* **2019**, 6, 314.
- Dhanasekaran, R.; Reddy, S.S.; Kumar, A.S. (2018). Application of Self-Healing Polymers to Overcome Impact, Fatigue and Erosion Damages. *Mater. Today Proc.* 5, 21373–21377.
- Diba M, et al. (2018). Self-healing biomaterials: from molecular concepts to clinical applications. *Adv Mater Interfaces* 2018;1800118.
- Dry C. (1994). Matrix cracking repair and filling using active and passive modes for smart timed release of chemicals from fibers into cement matrices. *Smart Mater Struct* 1994;3 (2):118.
- Espinosa LM, et al. (2015). Healable supramolecular polymer solids. *Prog Polym Sci* 2015;4950: 6078.
- Garcia,SJ. (2014) Effect of polymer architecture on the intrinsic self-healing character of polymers. *Eur Polym J* 2014; 53:11825.
- Ghosh, SK. (2009). Self-healing materials: fundamentals, design strategies, and applications. John Wiley & Sons.
- Hager, MD, Van der Zwaag S, (2016). Schubert US. Self-healing materials, vol. 273. Springer; 2016.
- Heslehurst, RB. (1997). Challenges in the repair of composite structures-Part I. *SAMPE J* 1997; 33:1116.
- Keller MW, Blaiszik BJ, White SR, Sottos NR. (2007). Recent advances in self-healing materials systems. *Adaptive structures: engineering applications*. John Wiley & Sons; 2007. p. 24760.
- Keller, MW., White, SR., Sottos, NR. (2007). A self-healing poly(dimethyl siloxane) elastomer. *Adv Funct Mater* 2007; 17:2399404.
- Kessler, MR. (2007). Self-healing: a new paradigm in materials design. *Proc Inst Mech Eng G, J Aerosp Eng* 2007;221G:47995.
- Kilicli V, Yan X, Salowitz N, Rohatgi PK. (2018). Recent advancements in self-healing metallic materials and self-healing metal matrix composites. *JOM*, 70(6):84654.

- Kumar A, Rao KM, Han SS. (2018). Mechanically viscoelastic nanoreinforced hybrid hydro- gels composed of polyacrylamide, sodium carboxymethylcellulose, graphene oxide, and cellulose nanocrystals. *Carbohydr Polym* 2018; 193:22838.
- Kumar A, Stephenson LD, Murray JN. (2006). Self-healing coatings for steel. *Prog Org Coat* 2006; 55:24453.
- M. Morton, (2013). *Rubber Technology*, Springer Science & Business Media, 2013.
- Malinskii YM, Prokopenko VV, Ivanova NA, Kargin VA. (1970). Investigation of self-healing of cracks in polymers. *Polym Mech* 1970;6(2):2404.
- Mark, J.E., Erman, B., Roland, M. (2013). *The science and technology of rubber*, 4 ed., Academic Press.
- Mauldin TC, Kessler MR. (2010). Self-healing polymers and composites. *Int Mater Rev* 2010;55(6):31746.
- Meharie MG, Kaluli JW, Abiero-Gariy Z, Kumar ND. (2017). Factors affecting the self-healing efficiency of cracked concrete structures. *Am J Appl Sci Res*. 3(6):80.
- Murphy EB, Wudl F. (2010). The world of smart healable materials. *Prog Polym Sci* 2010;35 (12):22351.
- NikMdNoordinKahar, N.N.F.; Osman, A.F.; Alosime, E.; Arsat, N.; Mohammad Azman, N.A.; Syamsir, A.; Itam, Z.; Abdul Hamid, Z.A. (2021). The Versatility of Polymeric Materials as Self-Healing Agents for Various Types of Applications: A Review. *Polymers* **2021**, *13*, 1194. <https://doi.org/10.3390/polym13081194>
- O'Brien TK. (1994). Damage and strength of composite materials: trends, predictions, and challenges. *NASA Conf Publ* 1994; 3271:14558.
- Osada T, Nakao W, Takahashi K, Ando K. (2009). Kinetics of self-crack-healing of alumina/ silicon carbide composite including oxygen partial pressure effect. *J Am Ceram Soc*. 92(4):8649.
- Pan C, Liu L, Chen Q, Zhang Q, Guo G. (2017). Tough, stretchable, compressive novel poly- mer/graphene oxide nanocomposite hydrogels with excellent self-healing performance. *ACS Appl Mater Interfaces* 2017;9(43):3805261.
- Ponnamma D, Sadasivuni KK, Cabibihan J-J, Al-Maadeed MA- (2017). *A. Smart polymer nanocomposites*, Springer Ser. Polym. Compos. Mater. Switzerland; 2017. p. 9738.
- Pulikkalparambil H, Sanjay MR, Siengchin S, et al. (2020). Self-repairing hollow-fiber polymer composites. *Self- Healing Compos Mater From Des to Appl*. 2020;313–326.

- German, R. (1999). Non-Tyre Rubber Components in the Automotive Industry, iSmithers Rapra Publishing 1999.
- Kumar, R., Rajesh Jesudoss Hynes, N., Senthamaraikannan, P., Anish Khan, Sanjay Mavinkere Rangappa, Suchart Siengchin, S.R., Sundara Bharathi, Abdullah Mohamed Asiri and Imran Khan. (2020). Self-repairing fiber polymer composites: mechanisms and properties
- Ramesh, M., Arun Ramnath, R., Khan A., Aslam, A., Khanand, P. Asiri, A. M. (2020). Electrically conductive self-healing materials: preparation, properties, and applications, Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, Self-Healing Composite Materials, From Design to Applications ISBN: 978-0-12-817355-8 (online)
- Sauvant-Moynot V, Gonzales S, Kittel J. (2008). Self-healing coating: an alternative route for anticorrosion protection. Prog Org Coat 2008; 63:30715.
- Scheiner M, Dickens TJ, Okol O. (2016). Progress towards self-healing polymers for composite structural applications. Polymer 2016; 83:26082.
- Smithells CJ. In: Brandes EA, Brook GB, (1992). Smithells metals reference book. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Song GM, Pei YT, Sloof WG, Li SB, De Hosson JTM, Van der Zwaag S. (2008) Oxidation- induced crack healing in Ti3AlC2 ceramics. Scr Mater. 58(1):1316.
- Srivastava, A., Usha, P., Al-Alawachi, S.F.A., Kansal, L., Aravinda, K., and Arora, D. (2024). Self-Healing Materials: Mechanisms, Characterization, and Applications: A detailed Review. 3rd International Conference on Applied Research and Engineering (ICARAE2023). 01019 (8), Material Science, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202450501019>
- Su, CC., Chen, JS. (2017). Self-healing polymeric materials. Key engineering materials, 727. Scientific.Net. p. 4829.
- Taylor DL, in het Panhuis M. (2016). Self-healing hydrogels. Adv Mater 2016;28 (41):906093.
- Trask RS, Williams HR, Bond IP. (2007). Self-healing polymer composite: mimicking nature to enhance performance. Bioinsp Biomim 2007; 2:19.
- Vahabi H, Sonnier R, Ferry L. Effects of ageing on the fire behaviour of flame-retarded polymers: a review. Polym Int 2015;64(3):31328.
- Van der Zwaag S, Van Dijk NH, Jonkers HM, Mookhoek SD, Sloof WG. (2009). Self-healing behaviour in man-made engineering materials: bioinspired but taking into account their intrinsic character. Philos Trans R Soc Lond A Math Phys Eng Sci, 367 (1894):1689704.

- Van Dijk N, Van der Zwaag S. (2018). Self-healing phenomena in metals. *Adv Mater Interfaces* 2018;1800226. Van Tittelboom K, De Belie N. (2013). Self-healing in cementitious materials—a review. *Materials* 6(6):2182217.
- Wang C, et al. (2013). A rapid and efficient self-healing thermo-reversible elastomer cross-linked with graphene oxide. *Adv Mater* 2013;25(40):578590.
- Wang Y, Pham DT, Zhang Z, Li J, Ji C, Liu Y, et al. (2016). Sustainable self-healing at ultra-low temperatures in structural composites incorporating hollow vessels and heating elements. *R Soc Open Sci* 2016; 3:160488.
- White SR, et al. Autonomic healing of polymer composites. *Nature* 2001;409(6822):794.
- Williams KA, Dreyer DR, Bielawski CW. (2008). The underlying chemistry of self-healing materials. *MRS Bull* 2008; 33:75965.
- Wool RP, O'connor KM. (1981). A theory crack healing in polymers. *J Appl Phys* 1981;52 (10):595363.
- Wool RP. (1980). Crack healing in semicrystalline polymers, block copolymers and filled elastomers. *Adhesion and adsorption of polymers*. Springer; 1980. p. 34162.
- Wool RP. (2008). Self-healing materials: a review. *Soft Matter* 2008;4(3):40018.
- Wu D, Xu J, Chen Y, Yi M, Wang Q. Gum Arabic: a promising candidate for the construction of physical hydrogels exhibiting highly stretchable, self-healing and tensility reinforcing performances. *Carbohydr Polym* 2018; 181:16774.
- Wu DY, Meure S, Solomon D. (2008). Self-healing polymeric materials: a review of recent developments. *Prog Polym Sci* 2008; 33:479522.
- Xiao DZ, Yuan YC, Rong MZ, Zhang MQ. (2009). A facile strategy for preparing self-healing polymer composites by incorporation of cationic catalyst-loaded vegetable fibers. *Adv Funct Mater* 2009; 19:228996.
- Xu, J.; Ding, C.; Chen, P.; Tan, L.; Chen, C.; Fu, J. (2020). Intrinsic self-healing polymers for advanced lithium-based batteries: Advances and strategies. *Appl. Phys. Rev.*, 7, 031304.
- Yuan YC, Yin T, Rong MZ, Zhang MQ. (2008). Self healing in polymers and polymer composites. Concepts, realization and outlook: a review. *Express Polym Lett* 2008;2 (4):23850.
- Zhang Q, Liu L, Pan C, Li D, Gai G. (2018). Thermally sensitive, adhesive, injectable, multi-walled carbon nanotube covalently reinforced polymer conductors with self-healing capabilities. *J Mater Chem C* 2018;6(7):174652.
- Zhu DY, Rong MZ, Zhang MQ. (2015). Self-healing polymeric materials based on microencapsulated healing agents: from design to preparation. *Prog Polym Sci*, 49:175220.
- Zwaag S. (2008). Self healing materials: an alternative approach to 20 centuries of materials science. The Netherlands: Springer Science 1 Business Media BV Dordrecht.

BÖLÜM 2

Derin Çekme İşleminde Limit Çekme Oranının Önemi ve Optimizasyonu

Cebeli Özek¹

¹ Prof. Dr., Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü,
Orcid: 0000-0001-7603-415X

1. Giriş

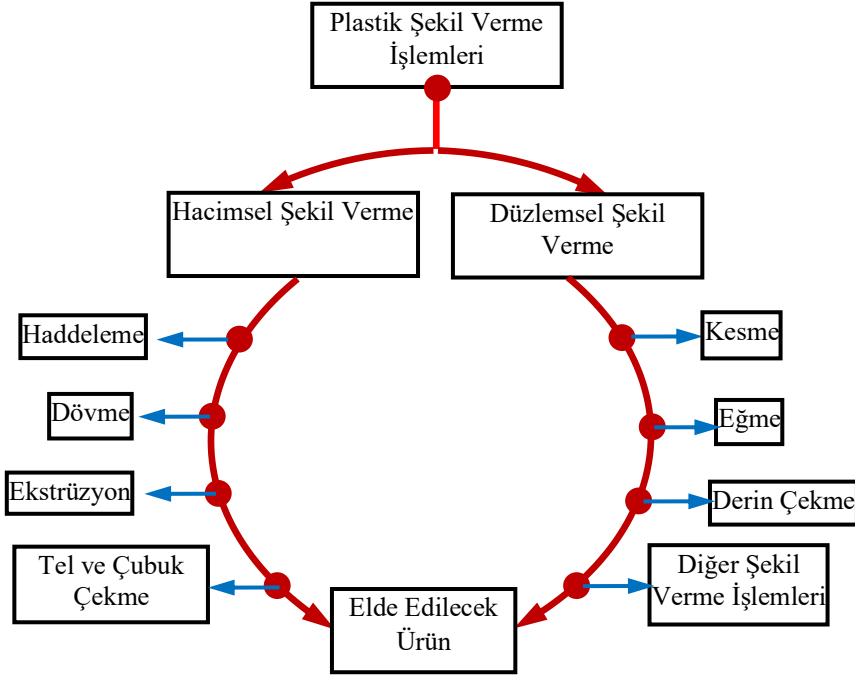
21. yüzyılın başından bu yana toplum, teknolojik ilerlemede büyük bir artışa tanık olmuş ve bu ilerleme, insanların yaşam tarzlarını çeşitli şekillerde etkilemiştir. Küreselleşmenin mevcut senaryosunda, ileri teknoloji mühendislik dünyasının her alanında ön plandadır. Bu teknolojinin makine mühendisliği endüstrisindeki değişimi, çeşitli metal şekillendirme işlemlerinde açıkça görülmektedir. Günümüzde kara taşıtlarının fren mekanizmalarında yaygın olarak kullanılan balata malzemelerinin iyileştirme araştırmaları hala popülerliğini korumaktadır. Metal işleme, döküm, kaynak, talaşlı imalat ve toz metalurjisinin yanı sıra metallerin şekillendirilmesinde kullanılan önemli işlemlerden biridir. Bununla birlikte, metal şekillendirme, altın ve bakırın basitçe dövülmesiyle ortaya çıkan en eski metal işleme işlemi olarak kabul edilebilir. Paslanmaz çelik malzemeler günümüzde birçok endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. AISI 4140 ile AISI 316L paslanmaz çeliklerinin sürtünmeli kaynağında artan hız ile sürtünme basınçları parametrelerine paralel olarak kaynak bölgesinde AISI 4140 tarafında hızlı soğumaya bağlı olarak martenzitik dönüşüm ve AISI 316L tarafında ise daha uygun birleşme nedeniyle daha sınırlı bir sertlik artışının meydana geldiği belirlenmiştir. Ayrıca bu malzemelerin çoğu tornalama ile işlenmektedir. Kesme hızı, ilerleme oranı ve kesme derinliği gibi parametrelerin yüzey pürüzlülüğü, takım yanak aşınması ve takım-talaş arayüz sıcaklığı üzerindeki etkileri incelenmişti, talaş formları belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar göz önüne alındığında, artan kesme hızıyla birlikte takım-talaş arayüz sıcaklığının ve takım yanak aşınmasının azaldığı, yüzey pürüzlülüğünün ise azalan ilerleme oranı ve kesme derinliğiyle arttığı görülmüştür [1, 2, 3].

Metal kesme işleminde sıcaklığın modellenmesi, metal kesme işlemini anlamak ve analiz etmek için merkezi bir rol oynamaktadır ve endüstri, esas olarak bu teknolojinin değişimi sayesinde ilerlemektedir [4, 5, 6, 7]. Esasen, metal şekillendirme işlemlerinin temel amacı, bir metal kütüğün istenen geometriye sahip bir bileşene dönüştürülmesidir. Hafif sac metaller ve bunların otomotiv sektöründeki kullanımı konusunda daha fazla araştırma talebi, petrol ürünlerinin kıtlığı nedeniyle hızla artmaktadır.

Limit çekme oranı (LÇO)'nı değerlendirmek için bir araç seti geliştirerek ve yaygın olarak bulunan ilkel malzemelerle test ederek deneysel bir çalışma yürütmek, bu sonuçları referans alarak imalat sanayisine yardımcı olmak amacıyla, düşük hacimli kap oluşumunda ürün tasarımı ve geliştirme aşamasında kullanılabilir. LÇO tahmin yöntemi, maksimum delme yükünün, bir miktar hata veren sabit delme yükü çizgisiyle kesiştiği noktaya kadar ekstrapolasyonuna dayansa da, endüstriye ürün geliştirme aşamasında şekillendirme işlemindeki aşama sayısını değerlendirmede yardımcı olabilir. Bu yöntem, araştırmacılar arasında yaygın olarak kullanılmaktadır.

2. Sac Şekillendirme

Geniş anlamda, metal şekillendirme işlemleri, Şekil 1'de gösterildiği gibi, dökme şekillendirme ve sac şekillendirme gibi farklı türlere ayrılır. Haddeme, ekstrüzyon ve dövme dökme şekillendirme işlemlerine örnek olarak verilebilirken, kesme, bükme, germe, bükme ve derin çekme sac şekillendirme işlemlerine örnek olarak verilebilir.



Şekil 1. Metal şekillendirme işlemlerinin sınıflandırılması.

Sac şekillendirme, düşük üretim maliyetleriyle kaliteli ürünlerin üretiminde kullanılır. Otomobil gövdeleri, vagonlar, uçaklar, tarım ve inşaat ekipmanları, ofis mobilyaları, elektronik aletler, bilgisayar cihazları vb. için 2B veya 3B bileşenlerin minimum sayıda şekillendirme işlemi kullanılarak üretilmesi esastır. Mutfak lavabosu, hem derin hem de dikişsiz olması nedeniyle derin çekme işlemine en iyi örnektir. Derin çekme işlemiyle üretilen diğer önemli ürünler arasında teneke kutular, kutular, şişeler, pil hücreleri vb. yer alır.

Sac şekillendirme işlemlerinin Ar-Ge'sindeki ilerlemenin başlıca nedenleri şunlardır:

1. Otomotiv endüstrisinde hafif ve yüksek mukavemetli yapıların kullanımıyla, güvenlik standartları ve konfor seviyelerinin korunmasıyla kirlilikten arındırılmış bir çevreye vurgu yapılması, günümüzün bir ihtiyacıdır. Hafif metallerin kullanımı, otomotiv, havacılık, içecek ve ev gibi farklı uygulama

alanlarında düşük enerji tüketimiyle çevre dostu ürünlere katkıda bulunmaktadır. Toz alümina (Al_2O_3) ile birlikte kullanılan dolgu ve sürtünme malzemelerinin parçacık boyutları değiştirilerek, ön şekillendirme ve preslenmesi gibi bir dizi üretim işleminden elde edilen malzemelerin frenleme performansının, mekanik ve tribolojik özellikleri incelenmiş, uygun uygun olduğu belirlenmiştir. [8].

2. Atmosfere salınan emisyonların en aza indirilmesi, Hindistan gibi gelişmekte olan ülkelerde baskın bir konudur. Hızlı sanayileşme, sac metal uygulamalarını artırmakta ve gelecekte de artacağı beklenmektedir [9, 10].

3. Tüketici, mevcut performans, boyut, konfor ve kullanım standartlarını korurken, daha az yakıt tüketen ve güvenli araçlar üretmek istiyor. İklim değişikliği, kaynak kıtlığı, küreselleşme ve artan pazar talebi, otomotiv ekipmanlarının daha kısa sürede ve düşük maliyetle, daha az malzeme ve enerji kullanılarak üretilmesine yol açıyor. Bu nedenle aracı güvenli bir şekilde yavaşlatmak veya durdurmak için, yük ve çalışma koşulları gibi parametreleri dikkate alarak balata malzemesi içeriğinin tasarımı son derece önemlidir [11, 12].

4. Yeni nesil, süperplastik şekillendirme, derin çekme, akış şekillendirme, lazer şekillendirme ve hidroşekillendirme gibi ileri şekillendirme teknolojileri alanında yürütülen araştırmaların gelişmesinden önemli ölçüde yararlanmalıdır.

5. Sac metal şekillendirme süreci, imalat endüstrisinde kilit bir rol oynamalı ve malzemeler, süreçler, takım tasarımı ve ekipman üretimi ile ilgili sürekli gelişime ihtiyaç duymaktadır.

6. Otomotiv endüstrisindeki sürekli artan ihtiyaç, sac metal şekillendirme alanındaki yenilikler için bir diğer önemli itici güçtür.

2.1. Derin Çekme İşlemi

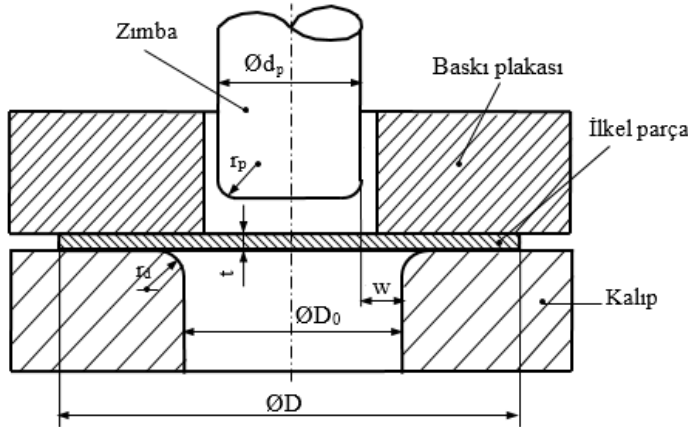
Derin çekme işlemi, çeşitli endüstriyel uygulamalardaki önemi nedeniyle son birkaç on yıldır kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Uluslararası Derin Çekme Araştırma Grubu (UDÇAG), malzemeler, şekillendirilebilirlik konuları, takımlama ve triboloji dahil olmak üzere sac metal şekillendirme faaliyetlerini incelemek üzere dünya çapında farklı araştırma gruplarını bir araya getirmek için çalışmaktadır. Ayrıca, derin çekme ve diğer sac metal şekillendirme işlemleri hakkında bilimsel bilgi paylaşımında bulunmak üzere bilim insanlarını, araştırmacıları ve sanayicileri bir araya getirmek için dünya çapında koordinasyon sağlamaktadır. UDÇAG ve diğer uluslararası endüstri ve kurumsal araştırma grupları, piyasaya sürekli olarak giren yeni alaşım kaliteleriyle sac şekillendirme sürecinde daha fazla sürekli araştırmanın gerekli olduğu sonucuna varmıştır.

Alüminyum, bakır ve magnezyum gibi hafif malzemelerin karmaşık bileşen konfigürasyon sistemlerinde kullanımı hızla artmaktadır ve teknik sürecin yanı sıra bu süreçte yer alan parametrelerin (örneğin yağlama türü, kalıp ve zımba arasındaki boşluk, kalıp ve zımba profili, ilkel parça tutma türü, ilkel parça tutma

kuvveti, ilkel parça tutma mekanizması, ilkel parça kalınlığı ve malzeme özellikleri) kapsamlı bir şekilde bilinmesi elzemdir. Ayrıca, sac metal için şekillendirilebilirliğin Şekillendirme Sınır Diyagramı (SSD) ve 30'a kadar Limit Çekme Oranı (LÇO) gibi hızlı bir şekilde değerlendirilmesine olan talep, tasarım maliyetlerini ve ret oranlarını düşürmektedir. Sac şekillendirmede karşılaşılan zorluklar nedeniyle, derin çekme için yeni üretim teknolojileri günümüzde gelişmektedir. Derin çekme süreci, çift eksenli gerilme ve şekil değiştirmelere maruz kalan karmaşık bir düzlemsel deformasyon sürecidir ve tasarımcının süreç ve sınırlamaları hakkında kapsamlı bilgi sahibi olması gerekmektedir. Bu bilgi yalnızca deneyimden gelir ve önemli miktarda zaman ve deneysel testler gerektirir.

DIN 8584 standardına göre, derin çekme işlemi, düz bir sacın bir tarafı açık içi boş bir gövdeye çekme-basınç yöntemiyle şekillendirilmesi veya önceden çekilmiş bir kabın, sacın kalınlığında kasıtlı bir değişiklik yapılmadan daha küçük kesitli başka bir kaba dönüştürülmesidir [13, 14, 15, 16]. Zimba ve kalıp düzeneğinin kullanıldığı ve istenen şeklin, boş sacın kalıptan geçirilmesiyle elde edildiği yaygın olarak kullanılan bir sac metal işlemidir. Derinlik, kabın yarıçapına eşit veya daha büyükse, derin çekme işlemi olarak adlandırılır. Şekil 2, zimba, kalıp ve kalıp tutucudan oluşan derin çekme işleminin kesit görünümünü göstermektedir.

Teknolojinin, insan yaşamındaki modern ve gelişmiş olanakların ana kaynağı olduğu bilinen bir gerçektir ve bu nedenle günümüz imalat sanayilerinde giderek artan bir gelişim görülmektedir. Teknolojik gelişmelere ayak uydurmak ve rekabet ortamında ayakta kalabilmek için, imalat şirketleri ürün kalitesini ve üretim oranlarını düşük maliyetlerle iyileştirmek için yeni teknikler geliştirmektedir. Ayrıca, mikro düzeyde ilkel metal deformasyon davranışı bilgisi olmadan derin çekme işleminde üretilen bileşenlerin kalitesini ölçmek oldukça zor bir iştir. Bir işlemin uygun bir simülasyon modelinin oluşturulması, işletme parametrelerinin etkisini tahmin etmede ön bilgi sağlar.



Şekil 2. Derin çekmenin genel prensibi

Derin çekme işleminde, ilkel malzeme olarak bilinen iki boyutlu bir düzlem levha, üç boyutlu bir bileşene dönüşür. Bu işlem, ilkel malzemenin akışını düzenlemek için ilkel malzeme tutucu ile kalıp omzu arasındaki flanş bölgesini tutarken, ilkel malzemenin bir zımba ile kalıp boşluğuna kademeli olarak zorlanması içerir [17, 18]. [19].

2.2. Sac Şekillendirme İşlemlerinde Deformasyon Olayı

Kupa çekme işlemindeki tüm elemanlar, σ_1 ve σ_2 membran gerilmeleri altında deforme olur ve normal gerilme σ_3 oldukça küçük olup ihmal edilebilir kabul edilir. Gerçek gerilmelerin toplamı sıfırdır [24], yani;

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0 \quad (1)$$

Etkin gerilim, Denklem 2'de verilmiştir [20]

$$\bar{\sigma} = (\sqrt{1 - \alpha + \alpha^2}) \cdot \sigma_1 \quad (2)$$

Burada, σ etkin gerilim ve α gerilim oranıdır, σ_1/σ_2 .

Etkin gerilim, Denklem 3 [22] kullanılarak belirlenir.

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot (1 - \beta + \beta^2)} \cdot \varepsilon_1 \quad (3)$$

Burada, ε etkin gerinim ve β gerinim oranı olup $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ dir.

2.3. Gerilme-Gerinim Yasaları

Sac metaldeki deformasyon, optimum şekilde tasarlanmış zımba ve kalıp seti arasında gerilerek gerçekleştirilir. Deformasyon sırasında, ilkel parça kalıp tutucu tarafından kontrol edilir.

Sac metal şekillendirme çalışmasının ilk adımı, her noktadaki gerinim ile ilgili gerilim durumunun belirlenmesidir. Mühendislik gerilim-gerinim diyagramı, elastik bir parça ve plastik bir parça ile karakterize edilir. İzotropik sertleşme davranışını modellemek için ampirik etkin gerilim-gerinim yasalarına başvurulması zorunludur. Sac metal şekillendirme için geçerli yaygın yasaların basit hesaplama formülleri aşağıda denklem 1.4, 1.5 ve 1.6'da mekanik davranış grafikleri ise Şekil 3'de gösterilmiştir.

1. Güç yasası: Bir güç yasası veya Hollomon yasası şu şekilde tanımlanır: [24]

$$\bar{\sigma} = K_s \cdot \bar{\varepsilon}^n \quad (4)$$

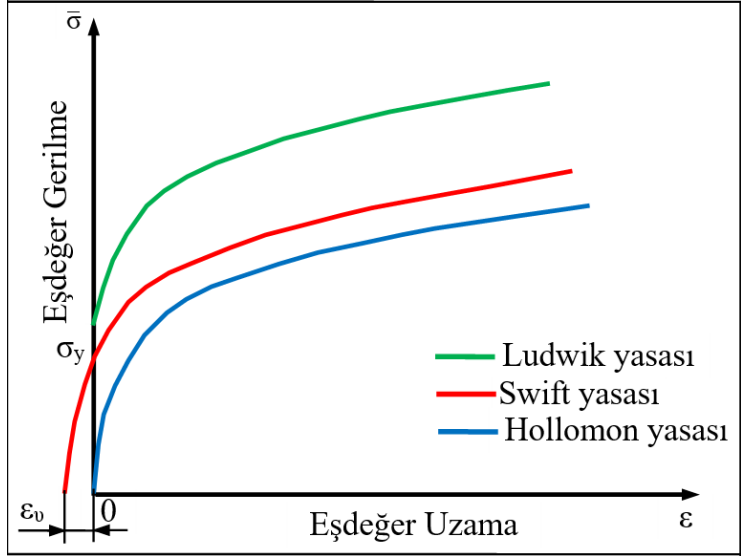
Burada K_s mukavemet katsayısıdır.

2. Swift Yasası veya Krupkowski Yasası şu şekilde tanımlanır: [25]

$$\bar{\sigma} = K_s \cdot (\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon})^n \quad (5)$$

3. Ludwik Yasası şu şekilde tanımlanır: [26]

$$\bar{\sigma} = \sigma_y + K_s \cdot \bar{\varepsilon}^n \quad (6)$$



Şekil 3. İzotropik sertleşmenin yapısal yasaları [23]

2.4. Anizotropi

Derin çekmede kullanılan ilkel malzeme, soğuk haddeleme işlemiyle üretilir ve bu nedenle ilkel malzeme anizotropik nitelikte olabilir. t_1 , w_1 ve t_1 'in sırasıyla deforme olmamış test numunesinin uzunluğu, genişliği ve kalınlığı olduğunu;

$$\varepsilon_t = \ell_n \frac{\ell_2}{\ell_1}, \quad \varepsilon_w = \ell_n \frac{w_2}{w_1}, \quad \varepsilon_t = \ell_n \frac{t_2}{t_1}$$

ve t_1 , w_2 ve t_2 'nin de uzamadan sonraki karşılık gelen değerler olduğunu varsayalım. Üç yöndeki ana gerilmeler şunlardır:

Soğuk haddelenmiş bir sac için $\varepsilon_w \neq \varepsilon_t$.

Anizotropi oranı şu şekilde tanımlanır: [18]

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} \quad (7)$$

Anizotropi oranı 'r', haddeleme yönüne 0° , 45° ve 90° açılarla kesilerek hazırlanan numunelerin test sonuçlarından hesaplanır. r'nin farklı değerleri, yani r_0 , r_{45} ve r_{90} belirlenir.

Δr , Şekil 4'de gösterildiği gibi düzlemsel anizotropinin göstergesidir ve aşağıdaki denklem kullanılarak belirlenir.

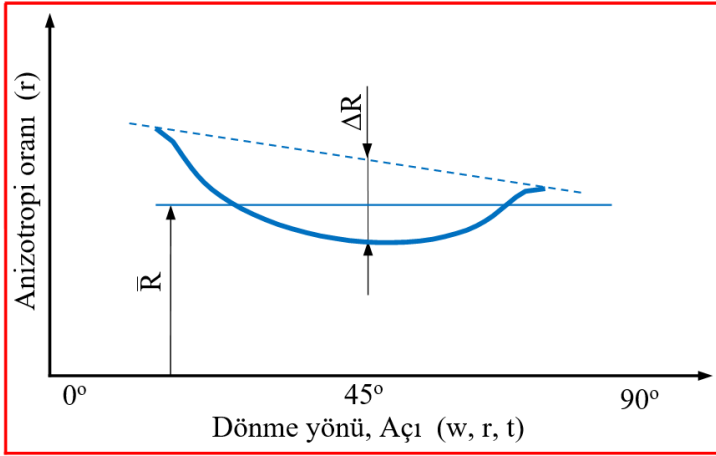
$$\Delta r = r_{\max} - r_{\min} \quad (8)$$

Ortalama varyasyon, düzlemsel anizotropi için en iyi ölçüdür ve şu şekilde ifade edilir: [22]:

$$\Delta R = \frac{r_0 + r_{90} + 2 \cdot r_{45}}{2} \quad (9)$$

Anizotropi oranının ortalama değeri veya normal anizotropi oranı şu şekilde tanımlanır: [28]:

$$\bar{R} = \frac{r_0 + r_{45} + r_{90}}{4} \quad (10)$$



Şekil 4. Anizotropi oranı 'r'nin değişimi [22]

r değerinin 1'den büyük olması, kalınlık yönünde diğer yönlerle göre daha yüksek bir mukavemet değerine işaret eder. Daha yüksek r değeri, inceltme etkisini azaltır, sacın gerilimli bölgelerinde boyun oluşumunu önler ve çekilebilirliği artırır.

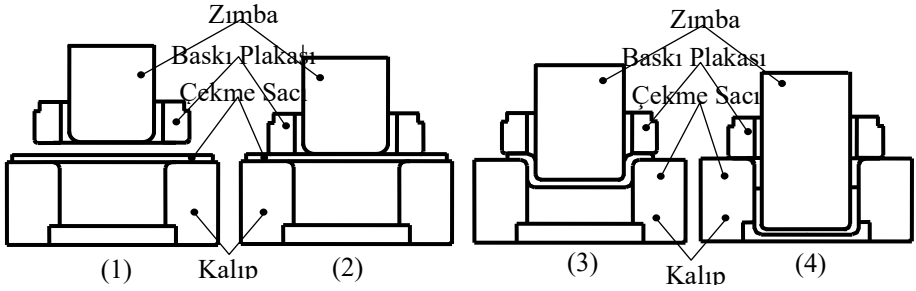
3. Derin Çekme İşleminin Mekanikliği

Derin çekme işlemi farklı aşamalardan oluşur ve işlenmemiş parçanın zımba vasıtasıyla kalıba itilmesiyle başlar ve çekilmiş kabın tamamının bir kalıp boşluğundan dışarı atılmasıyla sona erer. İşlenmemiş parça, cidar kısmında radyal çekme gerilmeleri, zımba burnu ve kalıp ağzı bölgesinde eğilme gerilmeleri ve tüm flanş kısmında çevresel basınç gerilmeleri gibi farklı nitelikte bir dizi karmaşık gerilmeye maruz kalır. Zımba yükü, işlenmemiş parçanın zımba burnu ve kalıp ağzı bölgeleri etrafında bükülmesine neden olur. Derin çekme işleminde yer alan farklı aşamalar Şekil 5'de gösterilmiştir.

Zımbanın aşağı doğru hareketi, bükülmüş parçanın kalıbın daha da içine girmesini sağlar ve Şekil 5'de gösterildiği gibi sıkı bir kap oluşturur. Zımbalama

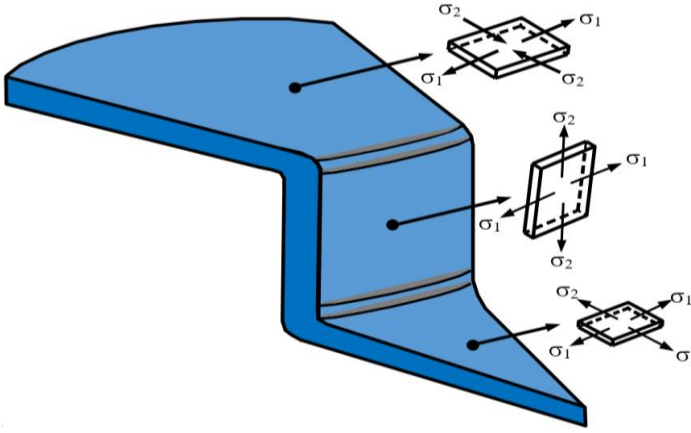
vuruşunun sonunda, sığ kap, flanşı kabın tam cidarlı bir kısmına dönüştürerek nihai bir kap haline gelir [20]. İşlem sırasında, dikey cidar çekme gerilmelerine, flanş kısmı çevresel basınç gerilmelerine ve alt kısım çift eksenli çekme gerilmelerine maruz kalır. Derin çekme işlemi sırasında, kabın flanş kısmının ve yan cidar bölgesinin deformasyona uğradığı gözlemlenmiştir. Flanшта, sürtünme kuvveti derin çekme işleminin başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesinde önemli bir rol oynar.

Çekme kuvveti, farklı takım parçalarının temas eden yüzeyleri arasındaki sürtünme kuvvetlerini aştığında, işlenmemiş malzeme kalıp boşluğuna doğru hareket eder. Çekme eğilimi, işlenmemiş malzeme kalıp açıklığına doğru hareket etmeye zorlandığında ve sürtünme kuvvetleri malzemenin kalıba girmesini engellediğinde ortaya çıkar. Flanş bölgesindeki işlenmemiş parça çevresel yönde sıkışarak çember basınç gerilmeleri ve kırışıklık oluşumuna eğilim yaratır. Kırışıklıklar, tutma kuvveti yeterli olmadığında veya sürtünme katsayısı düşük olduğunda oluşur. Dolayısıyla, çember basınç gerilmelerinin asıl kaynağı radyal gerilimdir [21].



Şekil 5. Derin çekme metodunun işlem şeması

Şekil 6'da gösterilen kabın farklı bölümlerindeki elemanlar dikkate alınarak, kap cidarının oluşumu sırasındaki gerilme durumu açıkça anlaşılabilir. Çekme gerilmeleri, çekme kuvvetinin yan cidardan flanş kısmına iletilmesi nedeniyle A elemanı ve B elemanında radyal yön boyunca gelişir. Boş kısım kalıp ağzunda uygun şekilde gerildiğinde çevresel çekme gerilmelerinin gelişeceği unutulmamalıdır. Flanшта, boş tutucu kuvveti düşükse buruşma meydana gelebilir. Yüksek boş tutucu kuvveti, metalin kalıba düzgün akışını engeller ve aşırı gerilme meydana gelerek boyun oluşumuna ve ardından cidarın yırtılmasıyla oluşan arızaya yol açabilir. Boşluğun derin çekmede incelmesinin normal bir olgu olduğu, ancak boş parçanın başlangıç kalınlığının %25'inden fazla olmaması gerektiği fark edilmiştir [5].



Şekil 6. Derin çekme işleminde deformasyon modları

Derin çekmedeki deformasyon aşağıdaki gibi özetlenebilir.

1. Kalıp ve kalıp tutucu arasındaki boşluğun saf radyal çizimi.
2. Boşluğun kalıp profili yarıçapı üzerinde bükülmesi ve kaydırılması.
3. Boşluğun zımba ve kalıp arasındaki boşlukta gerilmesi.
4. Boşluğun zımba profili yarıçapı üzerinde bükülmesi ve kaydırılması.
5. Boşluğun zımba yüzeyi üzerinde gerilmesi ve kaydırılması.

Bu kombinasyon, çekilen parçanın kalınlık değişimini esasen etkiler. Bu nedenle, kalınlık değişiminin en aza indirilmesi için seçilen işlem parametre değerlerinin optimum olması gerektiği anlaşılmalıdır. Aksi takdirde, bu değişim, gerilim ve gerilim konsantrasyonunda ani değişikliklere yol açarak kabın buruşmasına veya kırılmasına neden olur. Kabın cidar kısmının çevresel ve radyal çekme gerilmelerine maruz kaldığı ve dolayısıyla kap cidar düzlemi boyunca cidar kısmındaki her iki gerilim bileşeninin de çekme gerilmesi olduğu unutulmamalıdır.

4. Derin Çekmede Sık Görülen Hatalar

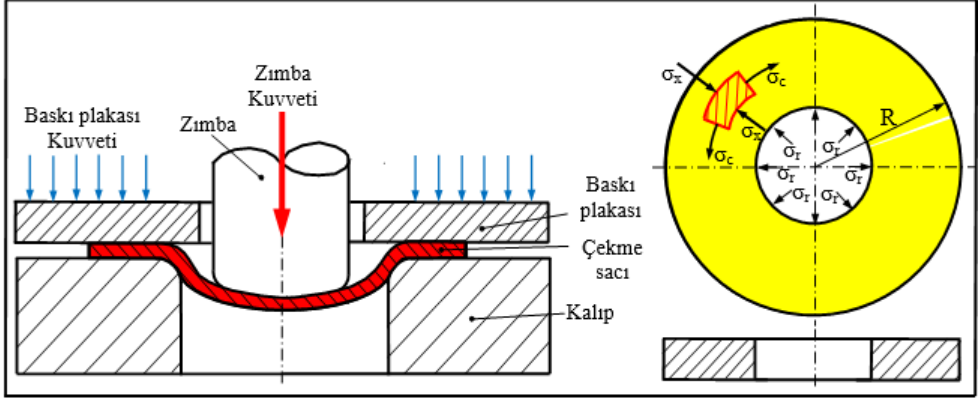
Simetrik şekle sahip, kusursuz bir ürün elde etmek için, iş parçası merkezinin kalıp merkeziyle hizalanması gerekir. İş parçası tutma kuvveti ve delme yükü, kabın başarılı bir şekilde çekilmesinde hayati bir rol oynar.

Derin çekme prosesinde kaliteye ilişkin çeşitli sorunlar şunlardır;

4.1. Buruşma:

Buruşma, yetersiz baskı plakası kuvveti nedeniyle çekme işleminde önemli bir başarısızlıktır. Şekil 7'de gösterildiği gibi, sıkıştırılabilir gerilmelere maruz kalan sacın desteksiz bölgesi, buruşmaların oluşmasının nedenidir [32, 33]. Kırıksıklık, aşırı basınç gerilmeleri altında oluşan yerel burkulmadan dolayı çekilmiş kabın flanş veya yan cidar bölgesinde gelişir [34]. Çekme Oranı (ÇO)

çok büyükse, daha yüksek çevresel sıkıştırılabilir gerilmeler oluşur ve bu da kırışıklıkların oluşmasına neden olur.



Şekil 7. Şekillendirilmiş bir kabın flanş kısmındaki gerilme durumu

4.2. Kulaklanma:

Derin çekilmiş kabın yan cidarı, kulak oluşumuna yol açan düzensiz bir yüksekliğe sahiptir. Kulaklanma, çekilmiş kabın dairesel kenarındaki dalgalanmadır. Kap cidarındaki kulaklar dört, altı veya sekiz gibi çift sayıdadır. Genellikle çoğu durumda dört kulak oluşur. Boşluğun düzlemsel anizotropik yapısı, kulaklanmanın ana nedenidir. Kulaklanma oluşumu, anizotropiyi telafi etmek için boş şeklinin uygun şekilde değiştirilmesiyle en aza indirilir.

4.3. Lokal boyun kırılması veya yırtılma:

Yırtılma ve bozulmaya hızla yol açan herhangi bir lokal boyun oluşması, şekillendirme işlemini açıkça sonlandıracaktır. Bu, tüm süreci kapsamadan, yerel bir unsur dikkate alınarak analiz edilen yerel bir kararsızlık olarak kabul edilir.

4.4. Kırılma:

Plastik deformasyona uğrayan bir elemanın neredeyse gevrek bir şekilde kırılma olasılığı vardır. Bu durum, şekillendirme amaçlı kullanılan bir sacda yaygın değildir ve genellikle öncesinde bir miktar yerel kararsızlık görülür.

5. Çekme Oranı ve Etkileyen Parametreler

Derin çekmede çekme derinliği, şekillendirilebilirliğin göstergesidir ve daha yüksek derinlik, daha yüksek Çekme Oranı (ÇO) ile mümkündür. Denklem 11'de gösterilen ÇO, çekme performansını tahmin etmek için kullanılır. Metal akış geometrisi, malzeme özellikleri ve derin çekme takımı kurulumunun tasarım parametreleri gibi çeşitli parametreler, başarılı bir şekilde çekilecek ilkel parçanın boyutunu sınırlar. Tek bir işlemde bir sac levha üzerinde gerçekleştirilecek çekme miktarının bir sınırı vardır. Çekme oranı, mümkün olan en yüksek çekme miktarını bulmaya yardımcı olur [29].

$$\text{Çekme Oranı; } \text{ÇO} = \frac{D_b}{D_p} \quad (11)$$

Sac metallerde şekillendirilebilirliği değerlendirmek için, belirli bir malzeme için LÇO'yu bulmak, takım maliyetini ve retleri azaltmak için önemli bir görevdir. LÇO, çekme işleminde kullanılan zımba boyutuna göre, arıza olmadan başarıyla çekilmiş en büyük ilkel parça boyutunun oranı olarak tanımlanır [25]. LÇO, denklem. 12 kullanılarak tahmin edilir.

$$\text{Limit Çekme Oranı; } \text{LÇO} = \frac{(D_b)_{\max}}{D_p} \quad (12)$$

Derin çekme işleminde, takım kurulum tasarımı ve çekme süreciyle ilgili birçok parametre, çekilmiş kabın kalitesini etkiler [26]. Derin çekme işleminde yer alan temel parametrelerin, derin çekme işlemindeki sorunları en aza indirmek için doğru seçilmesi gerekir. Zhou ve arkadaşlarının yakın tarihli çalışmalarına göre [27], LÇO, normal anizotropi, sürtünme katsayısı, gerinim sertleştirme üssü, kalıp ağız yarıçapı ve boşluk kalınlığının bir fonksiyonudur.

5.1. Baskı Plakası Kuvveti (BPK):

Geçmişteki araştırmalardan, BPK'nin çekilmiş parçaların kalitesini artırdığı belirtilmektedir [28]. Daha yüksek BPK kırılmaya neden olurken, daha düşük BPK kırışıklıklara neden olur. BPK, metal akışı, gerilim dağılımı, gerinim yolu, cidar incilmesi, flanş kalınlaşması vb. üzerinde birçok araştırma yapılmıştır. Baskı plakası kuvvetinin yokluğunda, flanşta kırışıklıklar ortaya çıkar. BPK için uygun bir aralık bulunur ve bu aralık, zımba-kalıp boşluğu, zımba burun yarıçapı, kalıp ağız yarıçapı, zımba hızı, yağlama sistemi, malzeme akma özellikleri, gerinim sertleşmesi ve boş/kap geometrisi gibi farklı faktörlere bağlıdır [29].

5.2. Baskı Plakası Mekanizması Türü:

Seçim için farklı baskı plakası mekanizması türleri mevcuttur. Kusursuz derin çekme ürünü üretimi için uygun bir baskı plakası mekanizması seçmek önemlidir. Çeşitli türleri şunlardır:

- (a) Sabit BPK mekanizması
- (b) Sabit baskı plakası basıncı (BPB) mekanizması
- (c) Değişken baskı plakası basıncı mekanizması
- (d) Bölümlü baskı plakası mekanizması
- (e) Sabit aralıklı baskı plakası mekanizması
- (f) Titreşimli baskı plakası mekanizması.

Sabit baskı plakası mekanizması, basitliği nedeniyle çoğu durumda tercih edilir [30].

5.3. Zimba Kuvveti ve Hızı:

Derin çekme işlemindeki delme yükü, maksimum yüke kadar delme hareketiyle orantılıdır ve uygun derin çekme presinin seçilmesine yardımcı olur. Young modülü ve akma gerilimi veya bir malzemenin gerinim sertleşmesi üssünün artması durumunda delme yükünde bir artışa neden olduğu gözlemlenmiştir. Gerinim sertleşmesi üssü değerinin $\geq 0,3$ olması çekme işlemi sırasında kırışıklıklara neden olur. Kırışıklık gelişimi arttığında, gereken delme kuvveti düzensiz hale gelir [31]. Plastik şekillendirmede hızın artması nedeniyle plastic aşırı deformasyona uğramış bölge uzamış ve bu bölgedeki mikro sertlik değeri önemli ölçüde artmıştır. Temel olarak, çekme işlemi yavaş ve kademeli olmalıdır; burada boş malzeme kritik bir gerinime maruz kalma eğilimindedir. Boş malzemenin kalıba düzgün bir hızla girmesine izin verilmelidir. Bu nedenle, çekme hızı da derin çekme takımı kurulumunun tasarımı sırasında oldukça etkili parametrelerden biri olarak kabul edilir [32].

5.4. Sürtünme ve Yağlayıcı Türü:

Sürtünme, derin çekme işlemini esasen etkileyen bir diğer önemli parametredir. Üretilen ürünün kalitesi ve takımın ömrü, temas yüzeyleri arasındaki yağlayıcı film koşullarına büyük ölçüde bağlıdır [33]. Derin çekme işleminin başlangıcında, kalıp-boş yüzey arayüzündeki statik sürtünme kuvveti, uygulanan zimba yükünden daha düşük olmalıdır. BPK statik sürtünmeyi etkiler ve çekme, zimba yükü statik sürtünme kuvvetini aştığında gerçekleşir. Dinamik sürtünme kuvveti statik sürtünme kuvvetinden daha az olacağından, zimba yükü statik sürtünmeyi aştıktan sonra zımbanın sürekli hareketi, dinamik sürtünmenin avantajından yararlanmak için oldukça önemlidir. Belirli bir yağlayıcı yağ filmi kalınlığı, derin çekme kabının yüzey kalitesini iyileştirebilir. Daha önceki araştırmalardan, daha geniş bir tam film yağlama bölgesinin, düzgün bir gerilim dağılımıyla sonuçlandığı ortaya çıkmıştır [33]. Kaliteli bir yüzey elde etmek için derin çekme işleminde uygun yağlama koşullarına ihtiyaç vardır.

5.5. Zimba-Kalıp Boşluğu:

Zimba ve kalıp arasında sağlanan kasıtlı boşluk, kalıp boşluğudur ve dikkate alınması gereken kritik faktörlerden biridir. Sac kalınlığının %7 - %14'ü kadar radyal boşluk önerilir. Yetersiz boşluk, ilkel parçanın kesilmesine neden olabilir. Takım düzeneği tasarlanırken, radyal boşluk daha azsa, haznenin ütüleme etkisi nedeniyle kırılma eğiliminde olduğu akılda tutulmalıdır. Kalıp iç çapı, zimba ve kalıp arasında gereken boşluğa bağlıdır. Zimba ve kalıp arasındaki bu boşluk, ilkel parçanın kalınlığına, kullanılan malzemeye, yüzey kalitesine ve yağlayıcıya bağlıdır.

5.6. Zimba Burnu ve Kalıp Ağız Yarıçapları:

Keskin köşe veya daha düşük Zimba Ucu Radyüsü (ZUR), kabın kırılmasına neden olabilir ve daha büyük ZUR, flanşta kırışıklıklara neden olur. Daha küçük

bir kalıp köşesi yarıçapı, flanşın kırılmasına neden olur. Zimba burnu yarıçapı büyük değerlerde olduğunda, zimba bölgesindeki malzeme, kap cidarının diğer bölgelerine göre daha fazla deforme olur. Bu durum, metalin aşırı bükülmesi ve gerilmesi nedeniyle ZUR'de yüksek gerilim konsantrasyonuna yol açarak daha fazla incelmeye neden olur. Bu incelme olayı, ZUR'nin artmasıyla artar ve maksimum incelme zimba burnu bölgesinde meydana gelir. ZUR, kesme gerilimi ve kesme gerilimi dağılımı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. ZUR'deki bir artışın, kesme gerilimi ve/veya kesme geriliminde önemli değişikliklere neden olduğu unutulmamalıdır. Derin çekme işleminde, yırtılma ZUR'nin üst kenarına daha yakın bir yerden başlar. ZUR'nin, boşluk kalınlığının dört katından az veya boşluk kalınlığının 10 katından fazla olmasının LÇO üzerinde çok fazla bir etkisi olmayacağı gösterilmiştir. Kalıp ağız yarıçapı (KAY) genellikle iş parçasının boyutuna ve kalınlığına bağlıdır. KAY'deki artış, delme yükünün yanı sıra LÇO'yi de artırır [29, 30]. Kalıp ağız yarıçapındaki artış, boşluk ve boşluk tutucu arasındaki temas alanında bir azalmaya neden olur. Kırıksıklık oluşma olasılığını artırır [34]. Zaid ve diğerlerine göre, kalıp ağız yarıçapının maksimum boyutu, boşluk kalınlığının 15 katından fazla olmamalıdır. Kalıp ağız yarıçapı, boşluk kalınlığının 6 - 10 katı aralığında olmalıdır [35, 36].

5.7. İlkel Parça Isıtma Sistemi:

Sıcak şekillendirme koşullarında deneyler yapmak için ilkelmadelerin sıcaklığını yükseltmek amacıyla uygun bir ısıtma sistemi kullanılır. Harici ısıtma durumunda, ilkelmadeler bir fırında ısıtılır ve derin çekme işlemi için herhangi bir sıcaklık kaybı olmadan prese aktarılır. Bu işlem sırasında, taşıma sırasında oluşabilecek herhangi bir ısı kaybı, sıcaklıkta bir düşüşe neden olabilir. Dahili ısıtma işleminde ise ilkelmade, presin içinde ısıtılır ve bu sayede sıcaklık üzerinde yakın bir kontrol sağlanır. Daha yüksek LÇO elde etmek için sıcak çekme işleminde sıcaklık gradyanı önemli olduğundan, zimba oda sıcaklığında tutulurken takım düzeneğinin kartuş veya bant tipi ısıtıcı kullanılarak eşit şekilde ısıtılması gerekir. Isıtma harici veya dahili olabilir, ancak basitliği nedeniyle ilkelmadeyi takım düzeneğinin içinde ısıtmak için dahili ısıtma yöntemi tercih edilir.

5.8. İlkel Parçanın Şekli:

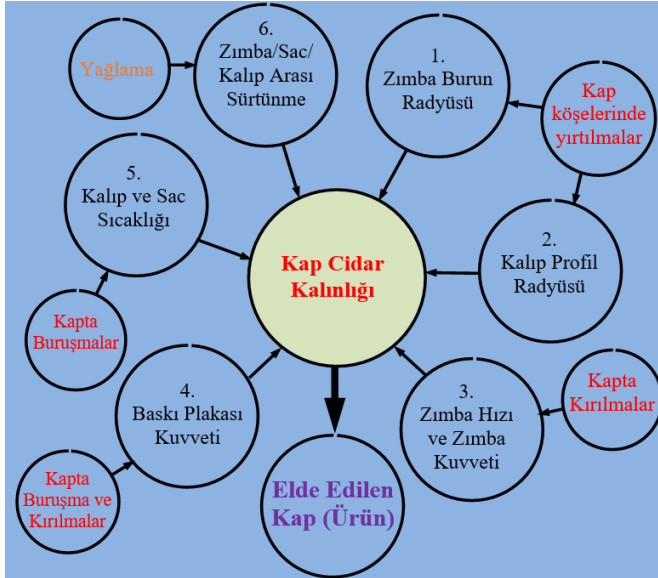
Kusurları azaltmak için boş şekil etkisinin kapsamlı bir şekilde bilinmesi önemlidir. Boş şekil optimizasyon süreci, Taguchi DoE yöntemiyle birleştirilmiş Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEM) kullanılarak gerçekleştirilebilir. Eliptik veya kare kap derin çekme işleminin çok aşamalı bir işlemle gerçekleştirildiği durumlarda, boş şekil doğru bir şekilde yapılandırılmalıdır, çünkü bu, boş şeklin tüm boşluk üzerindeki ve özellikle köşelerdeki gerilim dağılımını büyük ölçüde etkiler. Boş şekil optimizasyonu, SEM, Yapay Sinir Ağı (YSA) modelleri vb. kullanılarak çeşitli tekniklerle yapılabilir. Optimizasyon için, sayısal yöntemler kullanılarak bir meta model geliştirilebilir ve bir optimizasyon algoritmasıyla

birleştirilebilir. Bu, daha fazla zaman ve maliyet gerektiren deneysel yöntemle kıyasla boş şeklin optimum şeklini bulmaya yardımcı olur.

6. Derin Çekme İşlemi İçin Sebep-Sonuç Diyagramı

Derin çekme işlemini etkileyen faktörlerin seçimi çok önemlidir ve deneylerde kritik bir aşamadır. Bazı önemli faktörler deneysel testlerden farkında olmadan çıkarılırsa, deneysel testlerden toplanan bilgilerin olumlu bir anlamı olmayacaktır. Nihai amaç, iyi kalitede bir derin çekme kabı üretmektir. Araştırmada ortaya konan faktörler, iyi kalitede bir kap üretme hedefiyle alakalı olmalıdır. Her deney için birçok faktör olduğu düşünülmüştür. Deneysel çalışmanın ilk aşaması, deneyden kaybolan veya hiç etkilenmeyen parametrelerin ayrılmasına odaklanır. Literatür taramasıyla belirlenen önemli parametreler, neden-sonuç diyagramında gösterilmiştir (Şekil 8).

Optimize edilmiş bir tasarımın formülasyonunda, kontrol parametreleri ve gürültü parametrelerinin derinlemesine incelenmesi gerekir. Kontrol parametreleri, değerleri tasarımcının bir ürün veya sürecin daha iyi veya optimum tasarımı için kontrol etmesi gereken sonuç parametresini belirleyen parametrelerdir. Gürültü parametreleri, bir üreticinin maliyet 30 nedenden dolayı kontrol etmek istemediği parametrelerdir; Çünkü gürültü parametrelerinin sürekli olarak kontrol edilmesi ya çok pahalıdır ya da imkansızdır. Araştırmanın odak noktası, gerçek kontrol parametrelerinin etkisi olmalıdır.



Şekil 8. Derin çekme işleminde sebep-sonuç diyagramı

Bazı önemli faktörlerin deneylerden çıkarılması, çıktıda yanlış bilgi toplanmasına yol açar. Derin çekme işlemine dahil edilecek faktörler, kaliteli

kaplar üretme amacıyla ilgili olanlardır. Amaç, derin çekme kabının kalınlık homojenliğini iyileştirerek kaliteyi artırmaktır. Derin çekme işleminde etkili olan girdi parametreleri şunlardır:

1. Kalıp Ağız Yarıçapı
2. Zimba Burun Yarıçapı
3. Baskı Plakası Kuvveti
4. Zimba hızı
5. Zimba ve kalıp arasındaki boşluk
6. Yağlama
7. Çalışma sıcaklığı
8. Baskı plakası kalınlığı
9. Malzeme özellikleri

6. Mevcut Çalışmanın Kapsamı ve Amaçları

Derin çekme işleminin şekillendirme özellikleri hakkında yeterli bilgi olmadan, şekillendirilen kaplardaki kusurların oluşumunu azaltmak mümkün olmazdı ve işlem parametrelerinin optimizasyonu daha yüksek şekillendirilebilirlik elde edilmesine yardımcı olurdu. Daha yüksek şekillendirilebilirlik elde etmek, çok aşamalı derin çekme işleminde gereken aşama sayısını azaltacaktır. Çok aşamalı derin çekme işlemindeki aşama sayısı, şekillendirilebilirlik karakteri LÇO ile değerlendirilebilir. Bu nedenle, mevcut geleneksel yöntem çok sayıda test gerektirdiğinden, deneysel testlerin en aza indirilmesi yoluyla LÇO'nin değerlendirilmesi önemlidir. Dolayısıyla, LÇO'nin belirlenmesinde yeni yöntemlerin geliştirilmesi için daha fazla alan bulunmaktadır.

Mevcut araştırma çalışması şunlara odaklanmıştır:

1. Derin çekme düzeneğinin tasarımı ve geliştirilmesi.
2. Yüksek oranda etkili olan derin çekme işlemi parametrelerinin optimizasyonu.
3. Optimize edilmiş parametreler kullanılarak oda sıcaklığında ve farklı sıcaklıklarda AA6111 Alüminyum alaşımı üzerinde geleneksel yöntemle LÇO'nin belirlenmesi için deneysel testlerin yapılması.
4. Farklı sıcaklıklarda Bakır C11000 boşlukları kullanılarak LÇO tayini için derin çekme testinin tekrarlanması.
5. Kritik delme yükü kavramı kullanılarak hızlı tayin yöntemi ile LÇO tayini.

6. Hızlı tayin yöntemi ile elde edilen deneysel sonuçların simülasyon çalışması ve doğrulanması.

7. Derin Çekme İşlemi İçin Etki Eden Parametrelerin Seçimi

Optimum tasarım için takım kurulumu, etki eden parametrelerin belirlenmesi ve istenen çıktıyı elde etmek için deneylerin tasarımı yoluyla bu parametreler için optimum seviyenin seçilmesinden oluşur. Esasen, takıma, işleme ve malzemeye ait çeşitli parametreler çekme işlemini etkiler ve her parametrenin optimum değerini bulmak karmaşık bir iştir. Literatürde, ZUR (Zımba Ucu Radyüsü), KAA (Kalıp Ağız Açısı) ve BPK'nin (Baskı Plakası Kuvveti) derin çekme parçasının kalınlığı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Boşluk bir diğer önemli parametredir ve kalıp ile zımba arasında uygun bir boşluk gereklidir. Boşluk için önerilen ampirik formül şöyledir:

$$\text{Boşluk; } C_{dp} = t_b + K_c \cdot \sqrt{10 \cdot t_b} \quad (3.1)$$

Burada t_b , kalıp boşluğu ve K_c , orantılılık sabitidir ve değeri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1: Farklı malzemeler için K_c değeri

Sıra No	Malzeme	K_c
1	Çelik	0.07
2	Alüminyum	0.02
3	Bakır	0.04

ZUR değerinin, levha kalınlığının iki katından az olması durumunda, kabın yırtılma nedeniyle bozulmasına, 10 katından fazla olması durumunda ise levhanın ciddi şekilde gerilmesine neden olduğu bulunmuştur. Zein ve ark.'na [46] göre, tercih edilen parametre aralıkları aşağıdaki gibidir.

ZUR, levha kalınlığının dört ila on katı olmalıdır.

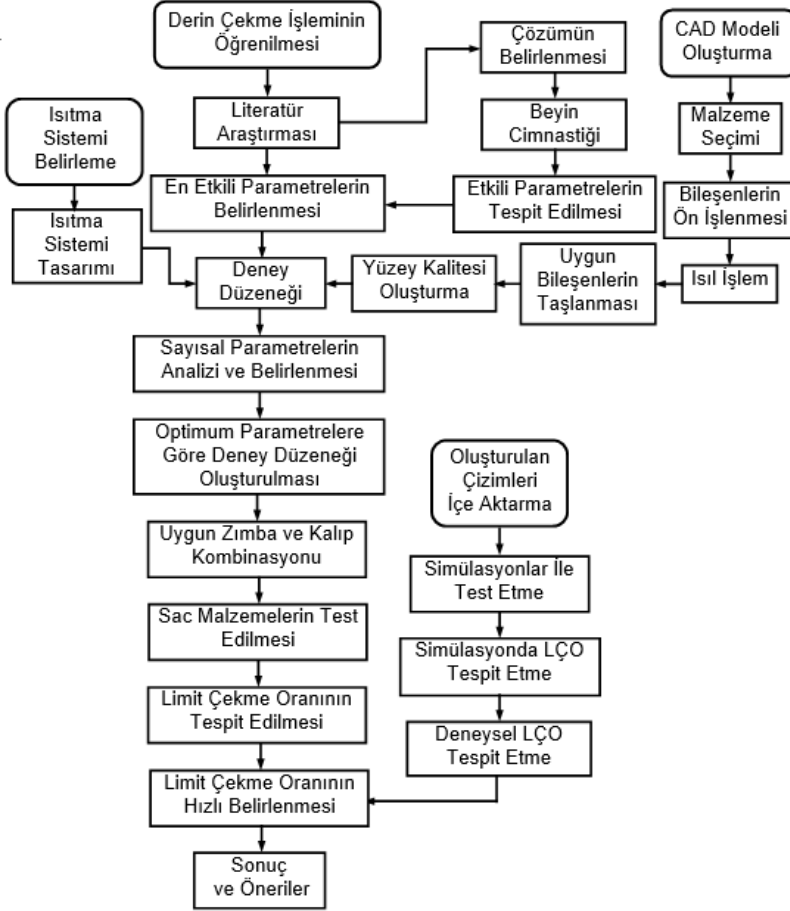
KAA, levha kalınlığının dört ila on katı olmalıdır.

BPK, delme yükünün 1/3 katından fazla olmamalıdır.

Naranjie ve ark. [37] tarafından önerilen KAA ve ZUR değerleri, sac kalınlığının en az dört katı olmalıdır. Gerekenden az olması durumunda, şekillendirme işlemi sırasında kabın alt kısmında aşırı incelme/kırılma meydana gelir. ZUR, KAA ve BPK değerleri, derin çekilmiş ürünün kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

8. Sonuç

Bu çalışma, derin çekme işlemiyle ilgili sac metal şekillendirmenin önemini ve gelişimini açıklamaktadır. Şekillendirilebilirlik ve değerlendirme yöntemleri gözden geçirilmiştir. Şekil 9, bu araştırma çalışmasında gerçekleştirilen farklı faaliyetleri gösteren akış diyagramını göstermektedir.



Şekil 9. Derin çekme işlemi için iş akışı diyagramı

LÇÖ değerlendirmesinin belirlenmesinde kullanılan geleneksel yöntem, sıcak derin çekme ve sac metal şekillendirmede SEM uygulamaları incelenmiştir. Sıcak derin çekme, kompozit malzemeler ve Taguchi teknikleri de bu alanlarda önemli gelişmeler kaydedildiği için incelenmiştir. Araştırma sonuçlarına göre, LÇÖ'nin şekillendirilebilirlik değerlendirme testlerinden biri olduğu ve hafif malzemeler için hızlı belirleme yöntemiyle LÇÖ'nin belirlenmesinin daha fazla araştırmaya açık olduğu görülmüştür.

References

- [1] F., Karaca, E., Ünal, I., Can, Investigation of braking performance and thermal effect of sintering of brake pads with Al₂O₃ additive, Thermal Science: Year 2022, Vol. 26, Special Issue 1, pp. S67-S73.
- [2] E., Ünal, F., Karaca, F., Sarsılmaz, Investigation of interface microstructure properties of AISI316L, AISI 4140 steel couple welded by friction welding process, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 34:2 (2019) 701-708
- [3] C. Özek, A. Hasçalık, U. Çaydaş, F. Karaca, E. Ünal, Turning Of Aıısı 304 Austenitic Stainless Steel, Journal of Engineering and Natural Sciences, Sigma 2006/2, 117-121.
- [4] F., Karaca, Effect of turning parameters of AISI 316 stainless steel on temperature and cutting forces with finite element model, Thermal Science 2022 Volume 26, Issue Spec. issue 1, Pages: 61-66.
- [5] SL., Semiatin. Introduction to Bulk-Forming Processes. ASM Handbook, Vol. 14 A, Metalworking: Bulk Forming, 14:3–10, 2005.
- [6] Schuler GmbH. Metal forming handbook. International Journal, 1998.
- [7] A.C. Reardon. Metallurgy for the Non-Metallurgist. ASM International, 2011.
- [8] 4. F., Karaca, I., Can, Effects of grain size on the performance of brake linings with Al₂O₃ additives, 2021 Materials Testing 63(9):822-828.
- [9] M., P., Groover. Fundamentals of modern manufacturing: materials processes and systems. John Wiley & Sons, 2007.
- [10] J., Adamus, P., Lacki, J., Lyzniak, and Zawadzki M. Analysis of spring-back during forming of the element made of AMS 5604 steel. Archives of metallurgy and materials, 56(2):422–430, 2011.
- [11] A., E., Tekkaya, N., Ben Khalifa, G., Grzancic, and R., Holker. Forming of Lightweight Metal Components: Need for New Technologies. Procedia Engineering, 81(1):28–37, 2014.
- [12] F., Karaca, I., Can, Effect of additive cashew grain size on brake performance of non-asbestos linings, Journal of Mechanical Science and Technology 35 (12) 2021, 5461-5468
- [13] E., Ünal, B., Akın, F., Karaca, Kare Profilli Kapların Açılı Derin Çekme İşlem parametrelerinin Etkilerinin Bulanık Mantık İle Modellenmesi, International Journal of Innovative Engineering Applications, Vol. 6, no. 2, pp. 334–339, Dec. 2022.
- [14] S., Patil and P., Moon. Formability Analysis of Single Stage Drawing of Cylindrical Cup Using Altair HyperWorks. International Journal of Digital Application & Contemporary Research, 4(4):1–9, 2015.

- [15] S., S., Anarestani, MR., Morovvati, and Y., A., Vaghasloo. Influence of anisotropy and lubrication on wrinkling of circular plates using bifurcation theory. *International Journal of Material Forming*, 8(3):439–454, 20, 2014.
- [16] AC., S., Reddy, S., Rajesilkel, and P., R., Reddy. Experimental Study on Strain Variation and Thickness Distribution in Deep Drawing of Axisymmetric Components.
- [17] E., Ünal, U., Özkan, AISI 304 Östenitik Paslanmaz Çelik Kare Kapların Derin Çekme Performansı: Kalıp Geometrisi ve Parametre Optimizasyonu, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt: 37 Sayı: 2, 533 - 541, 30.09.2025
- [18] S., Kalpakjian, KS., V., Sekar, and S., R., Schmid. *Manufacturing, Engineering and Technology*. Pearson, 7 edition, 2006.
- [19] A., C., Reddy. Formability of High Temperature and High Strain Rate Superplastic Deep Drawing Process for AA2219 Cylindrical Cups. *International Journal of Advanced Research*, 3(10):1016–1024, 2015.
- [20] G., Z., Voyiadjis and P., I., Kattan. *Mechanics of composite materials with MATLAB*. Springer Science & Business Media, 2005.
- [21] C., Özek, E., Ünal, 2011. Optimization and modeling of angular deep drawing process for square cups. *Mater. Manuf. Process*. 26, 1117–1125.
- [22] J., Hu, Z., Marciniak, J., Duncan. *Mechanics of sheet metal forming*. Butterworth-Heinemann, 2002.
- [23] S., Schindler, P., Steinmann, J., C., Aurich, M., Zimmermann. A thermo-viscoplastic constitutive law for isotropic hardening of metals. *Archive of Applied Mechanics*, 87(1):129–157, 2017.
- [24] J., Isselin, A., Iost, J., Golek, D., Najjar, M., Bigerelle. Assessment of the constitutive law by inverse methodology: Small punch test and hardness. *Journal of Nuclear Materials*, 352(1-3):97–106, 20 2006.
- [25] M., Šiser and Ján Slota. Material Model of AW5754 H11 Al Alloy for Numerical Simulation of Deep Drawing Process. *Acta Mechanica Slovaca*, 20:32–40, 2016.
- [26] W., Dahl, W., Hesse, A., Krabiell, HJ., Rosezin. Influence of yielding behaviour and stress-strain law on the failure analysis. *Nuclear engineering and design*, 76(3):309–318, 1983.
- [27] Y., Kim and Y., Son. Study on wrinkling limit diagram of anisotropic sheet metals. *Journal of Materials Processing Technology*, 97(1-3): 88–94, 2000.
- [28] W., Tang, S., Huang, D., Li, and Y., Peng. Mechanical anisotropy and deep Drawing behaviors of AZ31 magnesium alloy sheets produced by

- unidirectional and cross rolling. *Journal of materials processing technology*, 215:320–326, 2015.
- [29] C., Özek, E., Ünal, 2012. The effect of die / blank holder angles on limit drawing ratio and wall thickness in deep drawing of square cups. *J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ.* 27, 615–622.
- [30] I., K., Irthiea. Process analysis and design in micro deep drawing utilizing a flexible die. PhD thesis, University of Glasgow, 2014.
- [31] V., Chiles, S., Black, A., Lissaman, S., Martin. *Principles of engineering manufacture*. Butterworth-Heinemann, 1996.
- [32] J., Hematian and P.M., Wild. Initial imperfections and the initiation of wrinkling in finite element modelling of deep drawing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 214(1):63–73, 2000.
- [33] W., Liu, Y., Xu, and S., Yuan. Effect of Pre-bulging on Wrinkling of Curved Surface Part by Hydromechanical Deep Drawing. *Procedia Engineering*, 81:914–920, 2014.
- [34] T., Jimma, Y., Kasuga, N., Iwaki, O., Miyazawa, E., Mori, K., Ito, and H., Hatano. An application of ultrasonic vibration to the deep drawing process. *Journal of Materials Processing Technology*, 80:406–412, 1998.
- [35] H., Nie, C., Chi, H., Chen, Xi., Li, and W., Liang. Microstructure evolution of Al/Mg/Al laminates in deep Drawing process. *Journal of Materials Research and Technology*, 2019.
- [36] P., Mpatil and PS. Bajaj. Tool design of cylindrical cup for multi-stage Drawing process. *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology*, 3(2):100–106, 2013.
- [37] Xi., Zhou, Lu., Lu, F., Wang, B., Ding, and W., Gong. Prediction of the limiting redrawing ratio.
- [38] M., Dezelak, A., Stepisnik, I., Pahole, and M., Ficko. Evaluation of twist springback prediction after an AHSS forming process. *International Journal of Simulation Modelling*, 13(2):171–182, 2014.
- [39] L., Duchêne and A., M. Habraken. Analysis of the sensitivity 30 of SEM predictions to numerical parameters in deep drawing simulations. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 24(4):614–629, 2005.
- [40] L., Gunnarsson and E., Schedin. Improving the properties of exterior body panels in automobiles using variable blank holder force. *Journal of Materials Processing Technology*, 114(2):168–173, 2001.

- [41] V., Naranje and S., Kumar. A knowledge based system for automated design of deep drawing die for axisymmetric parts. *Expert Systems with Applications*, 41(4):1419–1431, 2014.
- [42] A., Hiremath and N., Ramesha. The Significant Variables that Affect Metal During Deep Drawing Process in Sheet Metal Work. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 4(05, May-2015), 2015.
- [43] C., Coa, P., Singh and G., Agnihotri. Study of Deep drawing Process Parameters: A Review. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 6(2):103–106, 2015.
- [44] I., Suchy. *Handbook of die design*, volume 2. McGraw-Hill New York, 2006.
- [45] A., IO Zaid and Fadhil A., Hashim. Effect of Punch and Die Profile Radii on Deep drawing of Galvanized Steel. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 8(1), 2017. 20
- [46] H., Zein, M., El-Sherbiny, M., Abd-Rabou, and M. El Shazly. Effect of Die Design Parameters on Thinning of Sheet Metal in the Deep Drawing Process. *American Journal of Mechanical Engineering*, 1(2):20–29, 2013.

BÖLÜM 3

Parçacık Takviyeli Alüminyum Kompozitler: Sıvı Tabanlı Üretim Yöntemlerinden Yarı- Katı Proseslere

Nilhan Ürkmez Taşkın¹ & M. Emin Yurci

¹ Doç. Dr., Trakya Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü,
ORCID: 0000-0003-2251-3889

Bu kitap bölümü, değerli hocam Prof. Dr. Mehmet Emin Yurci'nin anısına ithaf edilmiştir.

Malzeme bilimindeki yenilikler, teknolojik alanlarda çalışan tasarımcılar için daima anahtar rol oynamıştır. Yeni bir malzemenin geliştirilmesi veya mevcut malzemelerin daha üstün özellikler kazandırılarak iyileştirilmesi, bu malzemelerin kullanıldığı tüm teknolojik alanlarda hızlı ve büyük ölçekli ilerlemelere yol açmıştır (Callister & Rethwisch, 2021; Ashby & Jones, 2012). Malzeme özelliklerinin kontrol altına alınabilmesi, mühendislik tasarımının sınırlarını genişleterek yüksek performans, güvenilirlik ve enerji verimliliği gerektiren modern uygulamalara zemin hazırlamıştır.

Parçacık takviyeli alüminyum esaslı metal matrisli kompozitler (Al-MMC'ler), yüksek özgül dayanım-modül, aşınma direnci, boyutsal kararlılık ve ısı iletkenlik gibi mühendislik özelliklerinin tek bir malzemede bir araya getirilebilmesi nedeniyle modern imalat teknolojilerinde geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Bu özelliklerin elde edilebilmesi, büyük ölçüde matris-takviye arayüzeyinin kontrol edilmesine ve üretim yönteminin doğru seçilmesine bağlıdır. Geleneksel sıvı tabanlı üretim yöntemleri, maliyet ve ölçeklenebilirlik açısından avantaj sunmakla birlikte, ısılatılabilirlik sınırlamaları, parçacık aglomerasyonu ve arayüzey reaksiyonları gibi önemli problemler yaratabilmektedir. Bu nedenle son yıllarda, takviye ilavesi ve karıştırma aşamalarında metalin yarı-katı halde olduğu yeni nesil üretim teknikleri, parçacık takviyeli Al kompozitlerin daha homojen, daha kararlı ve istenen özelliklerde üretilmesi için umut vadeden bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Bu bölümde parçacık takviyeli Al kompozitlerin gelişimi, sıvı tabanlı üretim yöntemlerinin temelleri, avantaj ve sınırlamaları incelenmekte; ardından yarı-katı proseslerin bu yöntemlere göre sağlayabileceği potansiyel kazanımlar tartışılmaktadır.

Metal Esaslı Kompozit Malzemeler (MMK)ve Gelişim Süreci

Doğada yaygın olarak bulunan çok fazlı yapıların, insanlık tarihinin en eski dönemlerinden itibaren gözlemlenip taklit edilmesi, insan yapısı kompozit malzemelerin ortaya çıkışının başlangıcı olarak kabul edilmektedir. Farklı malzemelerin istediği özelliklerini tek bir yapıda birleştirmeyi başaran insanoğlu, kompozit malzemeleri yaşamı kolaylaştırmak, çevresel etkilerden korunmak, çeşitli alanlarda üstün performans sağlamak ve yapısal sınırlamaları aşmak amacıyla geliştirmiştir (Hull & Clyne, 1996; Mallick, 2007).

Kompozit malzemelerin erken dönem kullanım örnekleri oldukça eskiye dayanmaktadır. Örneğin, Moğollar 13. yüzyılda hayvansal lifler, ağaç lifleri, ipek ve doğal yapıştırıcılardan oluşan çok katmanlı malzeme sistemlerini ok ve yay yapımında kullanmışlardır. Eski İsrail

topluluklarının çamur ve saman karışımından oluşturdıkları briketler de ilkel kompozit yapılar arasında sayılmaktadır. Mısırlılar ağaç talaşı ve doğal reçineleri birleştirerek erken dönemin takviyeli malzemelerini üretmişler; Ortaçağ'da ise kılıçlar ve zırhlar, günümüz tabakalı kompozit malzemelerinin ilk örnekleri sayılabilecek çok katmanlı yapılar şeklinde imal edilmiştir (Strong, 2008).

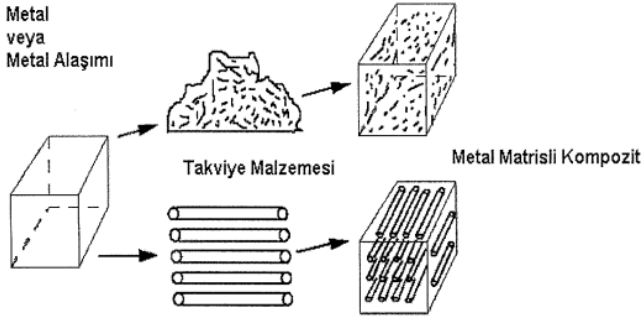
Bu tarihsel örnekler, kompozit malzeme teknolojisinin modern mühendislik tanımından çok önce var olduğunu ve insanoğlunun doğadaki yapıların işlevsel özelliklerini taklit ederek gelişmiş malzemeler üretme çabasının ne kadar eskiye dayandığını göstermektedir.

Tabakalı ve sandviç yapıli kompozit malzemeler ilk olarak 1940'lı yıllarda radar güdümlü *The Mosquito* uçağının iç bölmelerinde kullanılmış ve bu uygulama modern kompozit teknolojisinin öncülerinden biri olmuştur. Cam elyaf takviyeli polyester kompozitler ise II. Dünya Savaşı sırasında savaş uçaklarının kapı, panel ve kaplama elemanlarında hafiflik ve dayanım sağlamak amacıyla yaygın biçimde kullanılmaya başlanmıştır. Cam elyaf takviyeli kompozitlerin başarısı, daha sonra Polaris sınıfı denizaltıların roket kaplamalarında kullanılmalarının ardından uzay sanayisinde de kabul görmeleriyle devam etmiştir (Strong, 2008; Mallick, 2007).

1950'li yıllarda cam elyaf üretim teknolojilerinde önemli ilerlemeler kaydedilmiş ve yüksek performanslı cam elyaflar üretilmiştir. 1950'lerin sonlarına doğru araştırmacılar daha yüksek dayanımlı takviye malzemeleri geliştirebilmek amacıyla hafif metallere yönelmiş ve bor elyafı bu çalışmaların ilk başarılı sonuçlarından biri olmuştur. Bu gelişmeyi sırasıyla karbon elyaf, berilyum oksit elyafı ve grafit elyafının üretimi izlemiştir. Bu yüksek dayanımlı elyafların veya filamentlerin alüminyum gibi metal matris malzemeleriyle birleştirilmesiyle metal matrisli kompozitlerin (MMK) geliştirilmesi mümkün hâle gelmiş ve MMK'lar özellikle savunma ve havacılıkta kullanılmaya başlanmıştır (North American Defense Industrial Base Organization (NADIBO, 1993).

1970'li yıllarda savunma ve uzay sanayilerinin gereksinimleri doğrultusunda yoğun şekilde araştırılmaya başlanan MMK'lar, özellikle son on yılda otomotiv, elektronik, makine mühendisliği ve enerji teknolojileri gibi pek çok endüstriyel alanda yaygın kullanım alanı bulmuştur (Rawal, 2001; Kar et al., 2024). Klasik mühendislik malzemelerinde bir araya getirilemeyecek birden fazla özelliğın aynı yapıda toplanabilmesi ve matris-takviye kombinasyonlarının tasarım gereksinimlerine göre ayarlanabilmesi, kompozit malzemelerin

mühendislik uygulamalarındaki önemini artıran temel etkenlerdir (Hull & Clyne, 1996; Mallick, 2007).



Şekil 1. 1. Metal matrisli kompozitlerin şematik tanımı (NADIBO, 1993)

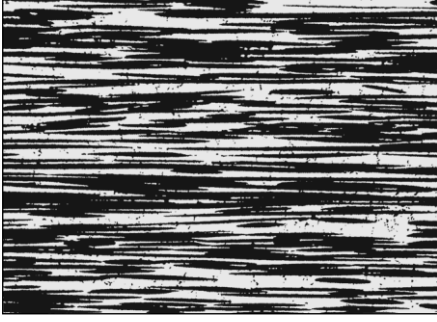
MMK'larda matris ve takviye çeşitliliğinin geniş olması, çok farklı malzeme kombinasyonlarının tasarlanmasına olanak tanımakta; böylece belirli uygulamalar için hedeflenen mekanik, termal ve tribolojik özelliklerin elde edilmesine imkân vermektedir (Kaczmar et al., 2000; Torralba et al., 2003).

Çizelge 1.1. MMK'ların takviye biçimi , türü ve matris malzemelerine göre sınıflandırılması (NADIBO, 1993; Hull & Clyne, 1996; Chawla & Chawla, 2018; Kar et al., 2024).

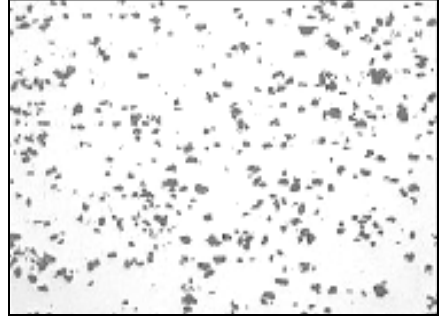
Takviye Türü	Takviye Formu	Tipik Matris Malzemeleri	Yaygın Takviye Malzemeleri
Süreksiz Takviyeli MMK'lar	Parçacık (particle)	Al, Mg, Cu, Zn	SiC, Al ₂ O ₃ , TiC, B ₄ C, WC
	Kısa elyaf / kırılmış elyaf	Al, Mg	Al ₂ O ₃ , SiC
	Whisker	Al, Mg	SiC, Al ₂ O ₃
Sürekli Takviyeli MMK'lar	Sürekli elyaf	Al, Ti, Mg, Cu	Al ₂ O ₃ , SiC, B ₄ C, C
	Monofilament / tel	Al, Ti	B, W, SiC
	Dokuma / iplik	Al, Ti	Karbon, Al ₂ O ₃

Takviye Malzemesi Grubu	Örnekler	Temel Kazanım
Seramik takviyeler	SiC, Al ₂ O ₃ , TiC, B ₄ C	Sertlik, aşınma direnci
Karbon esaslı takviyeler	Grafit, karbon elyaf	Düşük yoğunluk, ısıl kararlılık
Bor esaslı takviyeler	Bor, B ₄ C	Yüksek modül
Nitrür ve karbürler	TiN, Si ₃ N ₄ , WC	Yüksek sıcaklık dayanımı

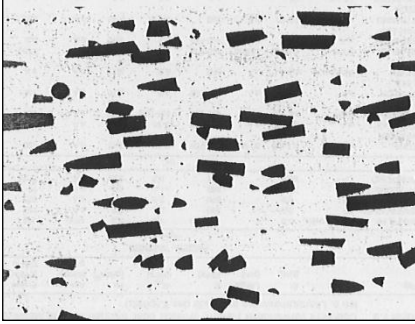
Matris Türü	Tipik Alaşımlar	Kullanım Alanı
Alüminyum esaslı MMK'lar	Al-Si, Al-Mg, Al-Cu	Otomotiv, havacılık, savunma
Magnezyum esaslı MMK'lar	Mg-Al, Mg-Zn	Hafif yapı uygulamaları
Titanyum esaslı MMK'lar	Ti-6Al-4V	Yüksek sıcaklık, uzay
Bakır esaslı MMK'lar	Cu-Cr, Cu-Al	Elektrik ve ısıl iletken uygulamalar



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 1.3. Metal matrisli kompozit malzemelerde takviye örnekleri (a) Sürekli elyaf takviye, (b) Parçacık takviye, (c) Whisker takviye, (d) Süreksiz elyaf takviye (Nicoara, 1999)

Örneğin, seramik elyafla takviye edilen alüminyumun dayanım ve rijitlik özellikleri, ağırlığını pek fazla değiştirmeden % 300 artırılabilir, alüminyum metali 600° F sıcaklıkta dayanımının büyük bir kısmını kaybettiği halde, takviyeli alüminyum oda sıcaklığındaki dayanımının % 90'ını yüksek sıcaklıklarda korumaya devam etmektedir.

Başka bir örnek verilecek olursa, uçaklarda kullanılan elektronik cihazların ambalajları veya montaj edildiği parçaların, düşük termal genleşme katsayısına,

düşük termal iletkenliğe ve düşük yoğunluğa aynı anda sahip olması istenmekte, fakat oldukça pahalı ve toksik özelliklere sahip olan berilyum haricinde hiçbir metal bu üç özelliği aynı anda sağlayamamaktadır, bu durumda, MMK'lar uygulanabilir alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır. Oldukça yüksek modüllere sahip (ultra-high modulus graphite) grafit ile kombine edilerek üretilen alüminyum bu istenen üç özelliği aynı anda sağlayarak ihtiyaca cevap vermektedir.

1. Parçacık Takviyeli Alüminyum Kompozitler

Farklı tür ve şekillerdeki takviye fazlarıyla üretilen metal matrisli kompozitler (MMK) içinde parçacık takviyeli sistemler, yüksek sıcaklık dayanımı, üstün aşınma direnci, daha düşük maliyet ve üretim kolaylığı gibi avantajları nedeniyle diğer takviye türlerine göre daha geniş kullanım alanı bulmuştur (Kaczmar et al., 2000; Torralba et al., 2003; Kar et al., 2024). Parçacık takviyeli MMK'ların toz metalürjisi veya döküm yöntemleriyle üretildikten sonra ekstrüzyon, dövme ve haddeleme gibi ikincil şekil verme işlemlerine yüksek uyum göstermesi, bu malzemelerin endüstriyel uygulamalarda tercih edilme nedenlerini güçlendirmektedir (Hanumanth & Irons, 1993; Suhuddin et al., 2019). Özellikle alüminyum esaslı kompozitlere uygulanan uygun ısıl işlemler sonucunda geleneksel alaşımlara kıyasla çok daha yüksek sertlik, aşınma direnci ve ısıl şok dayanımı elde edilebildiği literatürde geniş biçimde rapor edilmiştir (Long et al., 1999; Elango & Kumar, 2021; Alam et al., 2023). Son yıllarda yürütülen çalışmalar, dövme, ekstrüzyon ve haddeleme gibi ikincil işlemlerin uygulanabilirliğinin artmasıyla, parçacık takviyeli MMK'larda yüksek ölçü hassasiyetine ulaşılabildiğini ve bu malzemelerin modern imalat süreçlerinde daha yaygın bir yere sahip olduğunu göstermektedir (Zulfia et al., 1999; Umanath et al., 2022; Kar et al., 2024). Malzeme araştırmacıları tarafından "The materials of the future and always will be" olarak tanımlanarak ileri kompozitler sınıfına dahil edilen MMK'lar, gelişen üretim yöntemlerinin de etkisi ile değişik uygulama alanlarında teknik ve ticari başarı kazanmaya devam etmektedirler.

Uzay, havacılık, otomotiv ve savunma sanayilerindeki mühendislik uygulamalarında, fiziksel ve mekanik özellikleri tasarım aşamasında önceden belirlenebilen, minimum bitirme işlemi gerektiren ve ekonomik olarak üretilen yapısal bileşenlerin kullanımı kritik bir öneme sahiptir (Rawal, 2001; Kar et al., 2024). MMK'lar arasında en dinamik gelişmeyi gösteren kompozit türü parçacık takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzemeler olmuştur. Alüminyum esaslı kompozit malzemelerin en önemli avantajları aşağıda verilmiştir.

- Düşük özgül ağırlık
- Döküm ve deformasyon işlemlerine uygunluk

- Nispeten düşük işlem maliyeti
- Yüksek korozyon direnci
- Nispeten kolay sağlanabilen ısı ve elektrik iletkenliği gibi fonksiyonel özellikler

Al-MMK’larda matris, özel seçilmiş bir Alüminyum alaşımıdır ve ısı işlem uygulamaları ile matris malzemesinde isteğe bağlı yapısal dönüşümler sağlanabilir. Uygulanabilir termomekanik işlem çeşitliliği ve seçilebilir uygun alaşım kompozisyonlarının çokluğu nedeniyle çok geniş bir oranda kontrol edilebilen özellikler sergiler (Davis, 1993; Polmear et al., 2017). Çoğu kez kendisini oluşturan matris fazından çok daha düşük süneklik ve tokluk değerlerine sahiptirler ancak, süneklik ve tokluk değerleri seramik malzeme ve seramik matrisli kompozit malzemelere nazaran çok daha yüksektir.

2.1 Parçacık Takviyeli Alüminyum Kompozitlerde Matris ve Takviye Malzemesi Seçimi

Kompozit yapılarda matris metali, birleştirici faz olarak görev yapmakta olup takviye elemanlarını bir arada tutmakta, takviye fazı ile elde edilen geliştirilmiş mekanik ve fiziksel özellikleri belirli yönlerde veya tüm hacme üniform biçimde iletmektedir. Matris malzemesinin seçimi yapılırken ilk olarak kullanılacak takviyenin sürekli mi yoksa süreksiz mi olacağı dikkate alınmaktadır. Sürekli elyaf takviye edilen kompozitlerde yükün büyük bir kısmı matristen elyafa aktarılmaktadır; bu nedenle elyafın dayanımı, kompozitin nihai dayanımını belirleyen temel faktör konumundadır (Hull & Clyne, 1996; Mallick, 2007).

Elyaf takviye malzemeleri yüksek dayanım ve elastisite modülüne sahip olmalarına karşın gevrek bir yapıya sahiptir. Bu nedenle matris malzemesi yalnızca elyafı bir arada tutmakla kalmamakta; aynı zamanda elyafı çevresel etkilerden korumakta, darbelere karşı tampon görevi görmekte ve çatlak ilerlemesini durdurmaktadır. Bu sebeple sürekli elyaf takviyeli kompozitlerde matris seçimi sırasında mukavemetten çok süneklik ve tokluk özellikleri ön plana çıkmaktadır (Chawla & Chawla, 2018).

Süreksiz takviyeli kompozitlerde ise durum tersine dönmektedir: bu sistemlerde matris malzemesinin dayanımı, kompozitin toplam dayanımını doğrudan belirlemektedir. Bu nedenle gerekli mekanik performansın sağlanabilmesi için matrisin mukavemet düzeyi ve ısı dayanımı kritik bir seçim parametresi hâline gelmektedir (Kar et al., 2024; Alam et al., 2023).

Matris seçimi yapılırken dikkat edilmesi gereken bir diğer önemli husus, matris–takviye ara yüzeyinde meydana gelebilecek kimyasal reaksiyonlardır. Bu reaksiyonlar ara yüzey dayanımını düşürerek kompozit performansını olumsuz

etkileyebilir; dolayısıyla matris–takviye kimyasal uyumluluğu seçim kriterlerinden biridir (Miracle, 2017).

Matris malzemeleri ergime sıcaklıklarına göre yüksek sıcaklık ve düşük sıcaklık kompozitleri olarak sınıflandırılır. Mo, Nb ve W gibi refrakter metaller yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren uygulamalarda tercih edilirken; Fe, Ni ve Cu gibi daha kolay ergiyen metaller nispeten daha düşük sıcaklık uygulamalarında kullanılmaktadır. Al ve Mg alaşımları ise düşük sıcaklık kompozitlerinin en yaygın matris malzemeleri olup özellikle havacılık, otomotiv ve savunma uygulamalarında geniş bir kullanım alanına sahiptir (Kaczmar et al., 2000; Torralba et al., 2003).

Al-MMK’larda kullanılan takviye malzemeleri, kompozitin mekanik, termal ve tribolojik özelliklerini doğrudan belirleyen temel bileşenlerdir. Takviyenin kimyasal bileşimi, geometrisi, boyutu ve matris ile oluşturduğu arayüzey bağının niteliği; kompozitin nihai performansını kontrol eden kritik parametrelerdir. Bu nedenle bir MMK tasarlanırken, hedeflenen uygulamanın gerektirdiği dayanım, modül, süneklik, ısıl kararlılık ve aşınma direnci gibi özellikler dikkate alınarak uygun takviye malzemesi belirlenmektedir.

Çizelge 2.1 Metal Matrisli Kompozitlerde Matris–Takviye Kombinasyonları (NADIBO, 1993; Alam et al., 2023; Kar et al., 2024; Chawla & Chawla, 2018)

MATRİS	TAKVİYE MALZEMESİ												
	Alümina	Alümina/Silika	Boron	Grafit	Molibden	Niobyum	SiC	SiC4	Çelik	Titanyum	TiB2	TiC	Tungsten
Alüminyum	.	.	.	.			.	.				.	.
Berilidler		.				.	.	.		.	.	.	.
Bakır				.			.				.	.	
Demir									.				
Demir Alüminat						.	.			.	.		.
Kurşun	.									.			
Magnezyum	.			.				.					
Nikel Alüminat		.				.	.	.		.	.	.	.
Süper Alaşımlar					.	.			.			.	
Titanyum				.			.			.	.	.	
Titanyum Alüminatlar		.				.	.	.		.	.	.	.

*Güncel çalışmalar doğrultusunda, Al–SiC, Al–Al₂O₃ ve Al–karbon esaslı nano/micro parçacık takviyeli sistemler öne çıkmaktadır (Kar et al., 2024; Alam et al., 2023).

Takviye malzemesi olarak seramiklerden karbon temelli malzemelere ve metalik takviyelere kadar farklı kimyasal bileşim ve yapılarda birçok seçenek kullanılabilir. Takviyeler, boy/çap (L/D) oranlarına göre üç ana sınıfa ayrılmaktadır: $L/D \approx 1$ olan parçacıklar, yaklaşık 50 civarında olan kısa elyaf veya whisker'lar ve $L/D > 100$ olan sürekli elyaf. SiC , Al_2O_3 , TiB_2 , B_4C gibi seramik esaslı parçacık takviyeler süreksiz takviye grubundandır. Parçacık takviyeler kompozite daha izotropik mekanik özellik kazandırır ve üretim maliyeti düşüktür. Sıvı metal işlemleri ile kolayca uygulanabilir. Kısa elyaf ve whiskerlar yüksek dayanım ve modül artışı sağlar ancak işlenebilirliği zorlaştırır ve üretim maliyetini artırır. Sürekli elyaf takviyeleri ise takviye yönünde oldukça yüksek dayanım sağlarken, dik doğrultudaki dayanım daha düşüktür. Yükün büyük kısmını taşıyan ana fazdır. En yüksek dayanım değerleri bu grupta elde edilir; fakat üretim prosesleri sınırlıdır ve ikincil şekillendirme çoğu zaman mümkün değildir. Buna karşılık, parçacık veya whisker takviyeli kompozitler daha izotropik mekanik özellikler sunarak yük taşımanın matris tarafından daha homojen biçimde gerçekleştirilmesini sağlar (Polmear et al., 2017).

Takviye olarak kullanılan malzemeler yüksek elastisite modülü ve dayanım gibi avantajlı özelliklerinin yanı sıra genellikle kırılgan ve düşük tokluğa sahiptir. Örneğin seramik takviyeler yüksek sıcaklık ve aşınma direnci sağlamalarına rağmen gevrek davranış gösterirler. Metal matris malzemesi ise bu olumsuzlukları kısmen sönümleyerek hem yük transferini düzenler hem de kombine edilen malzemelerden optimum mekanik özelliklerin elde edilmesine imkân tanır. Bu nedenle uygun matris-takviye eşleşmesi, hedeflenen kompozit performansının sağlanmasında kritik bir tasarım parametresidir. Takviyenin geometrisi, kompozitin ikincil şekil verme işlemlerine duyarlılığını doğrudan etkilediğinden, keskin kenarlı veya gerilme yığılmasına neden olabilecek şekillerden kaçınılmakta; bunun yerine daha yuvarlak hatlı ve şekil vermeye uygun morfolojiler tercih edilmektedir (Clyne & Hull, 2019).

Üretim yöntemine karar verilirken takviye boyutu ve geometrisi belirleyici rol oynar. Toz metalurjisi yöntemlerinde, homojen takviye dağılımı elde edebilmek için takviye parçacıklarının tane iriliği ile metal tozlarının boyut oranının optimum seviyede olması gerekmektedir. Literatürde, sıvı tabanlı üretim yöntemlerinde karıştırma verimliliğini artırmak için daha iri parçacıkların tercih edilebildiği belirtilirken, yerçekimi etkisiyle çökeltme riskini azaltmak amacıyla daha ince parçacıkların kullanılmasının avantaj sağladığı da vurgulanmaktadır (Hashim et al., 2001; Hanumanth & Irons, 1993). Ayrıca, takviyenin matris ile yeterli ıslanabilirlik ve bağlanabilirlik göstermesi, ancak aşırı ara yüzey reaksiyonlarına yol açmaması önemlidir.

Al matrisli kompozitlerde en yaygın kullanılan parçacık takviyeleri $SiCp$,

Al_2O_3 (Alümina), TiB_2 , Grafit ve karbon temelli takviyelerdir. SiC parçacıkları yüksek sertlik, termal kararlılık ve aşınma direnci sağlar. Ancak yüksek sıcaklıklarda Al_4C_3 oluşumu riski vardır. Alümina kimyasal olarak kararlı ve oksit yapısı nedeniyle matrisle reaktivitesi düşüktür. Aşınma direncini artırır. TiB_2 , arayüzey kararlılığı nedeniyle özellikle Al MMC literatüründe önemlidir. Yüksek sertlik ve yüksek elastiklik modülü sağlar. Karbon temelli takviyeler ise kuru kayma koşullarında tribolojik performansı geliştirir, ancak Al matrisle ıslatılabilirliği düşüktür.

Takviye malzemesi olarak kullanılan seramik parçacıkların üretimi sürekli veya kırılmış elyaflara kıyasla çok daha düşük maliyetlidir. Üretim hacmi büyüdükçe birim maliyet daha da düşmektedir. Parçacık takviyeler; döküm, sıkıştırma döküm, karıştırmalı döküm ve toz metalurjisi gibi pek çok yöntem ile başarıyla işlenebilmekte, ardından haddeleme, dövme ve ekstrüzyon gibi ikincil işlemlere de yüksek ölçüde uyum göstermektedir. Seramik parçacıklar, matris malzemenin yüksek sıcaklık rijitliğini artırarak takviye edilmemiş metallere kıyasla daha yüksek servis sıcaklıklarında kararlı davranış sağlar. Matris içerisine homojen dağıtılmış sert parçacıklar yük transferini artırarak kompozitin mukavemet ve elastik modülünü belirgin şekilde yükseltmektedir. Parçacık takviyesi, sıcaklık artışına bağlı geometrik stabiliteyi iyileştirerek ısıl genleşmeyi sınırlar ve daha kararlı bir kompozit yapı oluşmasını sağlar. Elyaf takviyeli kompozitlerde belirgin yön etkisi görülürken, parçacık takviyeli sistemlerde takviye daha izotropik olduğundan mekanik özellikler yönsel hassasiyet göstermez.

2.2 Matris Malzemesi Olarak Alüminyum

Alüminyum alaşımlarının özgül ağırlıkları saf alüminyuma oldukça yakın olup, diğer pek çok metal sistemine kıyasla çok daha iyi özgül dayanım değerleri sunmaktadır. Saf alüminyumun yoğunluğu yaklaşık 2.698 g/cm^3 (0.1 lb/in^3) olup ergime sıcaklığı $660 \text{ }^\circ\text{C}$ 'dir. Saf alüminyumun çekme dayanımı düşük olmasına rağmen, uygun ısıl işlem, soğuk şekillendirme veya alaşımlandırma yöntemleri uygulanarak mekanik dayanımında önemli artışlar elde edilebilmektedir. Bunun yanında talaşlı işlenebilme, haddelenebilme ve ekstrüzyonla şekillendirilebilme özellikleri (Callister & Rethwisch, 2021) ve yüksek korozyon direnci, iyi elektrik ve ısıl iletkenlik özellikleri sayesinde mühendislik uygulamalarında önemli avantajlar sağlamaktadır (Davis, 1993; Totten & MacKenzie, 2003).

Alüminyum alaşımları genel olarak biçimlenebilir (wrought) ve döküm (cast) alüminyum alaşımları olmak üzere iki ana sınıfa ayrılmaktadır. "Biçimlenebilir" terimi; alaşımların haddelenmiş sac, plaka, folyo, ekstrüzyon ürünü profiller, tüpler, dövme parçalar, tel veya çubuk gibi mekanik işleminden geçirilmiş yarı mamuller hâlinde piyasada bulunabilirliğini ifade etmektedir. Bu alaşımların büyük bir

bölümü toz veya tekrar ergitmeye uygun külçeler şeklinde de temin edilebildiğinden, toz metalürjisi ve döküm yöntemleri yoluyla parçacık takviyeli metal matrisli kompozit üretimine elverişlidir (Davis, 1993; Totten & MacKenzie, 2003).

Hem biçimlenebilir hem de döküm alüminyum alaşımları, ayrıca ısıt işlem uygulanabilir ve uygulanamaz olarak da sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma, alaşımın çökeltme sertleşmesi yoluyla mukavemet kazanıp kazanamayacağına ve mikro yapısal stabilitesine bağlıdır. Çizelge 2.2’de bu sınıflandırmaya ilişkin bilgi sunulmaktadır.

Çizelge 2.2 Biçimlenebilir ve dökme alüminyum alaşımlarının gösterilişleri.

ALAŞIMLARIN GÖSTERİLİŞLERİ		GÖSTERİLİŞLERİ
BİÇİMLENEBİLİR	DÖKÜM	İÇERDİĞİ ALAŞIM ELEMENTLERİ
1XXX ^(*)	1XX ^(*)	----
2XXX ^(**)	2XX ^(**)	Cu
3XXX ^(*)	-----	Mn
	3XX ^(****)	Si+Mg; Si+Cu; Si+Mg+Cu
4XXX ^(***)	4XX ^(*)	Si
5XXX ^(*)	5XX ^(*)	Mg
6XXX ^(**)	-----	Mg+Si
7XXX ^(**)	7XX ^(**)	Zn
8XXX ^(**)	-----	Diğer
	8XX ^(**)	Sn

(*) Yaşlandırma serleştirmesi uygulanamaz

(**) Yaşlandırma serleştirmesi uygulanabilir.

(***) Magnezyum varsa yaşlandırma serleştirmesi uygulanabilir.

(****) Bazılarına yaşlandırma serleştirmesi uygulanabilir.

Biçimlenebilir ve ısıt işlem uygulanabilir alüminyum alaşımlarının iç yapısı ve mekanik özellikleri, alaşım elementlerinin türüne, miktarına ve oluşturdukları mikro yapı bileşenlerine bağlı olarak değişmektedir. Sıcaklığın artmasına bağlı olarak alaşım elementlerinin katı hâl çözünürlüğü yükseldiğinde, bu alaşımlara uygulanacak uygun bir ısıt işlem ile önemli ölçüde mukavemet artışı elde edilebilmektedir. Bu nedenle 2XXX, 6XXX, 7XXX ve alaşım elementi olarak yüksek oranda lityum içeren 8XXX serisi alüminyum alaşımları, tipik olarak ısıt işlemle mekanik özellikleri geliştirilebilen alaşım gruplarıdır (Polmear et al., 2017; Totten & MacKenzie, 2003).

Isıt işlemle mukavemet artışı sağlanamayan alüminyum alaşımlarında ise

çökelme sertleşmesi etkili olmadığından, fark edilir bir dayanım artışı elde edilemez. Bu alaşım gruplarında dayanım artışı, içerdikleri alaşım elementlerinin çözünemez fazları ve malzemeye uygulanan soğuk şekil verme (pekleştirme) işlemleri aracılığıyla sağlanmaktadır. Biçimlenebilir alüminyum alaşımlarından 1XXX, 3XXX, 4XXX ve 5XXX serileri, çökelme sertleşmesine uygun olmayan ve bu nedenle ısıtılma işlemle güçlendirilemeyen alaşımlar sınıfında yer almaktadır (Davis, 1993; Mondolfo, 1976).

Al-Si alaşımları (3XX ve 4XX serileri), üstün akıcılık özellikleri sayesinde döküm alüminyum alaşımları arasında en çok tercih edilen alaşımlar arasında yer almaktadır. Silisyumun ana alaşım elementi olarak bulunduğu bu sistemler; yüksek akıcılık, döküm sırasında düşük büzülme, iyi korozyon direnci, kaynak kabiliyeti ve düşük ısıtılma genleşme katsayısı gibi önemli avantajlar sunmaktadır. Bu özellikleri sayesinde ince kesitli ve karmaşık geometrilikli parçaların dökümle üretiminde oldukça başarılı sonuçlar vermektedirler. Akıcılık, metal matrisli kompozitlerin döküm yöntemleriyle üretiminde matris bileşiminin seçiminde belirleyici bir faktördür (Davis, 1993; Kaufman & Rooy, 2004).

Al-Mg alaşımları ise çok iyi korozyon direnci göstermelerine rağmen gerilmeli korozyon çatlağına ve doğal yaşlanma sertleşmesine duyarlıdır. Magnezyumun sıvı fazda oksidasyona yatkın olması nedeniyle döküm işlemi sırasında özel koruyucu atmosfer veya örtüleyici akı maddeleri kullanılmasını gerektirir. Buna ek olarak, Al-Si alaşımlarına kıyasla daha düşük akıcılığa sahip olmaları, Al-Mg alaşımlarının döküm özelliklerini sınırlayan bir diğer etkindir (Polmear et al., 2017; Totten & MacKenzie, 2003).

Alüminyum alaşımlarında korozyon davranışı, alaşım bileşiminin türü ve miktarına bağlı olarak önemli farklılıklar gösterebilmektedir. Özellikle Al-Mg ve Al-Mn esaslı alaşımların yer aldığı 5XXX ve 3XXX serileri, endüstriyel uygulamalarda geniş kullanım alanına sahiptir. Bu bağlamda Afset ve arkadaşları (2001), AA5754 ve AA3005 alaşımlarının filiform korozyon davranışlarını karşılaştırmalı olarak incelemiş ve AA5754 alaşımının, daha düşük bileşim karmaşıklığına sahip olması ve Mg katkısının sağladığı doğal koruyucu etki nedeniyle daha yüksek korozyon direnci gösterdiğini ortaya koymuştur. Çalışmada ayrıca, uygun ısıtılma işlemlerin AA5754 alaşımının korozyon performansını daha da iyileştirebildiği vurgulanmıştır. Bu bulgular, alaşım seçimi yapılırken Mg içeriğinin ve ısıtılma işlem stratejilerinin korozyon dayanımı açısından kritik parametreler olduğunu göstermektedir.

Alüminyum alaşımlarına uygulanabilen ısıtılma işlem ve temper sınıflandırması, 1948 yılında American Aluminium Association (AAA) tarafından standartlaştırılmıştır. Bu sistemde temper durumu, alaşım numarasından sonra tire işareti ile ayrılarak belirtilir ve ilk olarak malzemenin temel metalurjik

durumunu ifade eden bir harf ile gösterilir. Yumuşatma tavrı (O) ve üretim sonrası doğal temper durumu (F) gibi temel sınıflandırmalar harf ile ifade edilirken, diğer temper durumları bir veya birden fazla rakamın eklenmesiyle daha ayrıntılı alt kategorilere ayrılmaktadır. Böylece alaşımın mukavemet seviyesi, şekillendirilme durumu ve uygulanan ısıl işlem basamakları standartlaştırılmış bir yapı içerisinde tanımlanabilmektedir. Temper sınıflandırmasının ayrıntılı açıklaması Çizelge 2.3'te sunulmuştur

Çizelge 2.3 Temper kodları ve açıklamaları

F	Üretildiği şekilde
O	Yumuşak tavllanmış
H	Soğuk biçimlendirme ile sertleştirilmiş
H1	Soğuk biçimlendirme ile sertleştirilmiş
H2	Soğuk biçimlendirme ile sertleştirilmiş ve kısmi tavllanmış
H3	Soğuk biçimlendirme ile sertleştirilmiş ve stabilize olmuş
T1	Yüksek sıcaklıkta deformasyon işleminden sonra tabii yaşlandırılmış
T2	Yalnız döküm ürünleri için tavllanmış
T3	Katı çözeltili ısıl işleminden sonra soğuk biçimlendirilmiş
T4	Katı çözeltili ısıl işleminden sonra doğal yaşlandırılmış
T5	Tabii yaşlandırılmış
T6	Katı çözeltili ısıl işleminden sonra doğal yaşlandırılmış
T10	Yüksek sıcaklıkta deformasyon işleminden sonra soğutulmuş, soğuk biçimlendirilmiş suni yaşlandırılmış

Alüminyumun ergime sıcaklığının diğer potansiyel metal matris malzemelerine kıyasla nispeten düşük olması, bu malzemenin hem toz metalurjisi hem de döküm tabanlı üretim yöntemleri kullanılarak metal matrisli kompozit üretiminde geniş bir kullanım alanı bulmasını sağlamaktadır. Bu nedenle alüminyum, maliyet-etkinlik, işlem kolaylığı ve takviye uyumluluğu açısından MMK sistemleri için en yaygın matris malzemelerinden biri hâline gelmiştir (Clyne & Hull, 2019).

Ancak yüksek saflıktaki alüminyum, düşük döküm akıcılığı ve katılaşma sırasında sıcak yırtılma eğilimi nedeniyle döküm yoluyla sağlam parçaların üretiminde sınırlamalar ortaya çıkarabilmektedir. Bu nedenle alüminyum, döküm davranışını iyileştirmek, mukavemetini artırmak ve farklı uygulamalara uygun hâle getirmek amacıyla çeşitli alaşım elementleri ile alaşımlandırılmaktadır (Mondolfo, 1976; Polmear et al., 2017).

Alaşımlandırma işlemi, alüminyumun yüksek süneklik ve korozyon direnci gibi temel avantajlarını koruyarak, düşük akma dayanımını artırmak amacıyla uygulanmaktadır. Alüminyuma mukavemet kazandıran başlıca alaşım elementleri Mg, Si, Mn, Cu ve Zn olup, bu elementler kübik yüzey merkezli (FCC) alüminyum kristal kafesinde düşük oranlarda çözünebilmekte ve böylece katı çözeltilerin oluşmasını sağlamaktadır. Kristal kafes içerisine yerleşen yabancı atomlar, kafes bozulmalarına sebep olarak kayma düzlemleri boyunca hareketi zorlaştırmakta; bu etkileşim dislokasyon hareketini engelleyerek malzemenin akma dayanımını önemli ölçüde artırmaktadır (Polmear et al., 2017; Totten & MacKenzie, 2003).

Alaşımlama elementlerinin miktarının artması durumunda ise, alüminyum matrisi içerisinde çözünmeyen ve metalürjik olarak kararlı, sert ve gevrek intermetalik fazlar oluşmaktadır. Bu intermetalik bileşikler alaşımın mukavemetini daha da yükseltirken, aynı zamanda deformasyon kabiliyetini azaltarak malzemeyi daha kırılgan hâle getirmektedir. Bu nedenle alaşım bileşimi, hedeflenen mukavemet-süneklik dengesini sağlayacak şekilde dikkatle optimize edilmelidir (Davis, 1993; Mondolfo, 1976).

Alüminyum pek çok elementle alaşımlandırılabilir; ancak bu elementlerden yalnızca Cu, Zn, Mg ve Si yüksek katı çözünürlüğe sahip olup çökeltme sertleşmesi mekanizmasında kritik rol oynamaktadır. Bu elementlerin uygun oranlarda matrise çözünmesi, ısıtma işlem sonrasında ince ve dağılmış çökeltilerin oluşmasını sağlayarak mukavemetin önemli ölçüde artmasına katkıda bulunmaktadır (Polmear et al., 2017).

Buna karşılık, katı çözeltiler içerisindeki çözünürlüğü %1'in altında olan Fe, Zr, Mn ve Cr gibi geçiş elementleri, çökeltme sertleşmesinden ziyade toparlanma ve yeniden kristalleşmeyi kontrol ederek tane yapısının iyileştirilmesinde etkili olmaktadır. Bu elementler, matris içerisinde kararlı intermetalik bileşikler oluşturarak tane sınırlarını stabilize eder ve sıcak şekillendirme sonrası tane irileşmesini sınırlar (Beljajev, 1974; Webster, 1980).

Alüminyum alaşımları sıvı hâlde hidrojen absorpsiyonuna oldukça duyarlı olup, katı hâlde hidrojen çözünürlüğü son derece düşüktür. Hidrojen, alüminyumda fark edilir derecede çözünebilen tek gazdır ve çözünürlüğü sıcaklık arttıkça üssel olarak yükselir. Bu nedenle ergitme işlemleri sırasında hidrojen alımını en aza indirmek için aşırı ısıtmadan kaçınılması büyük önem taşımaktadır (Totten & MacKenzie, 2003).

Farklı alüminyum alaşımları hidrojen gazına karşı değişen duyarlılıklar göstermekte olup, ergitme sırasında gerekli önlemler alınmadığında gaz porozitesinin oluşmasına neden olabilmektedir. Alüminyum alaşımlarında alaşım elementi olarak kullanılan Si ve Cu miktarının artması hidrojen çözünürlüğünü azaltırken, Mg ilavesi hidrojen çözünürlüğünü artırmaktadır (Khorasani, 1995).

Hidrojenin çözünebilirliği, alüminyum alaşımlarının katılaşma sıcaklığına ulaşıldığında hızla düşmekte ve hidrojen bu süreçte sıvı fazdan ayrılarak katılaşma sırasında gözenek oluşumuna neden olmaktadır. Bu mekanizma, özellikle döküm alaşımlarında porozitenin temel kaynağı olarak kabul edilmektedir (Shivkumar, 1991).

1.3. Takviye- Matris Arayüzeyleri

Arayüzey, matris ve takviye fazları arasında yer alan ve çeşitli malzeme özelliklerinde süreksizliklerin ortaya çıktığı iki boyutlu sınır bölgesi olarak tanımlanır. Bu bölgede elastik modül, kimyasal potansiyel, ısı genleşme katsayısı gibi temel malzeme parametrelerinde ani değişimler meydana gelir. Kimyasal potansiyeldeki süreksizlik, arayüzeyde difüzyonla karışmış bir geçiş bölgesinin oluşmasına veya yeni intermetalik bileşiklerin meydana gelmesine neden olabilir. Benzer şekilde, matris ve takviye arasındaki ısı genleşme katsayısı farkı, sıcaklık değişimlerinde çok eksenli artık gerilmelerin oluşmasına yol açar.

Takviye parçacığı boyutunun küçülmesi ve takviye hacim oranının artması, arayüzey alanını önemli ölçüde artırarak kompozitin genel davranışını daha kritik hâle getirir. Ayrıca matris-takviye sistemi çoğu zaman termodinamik olarak tam dengede olmayan bir yapı oluşturduğundan, arayüzeydeki reaksiyonlar kontrol edilmediği takdirde kompozitin mekanik, elektriksel ve termal özellikleri olumsuz etkilenebilir. Bu nedenle arayüzey mühendisliği, metal matrisli kompozitlerde hedeflenen özelliklerin elde edilmesinde temel belirleyici unsurlardan biridir (Vaucher & Beffort, 2000).

Arayüzey davranışının kontrol edilebilmesi için, seçilen kompozit sisteminde hangi bağlanma türlerinin oluştuğunun anlaşılması büyük önem taşımaktadır. Metal matrisli kompozitlerde arayüzeyde gelişebilecek bağ türleri genel olarak iki ana grupta incelenir:

a) Mekanik bağ

b) Kimyasal bağ

Mekanik bağlanma, iki yüzey arasında pürüzlülük, girinti-çıkıntı veya fiziksel kilitlenme yoluyla oluşan bağ türüdür. Bu tür bağlanma çoğunlukla takviye yüzeyinin kimyasal veya fiziksel işlemlerle pürüzlendirilmesiyle sağlanır. Pürüzlendirilmiş yüzey, matrisin daha kolay çekirdeklenmesine yol açarak takviyenin matris tarafından etkin biçimde sarılmasını sağlar. Mekanik bağlanma, özellikle basma yükleri altında kompozit malzemenin performansını belirgin şekilde artırır.

Bununla birlikte, kompozitlerde optimum mekanik özelliklerin elde

edilebilmesi için mekanik bağlanmanın kontrollü kimyasal bağlanma ile desteklenmesi gerektiği literatürde vurgulanmaktadır. Kimyasal bağlanma; arayüzeyde sınırlı, kontrollü ve istenen nitelikte bir reaksiyonun gerçekleşmesi sonucu oluşur ve kayma ile çekme gerilmelerine karşı daha dayanıklı bir arayüzey sağlar. Dolayısıyla mekanik bağlanmanın tek başına yeterli olmadığı durumlarda, uygun kimyasal etkileşimlerin de devreye girmesi kompozitin dayanımını önemli ölçüde artırmaktadır (Vaucher & Beffort, 2000).

Mekanik bağlanma yaklaşımı, özellikle matris-takviye arayüzeyinde kontrolsüz reaksiyonların istenmediği veya kimyasal bağlanmanın sınırlı olduğu sistemlerde tercih edilen bir stratejidir.

Metal matrisli kompozitler çoğu zaman termodinamik açıdan dengede olmayan sistemlerdir. Matris ve takviye fazları arasındaki kimyasal potansiyel farkı, arayüzey boyunca bir potansiyel gradyanının oluşmasına neden olur. Bu gradyan nedeniyle uygun sıcaklık ve yeterli süre sağlandığında, arayüzeyde difüzyon kontrollü süreçler veya kimyasal reaksiyonlar meydana gelir (Çizelge 2.4). Bu tür etkileşimlerle oluşan arayüzey ürünleri “reaksiyon bağı” olarak adlandırılır ve genellikle matris ve takviye fazlarından farklı faz yapıları ve farklı mekanik/termal özellikler taşırlar (Metcalf, 1974).

Arayüzeyde güçlü bir bağ elde edilebilmesi için bu reaksiyonların kontrollü biçimde ilerlemesi gerekmektedir. Reaksiyonun istenenden daha ileri gitmesi, arayüzey tabakasının kalınlaşmasına ve kırılğan intermetalik fazların oluşmasına yol açarak kompozitin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilir. Özellikle seramik-metal arayüzeylerinde reaksiyonlar yüksek sıcaklıklarda daha hızlı gerçekleşir; çünkü difüzyon ve kimyasal reaksiyon kinetiği sıcaklıkla birlikte üstel olarak artar. Bu nedenle arayüzey reaksiyonlarının istenilen düzeyde tutulabilmesi ve hedeflenen kompozit performansının sağlanabilmesi için reaksiyon termodinamiğinin ve kinetiğinin iyi anlaşılması ve arayüzeyde istenmeyen reaksiyon ürünlerinin oluşmaması için katılma süresinin olabildiğince kısa tutulması gerekmektedir

Katılma ve soğuma aşamalarında matris ve takviye malzemeleri arasındaki ısı kapasite ve ısı iletkenlik farkları, sıcaklık dağılımını heterojen hâle getirerek arayüzeydeki reaksiyon kinetiğinin yerel olarak değişmesine neden olmaktadır. Bu durum, arayüzeyde faz oluşumunun kontrol edilmesini güçleştirmektedir.

Özellikle Al/SiC kompozitleri için, 600 °C'nin altında arayüzeyin kimyasal olarak kararlı kaldığı; buna karşılık 660 °C'nin üzerinde reaktif davranışın başladığı ve istenmeyen ara fazların oluştuğu bilinmektedir. Arayüzey kararlılığını artırmak amacıyla matris bileşimindeki Si miktarının yükseltilmesi veya SiC parçacıklarının kontrollü oksidasyonla modifiye edilmesi, Al₄C₃

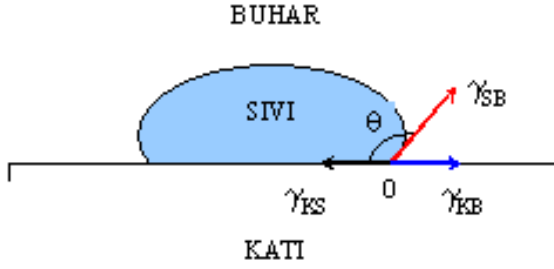
oluşumunu engelleyerek daha sağlam bir arayüzey bağı geliştirilmesini sağlamaktadır.

Al matrisi ile oksit dışı takviyeler arasındaki “çözünme ve ıslatma bağı”, matrisin takviyeyi ıslatıp çevrelemesine karşın kimyasal bileşik oluşmadığı durumlarda ortaya çıkan, atomik ölekte elektron etkileşimlerine dayalı bir bağlanma türüdür. Ancak bu bağlanma mekanizmasının etkin olabilmesi için atomların birbirine birkaç atom çapı kadar yaklaşması gerekmektedir. Bu nedenle arayüzey mühendisliği, kompozit performansının kontrolünde kritik bir parametredir.

Çizelge 2.4 Farklı matris ve takviye sistemlerinde oluşan arayüzey reaksiyonları (Vaucher, S ve Befford, O.)

		Al	Mg + Al	Mg	Cu	Ti
C		$4Al + 3C \rightarrow Al_4C_3$	$2Al + Mg + 2C \rightarrow Al_2MgC_2$ (<2% Al) $4Al + 3C \rightarrow Al_4C_3$ (>2% Al)	Reaksiyon yok	Reaksiyon yok	$Ti + C \rightarrow TiC$
Si		AlSi Alaşım	$Si + 2Mg \rightarrow Mg_2Si$	$Si + 2Mg \rightarrow Mg_2Si$	—	—
	B ₄ C	$6B_4C + 27Al \rightarrow 6Al_4BC + 9AlB_2$ Mühtemel reaksiyonlar AlB ₁₀ , Al ₁₃ B ₈ C ₂ , AlB ₂ C ₄	$6B_4C + 27Al \rightarrow 6Al_4BC + 9AlB_2$ Mühtemel reaksiyonlar AlB ₁₀ , Al ₁₃ B ₈ C ₂ , AlB ₂ C ₄	—	—	—
	SiC	$4Al + 3SiC \rightarrow Al_4C_3 + 3Si$	$4Al + 3SiC \rightarrow Al_4C_3 + 3Si$	—	Reaksiyon yok	$SiC + Ti \rightarrow TiC + Si$
	TiC	$4Al + 3TiC \rightarrow Al_4C_3 + 3Ti$ $13Al + 3TiC \rightarrow Al_4C_3 + 3Al_2Ti$	—	—	—	—
	Al ₂ O ₃	Reaksiyon yok	$3Mg + 4Al_2O_3 \rightarrow 3MgAl_2O_4 + 2Al$ $3Mg + Al_2O_3 \rightarrow 3MgO + 2Al$	$3Mg + 4Al_2O_3 \rightarrow 3MgAl_2O_4 + 2Al$	—	—
	SiO ₂	Reaksiyon yok	$Mg + 2SiO_2 + 2Al \rightarrow MgAl_2O_4 + 2Si$ $2MgAl_2O_4 + 3Si \rightarrow 2MgO + 3SiO_2 + 4Al$	$2Mg + SiO_2 \rightarrow 2MgO + 2Si$	—	—

Islatılabilirlik, bir sıvının katı yüzey üzerinde yayılabilme kabiliyeti olarak tanımlanır ve bu özellik genellikle sıvı damlasının katı yüzey ile yaptığı temas açısı (θ) üzerinden değerlendirilir. Şekil 2.5 'te gösterildiği gibi, temas açısı küçüldükçe sıvının yüzeyi ıslatma eğilimi artar.



Şekil 2.5 Islatma açısı

Denge durumundaki temas açısı, Young–Dupré eşitliği ile ifade edilir:

$$\gamma_{KB} = \gamma_{KS} + \gamma_{SB} \cos \theta \quad (2.1)$$

Burada

γ_{KB}	:	katı–buhar	ara	yüzey	enerjisi
γ_{KS}	:	katı–sıvı	ara	yüzey	enerjisi
γ_{SB} : sıvı–buhar ara yüzey enerjisini temsil etmektedir.					

Sıvı ile katı yüzey temas ettiğinde yüzey enerjisinin azalması, sıvının katı yüzey üzerine yayılmasına neden olur ve bu durum “adhezyon enerjisi” olarak ifade edilir:

$$W_a = \gamma_{SB} + \gamma_{KB} - \gamma_{KS} \quad (2.2)$$

(2.1) ve (2.2) eşitliklerinin birleştirilmesi sonucu adhezyon enerjisi ile temas açısı arasındaki ilişki aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$W_a = \gamma_{SB}(1 + \cos \theta) \quad (2.3)$$

Bu eşitlik, katı–sıvı bağ kuvvetinin temas açısı ile doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir.

Buna göre:

$\theta = 0 \rightarrow$ mükemmel ıslatma

$0 < \theta < 180^\circ \rightarrow$ kısmi ıslatma

$\theta = 180^\circ \rightarrow$ hiç ıslatma yoktur.

Temas açısının küçük olması ıslatılabilirliğin iyi olduğunun bir göstergesidir.

Alüminyum, yüksek oksitlenme eğilimi nedeniyle sıvı fazda çok hızlı şekilde yüzeyinde oksit tabakası oluşturur (örneğin 400 °C’de dört saat içinde yaklaşık 50 nm). Bu oksit tabakası, özellikle takviyenin eriyik matris içerisine üstten ilave edildiği durumlarda, takviye–matris temasını engelleyerek ıslatmayı zorlaştırır. Bu nedenle, metal matrisli kompozit üretiminde ıslatılabilirliği artırmak amacıyla çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Matris alaşımına uygun elementlerin ilavesi,

seramik takviyelerin kaplanması, takviyelere ısıtma işlem uygulanması veya mekanik hareket/mixing ile sıvı metale ilave edilmesi bu yöntemlerin başlıcalarıdır.

Sıvı metalürjisi temelli üretim yöntemlerinde, matris-takviye arayüzeyinin ıslatılabilirliğini artırmak için ergiyik metale belirli alaşım elementlerinin ilave edilmesi yaygın bir yaklaşımdır. Magnezyum, kalsiyum, titanyum ve zirkonyum gibi elementlerin ilavesi, sıvı metalin yüzey gerilimini ve katı-sıvı arayüzey enerjisini düşürerek takviyenin daha etkin bir şekilde ıslatılmasını sağlar. Böylece matris ile takviye arasında güçlü ve kararlı bir bağ oluşturulabilir.

Alüminyum esaslı matris malzemeleri için yapılan çalışmalarda, seryum, lantanyum, zirkonyum, titanyum, bizmut, kurşun, çinko ve bakır gibi birçok ilave element denenmiş, ancak ıslatılabilirliği en etkin biçimde artıran elementin magnezyum olduğu belirlenmiştir. Bu etkinin temel nedeni, magnezyumun yüzey gerilimi değerinin (0.599 N/m), alüminyumun yüzey gerilimi değerine (0.760 N/m) kıyasla daha düşük olmasıdır. Nitekim 720 °C’de ergiyiğe %3 magnezyum ilave edilmesi, alüminyumun yüzey gerilimini 0.760 N/m’den 0.620 N/m’ye düşürerek ıslatma performansını belirgin biçimde artırmaktadır (Hashim et al., 2001).

Islatılabilirliği artırmanın bir diğer yöntemi, takviye malzemesine uygun bir ısıtma işlem uygulanmasıdır. Takviyeye ısıtma işlem uygulanması, parçacık yüzeyinde adsorbe olmuş gazların uzaklaştırılmasını sağlayarak bu gazların ergiyik metal içerisine geçişini engeller. Ayrıca kontrollü oksidasyon yoluyla takviye yüzeyinde ince bir oksit tabakası oluşturularak daha temiz, kararlı ve ıslatılabilirliği yüksek bir yüzey elde edilebilir. Bu şekilde hazırlanan yüzey, ergiyik metalin takviyeyle daha homojen ve güçlü temas kurmasına olanak tanır. Takviye yüzeyinin temizlenmesi ve modifiye edilmesi amacıyla ultrasonik temizleme, kimyasal dağlama ve inert atmosfer altında ısıtma gibi yöntemlerden yararlanılabilir. Ancak her takviye türü ısıtma işlemine uygun değildir; örneğin grafit parçacıklar ısıtma işlemle ıslatılabilirlik açısından iyileştirilemez.

Metal olmayan takviyelerin sıvı metal tarafından ıslatılması genellikle güç olduğundan, takviyelerin metalik bir tabaka ile kaplanması yaygın olarak tercih edilen bir yöntemdir. CVD (Chemical Vapour Deposition), PVD (Physical Vapour Deposition), elektrokaplama, sementasyon, plazma sprey kaplama ve sol-jel yöntemleri bu amaçla kullanılan başlıca kaplama teknikleridir. Nikel ve bakır, pek çok metal matris tarafından iyi ıslatıldığından kaplama malzemesi olarak sıklıkla tercih edilir; ayrıca gümüş ve krom kaplamalara da literatürde rastlanmaktadır. Alüminyum matrisli kompozitlerde özellikle nikel kaplama, arayüzey bağının güçlendirilmesi açısından yaygın bir uygulamadır. Bunun yanında, takviyelerin mekanik kuvvet uygulanarak karıştırılması özellikle yarı

katı işleme yöntemlerinde ısılatılabilirliği artırmanın etkili yollarından biri olarak önerilmektedir (Hashim et al., 2001).

1.4. Parçacık Takviyeli Alüminyum Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

Parçacık takviyeli alüminyum alaşımları MMK sınıfının en çok araştırılan ve geliştirilen grubudur. Bu tür kompozitlere sürekli faz takviyeli kompozitlerden farklı olarak, metallere uygulanan deformasyon işlemlerinin çoğu adapte edilebilmektedir. Sürekli elyaf takviyeli kompozitlerde parçanın son boyutlarına çok yakın veya tam istenen boyutlarda şekillendirecek üretim yöntemleri seçilmesi zorunlu iken, süreksiz faz takviyeli kompozit malzemelere ekstrüzyon, haddeleme, dövme ve hatta süper plastik şekillendirme ile üretim sonrası farklı biçimlendirme işlemleri uygulanabilmektedir.

Geleneksel şekil verme yöntemleri ile sınırlı olarak şekillendirilebilen MMK'larda, üretim sürecinde kazandırılan yüksek mekanik ve termal özelliklerin şekillendirme işlemleri sırasında korunabilmesi açısından Parçacık takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin, üretim kolaylıkları, şekillendirme süreçleriyle uyumlulukları ve performans iyileştirme potansiyelleri büyük önem taşımaktadır. (Chawla & Chawla, 2018; Torralba et al., 2003; Alam et al., 2023).

MMK üretiminde alışlagelmiş üretim yöntemlerinin uygulanmasında karşılaşılan zorluklar, bu yöntemlerin ya modifiye edilmesini ya da üretilecek kompozit malzeme türü için yeni üretim metotlarının geliştirilmesini gerektirmiştir. MMK üretiminde yöntem seçimi yapılırken istenen mekanik ve fiziksel özellikler belirlenmekte ve öncelikle aşağıda verilen parametreler dikkate alınarak yöntem tayin edilmektedir (Kaczmar vd., 2000).

- Çalışma sıcaklığı aralıkları (yüksek sıcaklıklar, düşük sıcaklıklar)
- Takviye malzemesi formu (sürekli form, süreksiz form)
- Matris malzemesi ile takviye malzemesinin uyumu
- Malzemelerinin ek işlem gereksinimi (Takviye ön işlemleri, alaşımlandırma, vb.)
- Matris malzemesi ile takviye malzemesi arasında oluşabilecek reaksiyonlar
- Elde edilecek üründen istenen boyut tamlığı
- Maliyet

Ayrıca, takviye dayanımının korunması, oluşabilecek takviye hasarının en aza indirgenmesi, takviye ve matris ara yüzey bağının tam olarak sağlanması ve

takviyenin matris içindeki dağılımının homojen olması da üretim yönteminin seçiminde belirleyici rol oynamaktadır.

Bu bölümde, döküm, toz metalurjisi ve yarı-katı (semi-solid) yöntemler gibi farklı üretim teknikleri ile elde edilebilen PT-Al-MMK ların sıvı tabanlı üretim yöntemleri ile yarı-katı proseslerin bilimsel temelleri, avantajları ve sınırlılıkları sistematik olarak ele alınmaktadır.

2. Sıvı Tabanlı ve Yarı-Katı Prosesler

Kompozit malzeme üretim işlemlerinin matris malzemesi sıvı halde iken yapıldığı bu tür üretim yöntemlerinde, özellikle de alüminyum alaşımlarının seramik malzemeler ile takviye edildiği uygulamalarda, katı seramik fazı ile sıvı alüminyum fazının iyi bir bağ oluşturması sıvı fazın katı fazı ıslatabilme kabiliyetine bağlıdır. Matris ve takviye arasında kuvvetli ara yüzey bağı, kuvvetlerin matris malzemesinden takviye malzemesine iyi bir şekilde aktarılmasını ve dolayısıyla malzemenin elastiklik modülünün ve mukavemetin artmasını sağlar. Sıvı metalin düşük viskozitesi, parçacıkların matris içine mekanik olarak karıştırılabilmesini ve hızlı üretimi mümkün kılar. Ancak ıslatılabilirlik, çökeltme ve arayüzey reaksiyonları gibi problemler bu yöntemin temel sınırlamalarıdır.

Üretim metotları arasında yaygın olarak kullanılan bir teknikte . sıvı metal emdirme tekniğidir.

Bu işlemde esas prensip, bir kap veya tüp içerisine yerleştirilmiş takviyeler veya gözenekli preform arasına sıvı halindeki metal matrisin emdirilmesidir.

İlk işlem olarak takviyenin ön şekillendirmesi yapılmakta, takviyenin yönlendirilmesi ve hacımsal oranı bu aşamada ayarlanmaktadır. Gözenekli veya boşluklu yapıda hazırlanmış şekillendirilmiş takviyeler kalıba bir bağlayıcı ile tutturulduktan sonra kalıp içerisine ergimiş metal emdirilmekte ve katılaşmaya bırakılmaktadır. Ergimiş metalin emdirilmesi takviye hacim oranının yüksek olduğu durumlarda biraz daha zordur. Takviyeler arası mesafenin az olduğu bu gibi durumlarda ergimiş metal ya basınç altında veya vakumla emdirilmektedir. Böylece açığa çıkacak atıl gazlar da yapı içerisinde sıkışıp kalmayıp dışarı atılmaktadır.

Ergimiş metal emdirilmesi işlemi, atmosfer basıncında, yüksek basınç altında, koruyucu gaz atmosferi altında yada vakum şartlarında yapılabilir. İşlemlerin vakum altında yapılması elyafların yüzey aktivitesini arttırdığından dolayı ergimiş metalin ıslatma kabiliyeti artmakta ve kompozitin kalitesini olumlu yönde arttırmaktadır.

Long ve çalışma arkadaşları (1998), elyaf preform kullanılan sıkıştırma döküm

prosesinde infiltrasyon hızının kompozit malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bu amaçla, farklı infiltrasyon hızlarında üretilen kompozit numunelere T4 ve T6 ısıtma işlem koşulları uygulanmış ve elde edilen numuneler çekme testine tabi tutulmuştur. Çalışma sonucunda, infiltrasyon hızının artmasıyla kompozitlerin çekme dayanımında belirgin bir iyileşme meydana geldiği bildirilmiştir. Sıkıştırma hızının 1.5 mm/sn'den 10 mm/sn'ye yükseltilmesi, çekme dayanımını 378 MPa'dan 436 MPa'a, bir başka deyişle önemli ölçüde artırmıştır. Benzer şekilde, numunelerin gerinim değerlerinde de artış gözlenmiştir; %1.2 olan uzama değeri %2 seviyesine ulaşmıştır. Araştırmacılar ayrıca, proses sırasında yapı içinde hapsolan havanın matris-takviye ara yüzeyinde zayıf bağlanmaya yol açtığını, bunun da malzeme dayanımını olumsuz etkilediğini vurgulamıştır. Bu bulgu, sıkıştırma dökümünde hava boşluklarının en aza indirilmesinin yüksek performanslı kompozit üretimi için kritik olduğunu göstermektedir.

Long ve arkadaşlarının bir diğer çalışmasında (1999), basınçlı infiltrasyon yöntemi kullanılarak yüksek takviye oranlarına sahip (%45–80) SiCp/AlCu4MgAg kompozitleri üretilmiş ve parçacık boyutu ile parçacık şeklinin mikro yapı ve mekanik davranış üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Yapılan incelemelerde, bu üretim yöntemi ile elde edilen kompozitlerde belirgin segregasyon oluşumu veya istenmeyen ara yüzey reaksiyonlarının meydana gelmediği belirlenmiştir. Ayrıca, daha ince SiC parçacıkları ile üretilen kompozitlerin daha üstün mekanik özellikler sergilediği gösterilmiştir. Bu sonuç, takviye parçacığı boyutunun hem yük transfer mekanizması hem de ara yüzey bağ kalitesi üzerinde doğrudan etkili olduğunu ortaya göstermektedir.

Grafit, silisyum karbür, alümina ve paslanmaz çelik elyaf gibi takviye malzemeleri ergimiş metal tarafından yeterince ıslatılamamaktadır. Bu sebeple sıvı metal emdirme yöntemlerinin kullanılamadığı bu tür takviye türlerinde sıkıştırma döküm tekniği kullanılmaktadır. Sıkıştırma döküm yönteminde bir metal kalıp içersine yerleştirilmiş bulunan preform veya takviye malzemesi üzerine basınç uygulanarak sıvı metal basılmakta ve sıvı metal takviye ile birlikte yüksek basınç altında hızla katılaştırılmaktadır.

Basınç altında katılaştırma ile takviye malzemesi ile matris metali arasındaki ara yüzey bağ mukavemetinin oldukça olumlu yönde etkilenmektedir. Sıkıştırma döküm yöntemi ile geleneksel döküm yöntemlerine nazaran daha yüksek basınç gereksinim duyulmaktadır. Takviye malzemesi ile matris arasındaki sürtünme kuvvetlerini ve kapiler etkileri yenmek için 50-150 MPa basınç uygulanmakta ve katılma süresince etkiyen basınç sayesinde daha ince taneli, porozitesiz ve boyut tamlığı sağlanmış ürünler elde edilmektedir. Yüksek basınç uygulaması nedeniyle parça boyutunun sınırlandırılması ve takviye malzemesinin hasara

uğraması bu yöntemin başlıca problemleridir., Al_2O_3/Al , C/Mg , SiC_w/Al ve Si_3N_{4w}/Al kompozitleri bu yöntemle başarılı bir şekilde üretilmektedir.

Lim ve Clegg, (1997) hassas döküm ve sıkıştırma infiltrasyon döküm proseslerini birleştirerek kompozit malzeme üretiminde birleşik döküm yöntemi denedikleri çalışmada, döküm öncesinde, preform, seramik kabuk ve kalıp ön sıcaklıklarının döküm kalitesine etkilerini araştırmışlar ve preform sıcaklığı arttıkça çekme dayanımının arttığı, kabuk sıcaklığı arttıkça çekme dayanımının azaldığı ve kalıp sıcaklığının da yaklaşık 300 °C'den sonra çekme dayanımını düşürücü etki yaptığını, birleşik döküm yönteminde elde edilen kompozit malzeme çekme dayanımı sonuçlarının, hassas döküme göre daha yüksek ancak sıkıştırma infiltrasyon yöntemine göre daha düşük olduğunu belirtmişlerdir.

Long vd., (1999) SiC parçacıklarını ön şekil verme işleminden geçirerek elde edilen bir preform ile $AlCu_4MgAg$ alaşımını kullanarak, sıkıştırma döküm, basınçlı infiltrasyon gibi değişik yöntemlerle yüksek oranlarda (%45-80) takviyeli kompozit malzeme üretmişlerdir. Üretilen kompozit malzemenin mikro yapı ve mekanik özelliklerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesinde, elastiklik modülü, sertlik, yorulma dayanımı ve aşınma dirençlerinde monolitik matris alaşımına nazaran artış, kırılma tokluğu ve süneklikte önemli derecede azalma olduğunu belirtmişlerdir.

Sıvı Metal Karıştırma Teknikleri olarak biline yöntemlerde ön ısıtma yapılmış veya ön işlemlerden geçerek hazırlanmış takviye malzemeleri sürekli karıştırılan ergimiş metal içersine değişik yöntemlerle katılmakta ve daha sonra döküm işlemi yapılmaktadır. Takviye malzemesini sıvı metal içine karıştırmak için geliştirilen yöntemlerden bazıları aşağıdaki gibidir.

- Bir enjeksiyon tabancası kullanarak inert gaz desteği ile takviyenin ergimiş metal içersine enjeksiyonu
- Ergimiş metal kalıba dökülürken takviye ilavesi
- Mekanik bir karıştırıcı ile ergimiş metal içerisinde vorteks oluşturma ve takviyenin vorteks içine verilerek karışımın sağlanması
- Sıvı metal içersine küçük briketler halindeki takviye matris karışımlarının ilavesi
- Takviye malzemesinin folyolara paketlenerek ergimiş metale alttan veya üstten ilavesi
- Karşılıklı hareket eden çubuklar kullanılarak parçacıkların sıvı metal içine atılması
- Merkezkaç etki ile ince parçaların sıvı metal içersine dağıtılması

- Ultrasonik etki ile sıvı titreştirilirken takviyenin ilavesi
- Çok yüksek vakum altında uzun süre de sıfır yerçekimi etkisi ile karışım sağlanması

Karıştırma işleminin atmosfere açık olarak yapılması ergimiş metalin atmosferden gaz alması problemini oluşturduğundan dolayı işlemin koruyucu gaz veya vakum altında yapılması önerilmektedir. Yöntem kolay ve ucuz bir yöntem olmasına rağmen literatürde, çökeltme, topaklanma, segregasyon oluşumu, istenmeyen ara yüzey reaksiyonlarının oluşumu, takviye malzemesinin karıştırma esnasında hasar görmesi gibi sorunların oluştuğu da belirtilmektedir (Ejiofor, 1997).

Pai vd., (1993) sıvı metal karıştırma yönteminin diğer yöntemlere göre nispeten basit, ucuz ve hemen hemen tüm döküm yöntemlerine adapte edilebilir olduğunu ifade etmişler ve yaptıkları çalışmada, üç farklı takviye malzemesi (kırılmış karbon elyaf, grafit parçacıklar, SiC parçacıkları) ve beş farklı Al alaşımı matris malzemesi kullanarak (LM6, LM25, 6061, HMS2112 ve 7075), farklı döküm yöntemleriyle denemeler yapmışlar ve döküm yönteminin seçiminde takviye boyutunun ve tipinin belirleyici olduğu, kritik parçacık çapının 20 µm ve daha küçük çaplar olduğu, takviye malzemesinin sıvı alüminyum üzerinde oluşan geçirimsiz alümina tabakasını ve yüzey gerilimini aşarak ergimiş metal içine topaklanmadan karışmasını sağlamak için yeteri kadar güçte ve iyi tasarlanmış karıştırıcılar gerektiği, vorteks oluşumunun karışımı sağladığı fakat ortamdan oldukça fazla gaz emilmesine neden olduğu için bu tür karıştırma yöntemlerinde azot ve argon gazı koruması altında yapılması, yüzey gerilimini azaltmak ve takviyenin daha iyi karışımını sağlamak için, Mg, Ca, Nb, Ti, Pb gibi elementlerin alaşıma katılması gerektiği sonucuna varmışlardır.

Benzer bir çalışmada, Samuel ve Samuel, (1995) matris olarak Al-Si-Mg alaşımı, takviye olarak da SiC ve Al₂O₃ kullanmışlar ve ergimiş metal sıcaklığının, ortamdaki hidrojen seviyesinin ve karıştırma prosedürünün dengeli seçimi ile sırası ile istenmeyen kimyasal reaksiyonların, gaz porozitesinin ve inklüzyon ve oksit kirliliklerinin önlenmesinde önemli rol oynadığını belirtmişlerdir.

Gui vd., (2000) SiC takviyeli Al-Si matrisli kompozit malzemeleri döküm yolu ile üretmeyi kapsayan çalışmalarında, sıvı karıştırma prosesini takiben yarı-katı karıştırma prosesi uygulanmış, nispeten düşük devirli karıştırma sonucu SiC parçacıklarının matris malzemesi tarafından tam olarak ıslatılabildiği, karıştırma işleminin düşük sıcaklıklarda yapılması ile Al-SiC ara yüzeyinde istenmeyen Al₄C₃ oluşumunun minimize edildiğini ve %15 ve %20 hacımsal takviyeli kompozit malzemelerin çekme dayanımlarının takviye edilmemiş matris

malzemesine göre sırası ile %15 ile %26, akma dayanımının %40 ile %54, E-modülünün % 40 ile %30 oranında arttığını belirtmişlerdir.

Rheocasting ve Compocasting olarak bilinen döküm yöntemleri süreksiz faz takviyeli metal matrisli kompozitler için uygulanan yöntemlerin en ekonomik olanlarıdır (Bader, 2002). Matris malzemesi, karıştırma üniteli bir ergitme fırınının içine yerleştirilip ergime sıcaklığının 40-50 °C üzerinde ısıtılmakta, karıştırma işlemi ile sıcaklık homojenize edilmekte ve sıvı metal sıcaklığı kontrollü olarak düşürülmektedir. Alaşım %40-50 katı hale geldiğinde matris malzemesinin içine takviye malzemesi eklenmeye başlamaktadır. Takviyenin ilavesi esnasında sıcaklık yükseltilmeye başlamakta ve takviyenin tamamı iyi şekilde ısıtılınca kadar sıcaklık artırılarak karıştırma işlemi devam etmektedir. Nispeten düşük viskoziteye sahip karışım doğrudan basit kütük şeklinde dökülebilir, bu durumda yöntem “Rheocasting” adını almakta eğer karışım sıvı sıcaklığı üzerinde karıştırılarak döküm gerçekleştirilirse “Compocasting” adı verilmektedir.

Cöcen ve Önel (1996) compocasting yöntemini kullanarak elde ettikleri SiC takviyeli Al-Si alaşımı matrisli kompozit malzeme üretiminde karıştırma süresi ve artan takviye oranının malzemenin mikro yapısı üzerine etkilerini araştırmış, artan takviye oranının ve uzun karıştırma sürelerinin poroziteyi artırıcı yönde etki yaptığı sonucuna varmışlardır.

Plazma Püskürtme Tekniği, Özellikle parçacık takviyeli MMK malzemelerin üretiminde kabul görmüş bir yöntemdir. Plazma püskürtme, atomize edilmiş ergimiş metal parçacıklarının takviye elemanları üzerine istenilen kalınlıkta püskürtülmesi işlemidir. Püskürtülen ergiyik metal parçacıkları, takviye elemanlarına yapışmakta ve hızla katılaşmaya başlamaktadır. Bu tip üretim yöntemi alüminyum gibi ergime sıcaklığı nispeten düşük olan metallerde uygulanır. Bu üretim metoduyla matris malzemesi takviye elmanı üzerine istenilen kalınlığı verecek şekilde püskürtülerek kompleks şekilli parçalar üretilebilir. Bunlara ilaveten, bu yöntem takviyeler arası mesafenin kontrolü ve takviyelerin daha rahat yönlendirilebilmesi gibi avantajlara sahiptir.

Üretim esnasında ergimiş metal zerrecikleri takviye elemanına temas eder etmez katılaştığından sıvı halde üretim tekniğinin dezavantajlarından olan takviye-matris arasında oluşan ara reaksiyon problemleri en aza indirgenir. Bu nedenle plazma püskürtme yöntemi ara reaksiyon oluşma ihtimalinin yüksek olduğu durumlarda tercih sebebidir. Bu yöntemle en çok alüminyum-bor kompozitleri üretilmektedir. Bunun yanında alüminyum-SiC parçacık takviyeli kompozitlerde üretilmektedir.

Koruyucu gaz jeti ile birlikte atomize edilen ergimiş veya toz halindeki matris

malzemesine yine toz haldeki takviye malzemesinin katılıp beraberce bir katman üzerine püskürtülmesi yöntemi “Osprey yöntemi” olarak adlandırılmıştır. Katman kalınlığı ve işlem süresi kontrol edilebilen bu spray yöntemi düşük porozite değerleri göstermekte ve özellikle SiC parçacık takviyeli hafif metal uygulamalarında kullanılmaktadır.

Bir ötektingin yönlenmiş olarak katılaştırılması ile iki fazlı bir yapı ortaya çıkan In-Situ tekniğinde ise fazlardan biri matris diğeri ise matris içine dağıtılmış lamel, plaka veya elyaf şeklinde fazdır. Uygulamaların çoğu alüminyum, nikel ve kobalt esaslı alaşımlar kullanılarak yapılmaktadır.

Martin Marietta tarafından geliştirilen XD tekniği, takviye fazın sıvı metal içerisinde bir bileşik ilavesi ile oluşturulması prensibine dayanmaktadır. Bu yöntem ile sıvı metal fazı içerisinde pek çok seramik bileşik oluşturulabilmektedir. Parçacıklar sıvı metalin içinde oluşturulduğundan tek kristalli ve oksitlenmemiş ara yüzeylere sahiptir. Oluşan parçacık boyutlarının proses parametrelerinin hassas kontrolünü gerektiren yöntemle etkisiyle 0,2 – 10 µm arasında değişen takviyeye sahip MMK’lar üretilebilmektedir. değişmektedir.

Sıvı tabanlı üretim yöntemleri, parçacık takviyeli Al-MMC’lerin endüstriyel ölçekte üretiminde yaygın olarak kullanılmakla birlikte, takviye dağılımı, çökme, gaz hapsi ve arayüzey reaksiyonlarının kontrolü gibi sınırlılıklar içermektedir. Bu sınırlılıkların aşılmasına yönelik olarak geliştirilen yarı-katı karıştırma ve döküm yaklaşımları, ergiyik ve katı fazın birlikte bulunduğu dar sıcaklık aralığında işlem yapılmasına olanak tanıyarak daha homojen mikro yapı ve geliştirilmiş arayüzey özellikleri sunmaktadır.

3.1 Yarı- katı proseslerde temel prensipler

Sıvı tabanlı üretim yöntemleri, üretim kolaylığı ve endüstriyel uygulanabilirlik açısından önemli avantajlar sunmakla birlikte; gaz emilimi, parçacık çökmesi, arayüzey reaksiyonları ve takviye hasarı gibi sınırlamalar içermektedir. Bu kısıtlar, özellikle yüksek takviye oranları ve homojen mikro yapı gerektiren uygulamalarda alternatif üretim yaklaşımlarının geliştirilmesini gerekli kılmıştır. Bu bağlamda yarı-katı (semi-solid) prosesler, sıvı ve katı fazın birlikte kontrol edilebildiği bir üretim penceresi sunarak, söz konusu problemlerin önemli bir bölümünü azaltma potansiyeline sahiptir

Yarı-katı proses, metalin katı ve sıvı fazlarının birlikte bulunduğu dar bir sıcaklık aralığında gerçekleştirilen bir üretim yaklaşımıdır. Bu yöntemde malzeme tamamen ergimiş bir akışkan gibi davranmamakta, belirli bir katı-sıvı oranına bağlı olarak viskoz bir akış karakteri sergilemektedir. Yarı-katı işlem koşullarında, katı faz genellikle küresel veya küresele yakın morfolojiye sahip olup, bu yapı malzemenin akış sırasında kararlılığını ve şekillendirilebilirliğini

belirleyen temel unsurlardan biridir (Flemings, 1991; Atkinson, 2005).

Yarı-katı sistemlerde katı-sıvı oranı, malzemenin reolojik davranışı üzerinde doğrudan etkilidir. Düşük katı oranlarında yapı, sıvı metale yakın bir akış davranışı gösterirken, katı faz oranının artmasıyla birlikte akış direnci yükselmekte ve yapı daha viskoz bir karakter kazanmaktadır. Uygulamada, yarı-katı işleme için genellikle %30–60 aralığında katı faz oranları tercih edilmekte olup, bu aralık şekillendirilebilirlik ile mikroyapısal kararlılık arasında optimum bir denge sunmaktadır (Atkinson, 2005; Torralba et al., 2003).

Bu üretim yaklaşımının ayırt edici özelliklerinden biri, malzemenin thixotropic davranış sergilemesidir. Thixotropic özellik, yarı-katı yapıların uygulanan kesme kuvveti altında akışkanlıklarının artması, kesme kuvvetinin ortadan kalkmasıyla ise yeniden katılaşmaya eğilim göstermesi olarak tanımlanabilir. Bu davranış, yarı-katı metalin kalıp dolumu sırasında düşük dirençle akmasına olanak sağlarken, şekillendirme sonrasında yapının stabil kalmasına katkıda bulunmaktadır. Thixotropic akış, özellikle yarı-katı karıştırma süreçlerinde mikroyapı kontrolünün sağlanmasında kritik bir rol oynamaktadır (Flemings, 1991; Callister & Rethwisch, 2021).

Yarı-katı metal işlemenin başarısı, büyük ölçüde dendritik olmayan mikroyapının elde edilmesine bağlıdır. Klasik döküm süreçlerinde oluşan dallanmış dendritik yapılar, akış sırasında mekanik kilitlenmeye ve heterojen deformasyona yol açarken; yarı-katı işlemlerde hedeflenen küresel veya globüler taneler, daha izotropik mekanik özellikler ve daha kararlı bir akış davranışı sağlamaktadır. Dendritik olmayan bu yapı, kontrollü soğutma, mekanik veya elektromanyetik karıştırma ve uygun katılaşma koşulları ile elde edilebilmektedir (Torralba et al., 2003; Ashby & Jones, 2012).

Bu bağlamda yarı-katı metal işleme, sıvı tabanlı üretim yöntemleri ile katı hâl şekillendirme prosesleri arasında bir geçiş teknolojisi olarak değerlendirilmektedir. Yöntem, geleneksel döküm tekniklerine kıyasla daha düşük segregasyon eğilimi, daha homojen takviye dağılımı ve gelişmiş mikroyapı kontrolü sunarken; tam katı şekillendirme yöntemlerine göre ise daha düşük şekillendirme kuvvetleri ve daha karmaşık geometrilerin üretimine olanak sağlamaktadır. Bu özellikleriyle yarı-katı üretim yaklaşımları, özellikle parçacık takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin üretiminde önemli gelişmeler gösterebilecek bir yöntem olarak giderek artan bir ilgi görmektedir.

Yarı-katı metal işleme prensiplerinin sunduğu reolojik avantajlara rağmen, parçacık takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin üretiminde takviye dağılımının homojenliği, çökelme eğilimi ve arayüzey bağ kalitesi gibi problemler tamamen ortadan kaldırılamamaktadır. Özellikle sıvı metal karıştırma

temelli yöntemlerde, düşük viskozite nedeniyle takviye parçacıklarının yoğunluk farkına bağlı olarak çökmesi ve işlem sırasında gaz hapsi oluşması, kompozit performansını sınırlayan temel etkenler arasında yer almaktadır. Bu durum, yarı-katı bölgedeki viskoz akış davranışından daha etkin biçimde yararlanılmasını hedefleyen yeni işlem yaklaşımlarının geliştirilmesini gerekli kılmıştır.

Bu çerçevede, yarı-katı alüminyum matrisin sahip olduğu thixotropic özelliklerin kontrollü karıştırma adımlarıyla birleştirilmesine dayanan **modifiye edilmiş yarı-katı karıştırma yöntemleri**, literatürde dikkat çeken alternatifler arasında yer almaktadır. Bu tür yaklaşımlarda amaç, katı-sıvı oranının ve karıştırma koşullarının birlikte optimize edilmesi yoluyla takviye parçacıklarının matris içerisinde daha dengeli bir şekilde dağılmasını sağlamak ve katılaşma süreci boyunca bu dağılımı koruyabilmektir. Böylece, sıvı tabanlı yöntemlerde karşılaşılan çökme ve arayüzey zayıflıkları önemli ölçüde sınırlandırılabilir.

Bu bağlamda geliştirilen modifiye edilmiş yarı-katı karıştırma yaklaşımı, yarı-katı metal işleme prensipleri ile kontrollü karıştırma adımlarının bütüncül bir şekilde ele alınmasına dayanmaktadır. Yöntem, yarı-katı bölgedeki viskoz akış davranışından yararlanarak takviye parçacıklarının yerçekimi etkisi altında ayrışmasını engellemeyi ve matris-takviye etkileşimini iyileştirmeyi hedeflemektedir. Söz konusu yaklaşım, uluslararası patent tescili ile de belgelenmiş olup (WO2015094139A3), yarı-katı alüminyum matrisli kompozitlerin üretiminde alternatif bir proses yolu sunmaktadır.

3.2. Modifiye Edilmiş Yarı-Katı Karıştırma Yaklaşımı

Bu yaklaşımda, katı-sıvı dönüşümü sırasında ortaya çıkan gizli ısının, yarı-katı bölgedeki termal kararlılığı destekleyici etkisinden yararlanılmaktadır. Yarı-katı metal işleme süreçlerinde katı-sıvı dönüşümü sırasında ortaya çıkan gizli ısı, işlem bölgesinde termal kararlılığın sağlanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Katılaşma veya yeniden ergime esnasında açığa çıkan ya da soğurulan bu gizli ısı, sıcaklık dalgalanmalarını sınırlandırarak yarı-katı bölgedeki katı-sıvı oranının daha dengeli bir şekilde korunmasına katkı sağlamaktadır. Bu durum, özellikle dar bir sıcaklık aralığında gerçekleştirilen yarı-katı karıştırma işlemlerinde, mikro yapının kararlılığı ve akış davranışının sürekliliği açısından belirleyici olmaktadır.

Gizli ısının dengeleyici etkisi sayesinde, yarı-katı matris viskoz bir akış karakteri sergilemekte ve thixotropic davranış daha kontrollü bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Böylece, karıştırma sırasında uygulanan kesme kuvvetleri altında matrisin akışkanlığı artarken, kuvvetin azalmasıyla birlikte yapı yeniden kararlılık kazanmaktadır. Bu özellik, takviye parçacıklarının yerçekimi etkisiyle

çökmesini sınırlandırmakta ve parçacıkların matris içerisinde daha homojen bir şekilde dağılmasına imkân tanımaktadır.

Bu yaklaşımda, yarı-katı bölgedeki termal ve reolojik koşulların birlikte kontrol edilmesi, sıvı tabanlı karıştırma yöntemlerinde karşılaşılan takviye segregasyonu, gaz hapsi ve arayüzey zayıflıkları gibi problemlerin azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Gizli ısı etkisinden yararlanılarak gerçekleştirilen yarı-katı karıştırma işlemleri, bu yönüyle geleneksel sıvı karıştırma yöntemleri ile yarı-katı metal işleme prensipleri arasında köprü kuran bir üretim yaklaşımı olarak değerlendirilebilir.

Gizli ısı etkisi altında gerçekleştirilen yarı-katı karıştırma yaklaşımı kapsamında, işlem sıcaklığı ve karıştırma adımları birlikte değerlendirilerek kontrollü bir üretim protokolü uygulanmaktadır. Bu protokolde temel amaç, yarı-katı bölgedeki katı-sıvı oranının dar bir aralıkta tutulması ve katı-sıvı dönüşüm sırasında ortaya çıkan gizli ısının termal kararlılığı destekleyici etkisinden yararlanmaktır. Böylece, yarı-katı matrisin viskoz akış davranışı kararlı hâle getirilmekte ve karıştırma süreci boyunca mikro yapısal süreklilik sağlanmaktadır.

Protokolün ilk aşamasında, alüminyum matris alaşımı kontrollü bir şekilde yarı-katı sıcaklık aralığına getirilmekte ve bu bölgede belirli bir süre tutulmaktadır. Bu aşamada, katı fazın küresel veya küresele yakın morfoloji kazanması hedeflenmektedir. Takviye parçacıkları, yarı-katı bölgedeki viskoz yapı içerisine, kontrollü karıştırma koşulları altında ilave edilmekte olup, bu sayede parçacıkların yerçekimi etkisiyle çökmesi sınırlandırılmaktadır.

Karıştırma işlemi, yarı-katı yapının thixotropic davranışını destekleyecek şekilde kademeli olarak uygulanmaktadır. Uygulanan kesme kuvvetleri altında matrisin akışkanlığı artmakta, karıştırma aralıklarında ise yapı yeniden kararlılık kazanmaktadır. Bu kademeli yaklaşım, takviye parçacıklarının matris içerisinde daha homojen bir şekilde dağılmasına ve dağılımın katılma sürecine kadar korunmasına katkı sağlamaktadır. İşlem süresince, aşırı reaksiyonların ve gaz hapsinin önlenmesi amacıyla sıcaklık ve karıştırma parametreleri birlikte optimize edilmektedir.

Bu protokolün temel özelliği, sıvı tabanlı karıştırma yöntemlerinde karşılaşılan düşük viskoziteye bağlı segregasyon problemlerini sınırlandırırken, yarı-katı metal işleme prensiplerinin sunduğu mikro yapı kontrol avantajlarını etkin bir biçimde kullanmasıdır. Bu yaklaşım, uluslararası patent tescili ile de belgelenmiş olup (WO2015094139A3), yarı-katı alüminyum matrisli kompozitlerin üretiminde alternatif bir yöntem olarak değerlendirilmektedir.

Sıvı tabanlı karıştırma ve döküm yöntemleri, parçacık takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin üretiminde yaygın olarak kullanılmakla birlikte, düşük ergiyik viskozitesi nedeniyle takviye parçacıklarının çökmesi, gaz hapsi oluşumu ve arayüzey bağ kalitesinin sınırlı kalması gibi dezavantajlar içermektedir. Bu yöntemlerde, takviye dağılımının homojenliği büyük ölçüde karıştırma hızına ve işlem süresine bağlı olup, katılma sırasında bu dağılımın korunması her zaman mümkün olmamaktadır.

Gizli ısı etkisi altında gerçekleştirilen yarı-katı karıştırma yaklaşımında ise, yarı-katı bölgedeki viskoz akış davranışı sayesinde takviye parçacıklarının hareketliliği sınırlandırılmakta ve yerçekimi etkisiyle oluşabilecek segregasyon eğilimi önemli ölçüde azaltılmaktadır. Ayrıca, katı-sıvı dönüşümü sırasında açığa çıkan gizli ısıнын sıcaklık dalgalanmalarını bastırıcı etkisi, işlem boyunca daha kararlı bir termal ortam sağlamaktadır. Bu durum, mikro yapının sürekliliği ve arayüzey bağ kalitesi açısından sıvı tabanlı yöntemlere kıyasla önemli bir avantaj sunmaktadır.

Yarı-katı karıştırma yaklaşımı, aynı zamanda daha düşük işlem sıcaklıklarında gerçekleştirilebilmesi nedeniyle oksidasyon eğilimini ve istenmeyen arayüzey reaksiyonlarını sınırlandırmaktadır. Bu özellik, özellikle Al-SiC gibi sistemlerde ara faz oluşum riskinin azaltılması açısından önem taşımaktadır. Sonuç olarak, gizli ısı etkisinden yararlanan yarı-katı karıştırma yaklaşımı; sıvı tabanlı yöntemlerin üretim kolaylığı ile yarı-katı metal işleme tekniklerinin mikro yapı kontrol avantajlarını bir araya getiren bütüncül bir üretim yöntemi olarak değerlendirilebilir (Ürkmez, 2004).

KAYNAKÇA

- Alam, M. A., Ya, H. B., Azeem, M., Khan, M. I., & Muhammad, W. (2023). Advancements in aluminum matrix composites reinforced with carbides and graphene: A comprehensive review. *Nanotechnology Reviews*, 12, 2023011.
- Ashby, M. F., & Jones, D. R. H. (2012). *Engineering materials 1: An introduction to properties, applications and design* (4th ed.). Butterworth-Heinemann.
- Beljajev, A. I. (1974). *Alüminyum metalurjisi*. TMMOB Makina Mühendisleri Odası Yayınları.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2021). *Materials science and engineering: An introduction* (10th ed.). Wiley.
- Chawla, N., & Chawla, K. K. (2018). *Metal matrix composites*. Springer.
- Clyne, T. W., & Hull, D. (2019). *An introduction to composite materials* (3rd ed.). Cambridge University Press.
- Davis, J. R. (1993). *Aluminum and aluminum alloys*. ASM International.
- Department of Defense. (1999). *Composite materials handbook, Volume 4: Metal matrix composites*. U.S. Department of Defense.
- Elango, K., & Kumar, M. P. (2021). Influence of heat treatment on aluminum metal matrix composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 13, 345–359.
- Hanumanth, G. S., & Irons, G. A. (1993). Particle incorporation by melt stirring for the production of metal matrix composites. *Journal of Materials Science*, 28(9), 2459–2465.
- Hashim, J., Looney, L., & Hashmi, M. S. J. (2001). Metal matrix composites: Production, matrix and reinforcement. *Journal of Materials Processing Technology*, 92–93, 1–7.
- Hull, D., & Clyne, T. W. (1996). *An introduction to composite materials* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Kar, A., Sharma, A., & Kumar, S. (2024). A critical review on recent advancements in aluminium-based metal matrix composites. *Crystals*, 14(5), 412.

- Kaczmar, J. W., Pietrzak, K., & Wlosinski, W. (2000).
The production and application of metal matrix composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 106(1–3), 58–67.
- Kaufman, J. G., & Rooy, E. L. (2004).
Aluminum casting alloys. ASM International.
- Khorasani, P. (1995).
Hydrogen solubility and porosity formation in aluminum alloys. *Metallurgical Publications*.
- Long, S., Beffort, O., Cayron, C., & Bonjour, C. (1999).
Microstructure and mechanical properties of SiC-reinforced aluminum composites. *Materials Science and Engineering A*, 269, 175–185.
- Mallick, P. K. (2007).
Fiber-reinforced composites: Materials, manufacturing, and design (3rd ed.). CRC Press.
- Metcalfe, A. G. (1974).
Metal–ceramic interfaces. Academic Press.
- Miracle, D. B. (2017).
Metal matrix composites for high-performance applications. *Composites Science and Technology*, 154, 1–17.
- Mondolfo, L. F. (1976).
Aluminum alloys: Structure and properties. Butterworths.
- Mortensen, A. (Ed.). (1993).
Metal matrix composites. Academic Press.
- North American Defense Industrial Base Organization. (1993).
Metal matrix composites – Sector study. BDM Federal Inc.
- Polmear, I., Mostert, R., & StJohn, D. (2017).
Light alloys: Metallurgy of the light metals (5th ed.). Butterworth–Heinemann.
- Rawal, S. (2001).
Metal–matrix composites for space applications. *JOM*, 53(4), 14–17.
- Shivkumar, S. (1991).
Porosity formation during solidification of aluminum alloys. *Metallurgical Transactions A*, 22(7), 1521–1534.
- Strong, A. B. (2008).
Fundamentals of composites manufacturing: Materials, processes, and applications. SME.

- Torralba, J. M., Costa, C. E., & Velasco, F. (2003).
P/M aluminum matrix composites: An overview. *Journal of Materials Processing Technology*, 133(1–2), 203–206.
- Totten, G. E., & MacKenzie, D. S. (2003).
Handbook of aluminum: Physical metallurgy and processes. CRC Press.
- Ürkmez Taşkın, N. (2004).
Al–Mg/SiCp kompozitlerinin üretimi ve mekanik özelliklerdeki değişimlerin incelenmesi (Doktora tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Vaucher, S., & Beffort, O. (2000).
Bonding and interface formation in metal matrix composites. EMPA Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research.
- Webster, D. (1980).
Aluminum alloys and their heat treatment. ASM International.
- Zulfia, A., Atkinson, H. V., & Jones, H. (1999).
Effect of hot isostatic pressing on A357 Aluminum alloy metal matrix composites. *Journal of Materials Science*, 34, 4305–4310.